

A
N
A
I
S

3º CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AMBIENTAL VOLUME 1 B



2
0
2
4

EDIÇÃO
LUSO-BRASILEIRA

Comissão Organizadora

Cristiano Poletto
Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves
Ivan Cesar Tremarin
Jorge Manuel Guieiro Pereira Isidoro
João Luís Mendes Pedroso de Lima
Rodrigo Jorge Fonseca de Oliveira Maia
André Luis Sotero Salustiano Martim
Maria Cristina de Almeida Silva
Cristiane Kreutz
Francisco Lledo dos Santos
Marcos Vinicius Costa Rodrigues

**ANAIS DO 3º CONGRESSO
INTERNACIONAL DE
ENGENHARIA AMBIENTAL**

VOLUME 1 B – ARTIGOS COMPLETOS

Copyright © 2024, by IAHR Publishing.

Direitos Reservados em 2024 por **IAHR Publishing.**

Organização Geral da obra: Poletto, Cristiano; Inácio Gonçalves, Julio Cesar de Souza; Tremarin, Ivan Cesar; Isidoro, Jorge Manuel Guieiro Pereira; de Lima, João Luís Mendes Pedroso; Maia, Rodrigo Jorge F. de Oliveira; Martim, André Luis Sotero Salustiano; Silva, Maria Cristina de Almeida; Kreutz, Cristiane; dos Santos, Francisco Lledo; Rodrigues, Marcos Vinicius Costa.

Diagramação: Cícero Manz Fagotti

Edição: Cristiano Poletto

Revisão: Elissandro Voigt Beier

Capa: Cícero Manz Fagotti

Copyright © 2024, by IAHR Publishing.

Derechos Reservados en 2024 por **IAHR Publishing.**

Organización General de la Obra: Poletto, Cristiano; Inácio Gonçalves, Julio Cesar de Souza; Tremarin, Ivan Cesar; Isidoro, Jorge Manuel Guieiro Pereira; de Lima, João Luís Mendes Pedroso; Maia, Rodrigo Jorge Fonseca de Oliveira; Martim, André Luis Sotero Salustiano; Silva, Maria Cristina de Almeida; Kreutz, Cristiane; dos Santos, Francisco Lledo; Rodrigues, Marcos Vinicius Costa.

Maquetación: Cícero Manz Fagotti

Edición: Cristiano Poletto

Relectura General: Elissandro Voigt Beier

Portada: Cícero Manz Fagotti

Anais do 3º Congresso Internacional de Engenharia Ambiental - Volume 1 B/
Organizadores: Cristiano Poletto, Julio Cesar de Souza Inácio, Ivan Cesar Tremarin, Jorge Manuel Guieiro Pereira Isidoro, João Luís Mendes Pedroso de Lima, Rodrigo Jorge Fonseca de Oliveira Maia, André Luis Sotero Salustiano Martim, Maria Cristina de Almeida Silva, Cristiane Kreutz, Francisco Lledo dos Santos, Marcos Vinicius Costa Rodrigues. Madrid, Espanha: - IAHR Publishing, 2024.

489p.: il.;

ISBN • 978-90-833476-4-6

CDD: 600

*É AUTORIZADA a livre reprodução, total ou parcial, por qualquer meio, sem
autorização escrita do Editor ou dos Organizadores.*

*ES AUTORIZADA la libre reproducción, total o parcial, por cualquier medio, sin
autorización escrita del Editor o de los Organizadores.*

Comissão Organizadora GERAL

Dr. Cristiano Poletto (PRESIDENTE)

IPH / UFRGS

Dr. Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves

UFTM

MSc. Ivan Cesar Tremarin

Associação dos Engenheiros Ambientais e Sanitaristas do Vale do Taquari RS - EASVA

Comissão Organizadora INTERNACIONAL

Dr. Jorge Manuel Guieiro Pereira Isidoro

Universidade do Algarve

Dr. João Luís Mendes Pedroso de Lima

Universidade de Coimbra

Dr. Rodrigo Jorge Fonseca de Oliveira Maia

Universidade do Porto

Comissão Organizadora NACIONAL

Dr. André Luis Sotero Salustiano Martim

UNICAMP

Dr.^a Maria Cristina de Almeida Silva

IPH/UFRGS

Dr.^a Cristiane Kreutz

UTFPR

Dr. Francisco Lledo dos Santos

UNEMAT

MSc. Marcos Vinicius Costa Rodrigues

FNEAS

Comissão Científica

Aline Ferrão Custódio Passini - UFSM
Álvaro José Back - EPAGRI/SC
Amintas Nazareth Rossete - UNEMAT
André Luis Sotero Salustiano Martim - UNICAMP
Andrezza Marques Ferreira - CEMADEN
Carla Eloísa Diniz dos Santos - UFTM
Carlos Alberto Mendes Moraes - UNISINOS
Cíntia Soares - UFSC
Claudia Telles Benatti - UEM
Cristiane Kreutz - UTFPR
Cristiano Poletto - IPH/UFRGS
Diego Andrade Lemos - UFSCAR
Elizabeth Yukiko Nakanishi Bavastri - UFPR
Felipe Fernandes - Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira
Fernando Neves Lima - UNIFEI
Fernando Periotto - UFSCAR
Flavia Schwarz Franceschini Zinani - IPH/UFRGS
Franciéle Schwanck Carlos - IPH/UFRGS
Francisco Lledo dos Santos - UNEMAT
Geraldo de Freitas Maciel - UNESP
Jackeline Tatiane Gotardo - UNIOESTE
Joel Dias da Silva - FURB
João L. M. Pedroso de Lima - Univ. de Coimbra / Portugal
Jorge M. G. Pereira Isidoro - Univ. do Algarve / Portugal
José Anderson do Nascimento Batista - UNICAMP
José Augusto Costa Gonçalves - UNIFEI
José Carlos de Araújo - UFC
José Gilberto Dalfré Filho - UNICAMP
Josiane Teresinha Cardoso - UDESC
Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves - UFTM
Karina Bruno Lima - UFRGS
Laura Maria Canno Ferreira Fais - UNICAMP
Liliane Lazzari Albertin - UNESP
Liseane Padilha Thives - UFSC
Lucijane Monteiro de Abreu - UNB
Luis Eduardo A. S. Suzuki - UFPEL
Marcelo Giovanela - UCS
Márcia Teixeira Falcão - UERR
Maria Cristina de Almeida Silva - UFRGS
Maristela Denise Moresco Mezzomo - UTFPR
Michael Mannich - UFPR
Morgana Silva - UFPEL
Natan Padoin - UFSC
Patrícia Diniz Martins - UFTM
Pedro Alves Da Silva Filho - UFRR
Renato Miranda - USP
Rodrigo J. F. de Oliveira Maia - Univ. do Porto / Portugal
Ronaldton Evandro Machado - UNICAMP
Sidnei Luís Bohn Gass - UNIPAMPA
Simone Andrea Furegatti - UNESP
Stenio de Sousa Venancio - UFTM
Tiago de Vargas - UFRGS
Viviane Trevisan - UDESC
Yuri Jacques Agra Bezerra da Silva - UFPI



ORGANIZAÇÃO



REALIZAÇÃO





PATROCÍNIO



APOIO



| SUMÁRIO |

ARTIGOS COMPLETOS

ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIOS E LAGOS

APLICAÇÕES DE REDES NEURAI ARTIFICIAIS NO ESTUDO DO ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIOS: UMA REVISÃO ABRANGENTE 13

INTERVENÇÕES DE ENGENHARIA NATURAL PARA CONTROLE DE PROCESSOS EROSIVOS EM RESERVATÓRIOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS 20

DESASTRES NATURAIS

ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE A DESASTRES DE ORIGEM HIDROLÓGICA PARA AS REGIÕES METROPOLITANA DE SÃO PAULO, LITORAL SUL E VALE DO PARAÍBA 30

INFLUENCIA DE COBERTURAS VEGETALES arbóreas y no arbóreas EN LA ATENUACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS 39

INUNDAÇÕES NO ESTADO DO ACRE, NA AMAZÔNIA BRASILEIRA: EVENTOS DE 2015, IMPACTOS E DESAFIOS..... 48

PERCEPÇÕES SOCIAIS SOBRE A CHEIA DE MAIO DE 2024 EM PORTO ALEGRE 58

EDUCAÇÃO AMBIENTAL

EDUCAÇÃO AMBIENTAL REPRESENTADA NO “DOMINÓ PEIXES AMAZÔNICOS” COMO ESTRATÉGIA METODOLÓGICA NO PROCESSO ENSINO-APRENDIZAGEM NO ENSINO FUNDAMENTAL..... 67

ECOTURISMO BASEADO NO MAPEAMENTO GEOGRÁFICO DO PARQUE NACIONAL DO ITATIAIA NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO..... 75

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ÁREA DE INFLUÊNCIA DO “CEMITÉRIO VICENTINO” EM PONTA GROSSA/PR 81

POTENCIAL BIOTECNOLÓGICO DE SEMENTES DE BIRIBÁ (*Rollinia mucosa* (JACQ.) BAILL) COLETADO NA AMAZÔNIA - BRASIL 89

APLICAÇÃO DA EDUCAÇÃO AMBIENTAL PARA O TRATAMENTO E MINIMIZAÇÃO DE RESÍDUOS QUÍMICOS GERADOS EM LABORATÓRIOS DE ENSINO E PESQUISA 94

“COMPOSTAR PRA QUÊ?”: SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA ENSINAR COMPOSTAGEM NO ENSINO MÉDIO 100

IMPLANTAÇÃO DE VIVEIRO FLORESTAL EXPERIMENTAL E ANÁLISE DO POTENCIAL BIOTECNOLÓGICO DE SEMENTES DE CUPUAÇU (*Theobroma grandiflorum*) ATRAVÉS DE UM BANCO DE GERMOPLASMA VEGETAL COLETADO NA AMAZÔNIA - BRASIL..... 108

EDUCAÇÃO AMBIENTAL ATRAVÉS DA IMPLANTAÇÃO DE VIVEIRO FLORESTAL EXPERIMENTAL E ANÁLISE DO POTENCIAL BIOTECNOLÓGICO DE SEMENTES DE AÇAÍ (*Euterpe oleracea*) DO BANCO DE GERMOPLASMA VEGETAL COLETADO NA AMAZÔNIA - BRASIL.....117

PRATICANDO A EDUCAÇÃO AMBIENTAL PARA ALÉM DOS MUROS DO IFPB, CAMPUS SANTA RITA 124

CEDAE IMERSA NA AGENDA 2030: EDUCAÇÃO AMBIENTAL, COMPROMISSO PARA ALÉM DOS MUROS DAS INSTITUIÇÕES DE ENSINO..... 131

IMPACTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO DE COGUMELOS COMESTÍVEIS 138

ANÁLISE DOS DADOS QUANTO A COLETA E TRATAMENTO DE ESGOTO NO BRASIL ... 145

REVITALIZACIÓN DE PUNTOS ADICTOS A LA ELIMINACIÓN IRREGULAR DE RESIDUOS: EXPERIENCIA MUNICIPAL SÃO LOURENÇO DA MATA/PE	155
EVOLUÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DE COMUNICAÇÃO E MOBILIZAÇÃO SOCIAL EM PLANOS MUNICIPAIS DE SANEAMENTO BÁSICO - ESTUDO DE CASO	161
PERCEPÇÕES DE ESTUDANTES DE PÓS-GRADUAÇÃO SOBRE AS VULNERABILIDADES AMBIENTAIS NA APA DOS RECIFES DE CORAIS: O CASO DOS PARRACHOS DE MARACAJÁ/RN, BRASIL	168
LEVANTAMENTO FITOGEOGRÁFICO DO PARQUE MUNICIPAL TRÊS IRMÃOS, TERRA RICA-PR	176

ENERGIAS RENOVÁVEIS

POBREZA ENERGÉTICA E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA. CONSIDERAÇÕES SOBRE A REGIÃO NORTE DO BRASIL, ONDE SE LOCALIZA A AMAZÔNIA	185
ANÁLISE DE VAZÃO MÍNIMA DIÁRIA E MENSAL EM LOCAIS COM APROVEITAMENTO HIDRELÉTRICO	193
CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA SUPLEMENTADA COM BIOCHAR: UMA ESTRATÉGIA PROMISSORA PARA A MAXIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS, E PARA VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS ALIMENTARES E LODO DE ETE	203
REUTILIZAÇÃO DE BATERIAS DE NOTEBOOK PARA APLICAÇÃO EM SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF-GRID: UM ESTUDO DE CASO	213
APRENDIZADO DE MÁQUINA PARA PREVISÃO DE VAZÃO E PRESSÃO EM UM CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS DE COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE	223
<i>DESIGN CONSTRUTAL</i> APLICADO A UM DISPOSITIVO DE CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS DO MAR DE COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE COM DUAS CÂMARAS	233
PRODUÇÃO DE PELLETS DE RESÍDUOS DE PODAS DE ÁRVORES PARA UTILIZAÇÃO COMO BIOCOMBUSTÍVEL: ESTUDO DE CASO DA ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA (EEL/USP)	244
ANÁLISE E PERCEPÇÃO DO USO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA EM CONCEIÇÃO DO ARAGUAIA, PARÁ	252
USO DO BIODIGESTOR COMO TECNOLOGIA SOCIAL APLICADA À COMUNIDADES RURAIS DO MUNICÍPIO DE LAJES PINTADAS/RN.....	258
ESTIMATIVA PRELIMINAR DO POTENCIAL HIDRELÉTRICO DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BRAÇO DO NORTE, SANTA CATARINA, BRASIL	265
A UTILIZAÇÃO DE BIODIGESTORES E DA COMPOSTAGEM COMO UMA SOLUÇÃO ENERGÉTICA SUSTENTÁVEL PARA O SANEAMENTO RURAL	276
VALORIZAÇÃO DE RESÍDUO SÓLIDO DE SISAL (<i>Agave sisalana</i>) PARA FINS ENERGÉTICOS	288
TOMADA DE DECISÃO PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL (SAF): UMA ANÁLISE UTILIZANDO O MÉTODO AHP	295

ESTUDOS MORFOLÓGICOS FLUVIAIS E COSTEIROS

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE CORRENTE DE TURBIDEZ, EM CONFIGURAÇÃO AXISSIMÉTRICA	306
APLICAÇÃO DO MODELO <i>DRIFTFLUXFOAM</i> PARA A MODELAGEM DE CORRENTES DE TURBIDEZ EM CONFIGURAÇÃO NÃO-CONFINADA: VALIDAÇÕES BASEADAS NAS METODOLOGIAS RANS E LES	313

FERRAMENTAS APLICADAS AOS INSTRUMENTOS DE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

MAPEAMENTO DE SUSCETIBILIDADE A INUNDAÇÕES: UMA REVISÃO ESTRUTURADA DA LITERATURA.....	321
MUDANÇAS DO USO E COBERTURA DO SOLO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS DA AMAZÔNIA E SUA INFLUÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO LOCAL. 331	
AS FERRAMENTAS DO SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL/CPRM NO AUXÍLIO AOS INSTRUMENTOS DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS ...	343
CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TAQUARI - TO... 351	
ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E FINANCEIRA DA IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO E CHUVA	356
CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA E DIAGNÓSTICOS DE IMPACTOS MACROSCÓPIOS NA BACIA DO RIBEIRÃO CAMBÉ - PR	351
AVALIAÇÃO AMBIENTAL ESTRATÉGICA NA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL: UMA REVISÃO	373
ANÁLISE COMPARATIVA DE COTAS SENSOR (PCD) X COTAS DISPLAY (OBSERVADOR) - ESTUDO DE CASO ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA DE JI-PARANÁ	380
ESTAÇÃO HIDROMETEOROLÓGICA E SISTEMA AQUISIÇÃO DE DADOS PARA MONITORAMENTO E ALERTA EM REGIÃO MONTANHOSA	390
ESTRATÉGIAS PARA PROTEÇÃO E RECUPERAÇÃO DE MANANCIAIS DE ABASTECIMENTO EM SÃO PAULO	402
IMPACTOS DA APLICAÇÃO DO BUSINESS INTELLIGENCE NO SETOR DE SANEAMENTO DA SUPERINTENDÊNCIA NORTE NA COMPANHIA DE SANEAMENTO DO MARANHÃO NO ANO DE 2023	410
INVERSE PROBLEM SOLUTION FOR MICROPLASTIC EMISSION SOURCE AREA ESTIMATION IN MOHID: THE SEPETIBA BAY CASE STUDY.....	417
MONITORAMENTO DA VAZÃO EM UM CURSO D'ÁGUA URBANO PELOS MÉTODOS DO FLUTUADOR E ACÚSTICO.....	426
VULNERABILIDADE DOS AQUIFÉROS DO RIO GRANDE DO SUL: APLICAÇÃO DO MÉTODO GOD UTILIZANDO GEOPROCESSAMENTO	434
FERRAMENTAS APLICADAS AOS INSTRUMENTOS DE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA SEGURANÇA EM BARRAGEM DE TERRA	443
ANÁLISE DOS CRITÉRIOS UTILIZADOS NA IMPLEMENTAÇÃO DO INSTRUMENTO DE OUTORGA PARA LANÇAMENTO DE EFLUENTES NOS ESTADOS BRASILEIROS.....	452
USO DA REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA NA PREDIÇÃO DO NÍVEL DOS RESERVATÓRIOS A PARTIR DE IMAGENS DE SATÉLITE.....	461
SÍNTESE DO PROGRAMA PROTETOR DAS ÁGUAS E SUA EVOLUÇÃO NO USO DO PAGAMENTO POR SERVIÇOS AMBIENTAIS NA PROMOÇÃO DA CONSERVAÇÃO E RECUPERAÇÃO DA BACIA DO ARROIO ANDRÉAS, RS, BRASIL	470
PREVISÃO DE SÉRIES TEMPORAIS DE VAZÃO DO RESERVATÓRIO TRÊS MARIAS A PARTIR DE MODELOS HÍBRIDOS DE MÁQUINA DE APRENDIZADO (DWT-RNA) E APRENDIZADO PROFUNDO (VMD-LSTM)	480

ARTIGOS COMPLETOS



3º CONGRESSO INTERNACIONAL DE **ENGENHARIA AMBIENTAL**

– EDIÇÃO LUSO-BRASILEIRA –



2024

ÁREA TEMÁTICA 1

ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIOS E LAGOS



3º CONGRESSO INTERNACIONAL DE
**ENGENHARIA
AMBIENTAL**



APLICAÇÕES DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS NO ESTUDO DO ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIOS: UMA REVISÃO ABRANGENTE

1Rose Mary Teixeira de Lemos, 2Denise Parizotto, 3Camila Bermond Borges Ruezzen, 4Renato Billia de Miranda, 5Frederico Fábio Mauad

1Universidade de São Paulo, e-mail: roselemos@usp.br; 2Universidade de São Paulo, e-mail: deniseparizotto@usp.br;

3Universidade de São Paulo, e-mail: camila.ruezzen@gmail.com; 4eng.renato.miranda@gmail.com;

5Universidade de São Paulo, e-mail: mauadffm@sc.usp.br

Resumo

O assoreamento de reservatórios é um desafio comum e impactante nas centrais elétricas, comprometendo a eficiência operacional. O acúmulo de sedimentos no leito do reservatório reduz a disponibilidade hídrica e a capacidade de armazenamento, prejudicando o desempenho da central elétrica. A complexidade e o alto custo associados à recuperação desses corpos d'água destacam a necessidade premente de medidas preventivas e monitoramento constante. Este estudo propôs uma revisão bibliográfica com uma abordagem inovadora, utilizando modelos de Redes Neurais Artificiais (RNA) para mitigar a falta de séries históricas hidroclimatológicas e hidrossedimentológicas, reduzindo incertezas no estudo do assoreamento de reservatórios. As RNAs reconhecidas por sua capacidade de lidar com comportamentos variáveis complexas, empregadas na análise de dados característicos do reservatório. Além disso, são altamente adaptáveis e podem ser treinadas para se ajustar a uma variedade de condições e contextos específicos de diferentes reservatórios e bacias hidrográficas. O uso das redes visa fornecer uma perspectiva diferenciada no estudo do assoreamento contribuindo na modelagem e flexibilidade de desafios encontrados. À medida que a aplicação das redes ganha destaque de desempenho na tomada de decisões operacionais e significativamente na redução dos custos operacionais nas centrais elétricas.

Palavras-chave: Redes Neurais Artificiais; assoreamento; reservatórios

Introdução

Com o aumento relevante na demanda de energia elétrica pela população, para os mais variados fins, se faz necessário novos investimentos para suprir esta necessidade. A matriz energética do Brasil é predominantemente renovável, sendo a produção de energia hidráulica uma das alternativas mais usadas para a geração de energia elétrica. A grande quantidade de rios que desloca-se pelo Brasil, além das características físicas e geográficas e a disponibilidade de recursos hídricos, são determinantes para que o país esteja hoje, produzindo uma das maiores reservas de hidroenergia, o terceiro maior potencial hidráulico do mundo (EPE – Empresa de Pesquisa Energética, 2020).

Contudo quando o rio é represado, o seu curso d'água tem a tendência natural de depositar sedimentos ao diminuir a velocidade do fluxo. Deste modo, os reservatórios sofrem as consequências da ocupação e uso do solo dentro dos limites de sua bacia de drenagem (TUNDISI, 1999) O assoreamento de reservatórios é um problema comum em centrais elétricas que dependem de reservatórios para gerar energia hidrelétrica. Este ocorre quando sedimentos (como areia, silte, argila e detritos) se acumulam no fundo do reservatório, reduzindo a capacidade de armazenamento de água e afetando o desempenho da central elétrica.

Os protocolos operacionais em centrais elétricas desempenham um papel importante na gestão científica dos seus reservatórios. Isso ocorre, quando uma regra operacional cientificamente sólida pode ajudar os operadores a tomarem boas decisões, mesmo possuindo informações limitada. Nas últimas décadas, vários métodos eficazes têm sido desenvolvidos por pesquisadores de todo o mundo (NIU, 2019)

Um desses modelos é a aplicação de uma rede neural, a qual pode auxiliar na quantificação desse assoreamento em um reservatório por meio da modelagem de dados coletados. A utilização de redes neurais é uma ferramenta poderosa em muitas áreas da ciência e da engenharia, incluindo a gestão de reservatórios de centrais elétricas. Nesse contexto pode ser benéfica como por exemplo na previsão e monitoramento da sedimentação; otimização de operações, e na melhoria da tomada de decisões, maximizando a eficiência da geração de energia e minimizando os custos de manutenção.

A fim de se entender com mais profundidade o que foi exposto, ao longo do desenvolvimento da pesquisa foi realizado uma pesquisa abrangente a respeito das Redes Neurais Artificiais (RNA), pois elas podem lidar com uma ampla variedade de dados de entrada, permitindo a integração de múltiplas variáveis em um único modelo. Serão então utilizadas para o desenvolvimento e para prever os impactos das concentrações totais de sólidos e o assoreamento em um reservatório. Podendo assim auxiliar na compreensão e identificação de tendências e padrões de sedimentação.

Objetivo

Avaliar a viabilidade de utilizar Redes Neurais Artificiais (RNAs) como abordagem alternativa para superar a falta de séries históricas hidroclimatológicas e hidrossedimentológicas e reduzir as incertezas associadas ao estudo do assoreamento em reservatórios.

Material e Métodos

A metodologia adotada consistiu em uma revisão bibliográfica, focada na identificação e análise crítica de estudos relevantes sobre a aplicação de Redes Neurais Artificiais (RNAs) no contexto do assoreamento de reservatórios. Para garantir uma abordagem abrangente, realizou-se uma busca minuciosa nas principais bases de dados científicas, incluindo Google Scholar, Scopus, Science Direct e Web of Science. A estratégia de busca empregou um conjunto de palavras-chave criteriosamente selecionadas - 'Redes Neurais Artificiais', 'assoreamento', e 'reservatórios' - combinadas através de operadores lógicos para capturar a intersecção entre esses temas. A seleção dos artigos seguiu critérios rigorosos de inclusão e exclusão, priorizando estudos que demonstraram aplicabilidade prática e inovação metodológica nas análises de assoreamento. Essa abordagem permitiu sintetizar os achados atuais e identificar lacunas no conhecimento, estabelecendo uma base sólida para futuras investigações no uso de RNAs para melhorar o entendimento e a gestão do assoreamento em reservatórios hídricos.

Importância das Redes Neurais Artificiais (RNA)

Importante ressaltar que apesar das redes neurais reais serem muito diferentes dos modelos artificiais, há um paralelo entre esses dois domínios. Modelos de sistemas nervosos biológicos, bem como do próprio cérebro humano, serviram de base para o desenvolvimento da estrutura das redes neurais artificiais. Os neurônios artificiais são muito semelhantes aos neurônios biológicos e são usados como componentes ou unidades de processamento de computador. Quando os neurônios biológicos são comparados aos neurônios das RNA, observa-se que os dendritos são responsáveis pelo recebimento e condução das informações vindas de outros neurônios ou do meio externo onde podem estar em contato. Um potencial de ativação é produzido e indicará se os impulsos nervosos serão ou não conduzidos para outros neurônios por meio do axônio. O corpo celular é encarregado de coletar e processar as informações enviadas pelos dendritos. A terminação dos axônios é ramificada e recebe a denominação de terminações sinápticas, que se conectam, mesmo que sem contato físico com os dendritos de outros neurônios. Esse contato que se encarrega de transferir os impulsos nervosos de um neurônio para outro é chamado de sinapse (Figura 1).

A primeira representação do funcionamento dos neurônios artificiais foi feita por Warren McCulloch e Walter Pitts (1943). Eles desenvolveram uma máquina inspirada no cérebro humano, usando funções lógicas e simplificadas para mostrar como os neurônios biológicos funcionavam (Figura 1). Um neurônio natural dispara quando recebe uma quantidade excessiva de impulsos que excede seu limiar (MCCULLOCH; PITTS, 1943 apud HAYKIN, 2001).

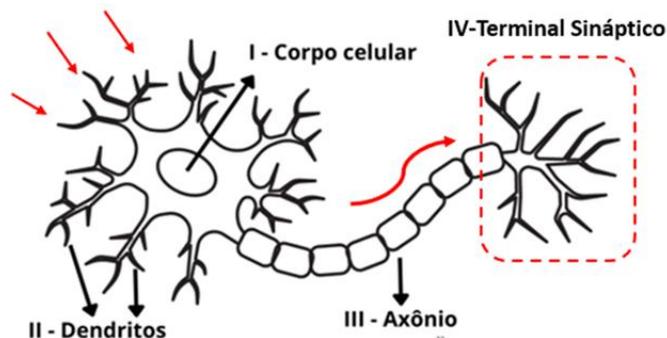


Figura 1: Representação simplificada do funcionamento do neurônio de McCulloch e Pitts (Adaptado de Braga et al., 2011).

Em 1949 o neuropsicólogo Donald Hebb propôs um esquema de aprendizado para atualizar as conexões neurais. De acordo com o autor os sistemas neurais biológicos não eram pré-programados com todo o conhecimento e habilidades que eles eventualmente possuem. Isso é um processo de aprendizado relacionado com as atividades neurais repetitivas correlacionadas modificando as conexões da rede para incorporar nova informação. Essa formulação gerou a Regra de aprendizado Hebbiano ou o Aprendizado Hebbiano (Haykin, 2001). Como ilustrado na figura 2, quando um axônio de um neurônio A está próximo o suficiente para excitar uma célula B e repetidamente ou persistentemente participa do disparo de B. Então ocorre um processo metabólico em uma das células, ou em ambas, de forma que a eficiência de A em contribuir para o disparo de B é aumentada. Isto é, se dois neurônios estão simultaneamente ativos, a conexão entre eles deve ser reforçada. (DONALD HEBB 1949 apud HAYKIN, 2001).

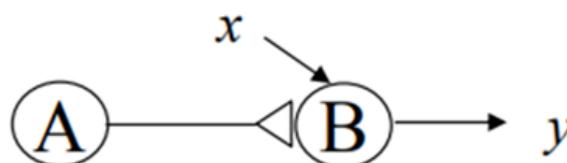


Figura 2: Representação do aprendizado Hebbiano (1949) apud Haykin (2001).



O modelo de neurônio simples de McCulloch e Pitts (1943) diz que n sinais de entrada são representados por dendritos (uma parte do neurônio natural), e recebem as denominações de x_1, x_2, \dots, x_n . Os pesos w_1, w_2, \dots, w_n , representam as conexões sinápticas do modelo biológico; dependendo da natureza das sinapses, seus valores podem ser negativos ou positivos. Um neurônio natural dispara quando recebe uma quantidade excessiva de impulsos que excede seu limiar. A soma ponderada das entradas é comparada com o limiar do neurônio; se ultrapassado, causa o "disparo" do neurônio, com saída 1 e zero em caso contrário. O sinal de saída (y), consiste das ativações do conjunto de neurônios anteriores, com apenas um terminal de saída, y (axônio). Contudo esse modelo não era capaz de realizar um requisito importante: o de aprendizado (MCCULLOCH; PITTS, 1943 apud HAYKIN, 2001) (Figura 3).

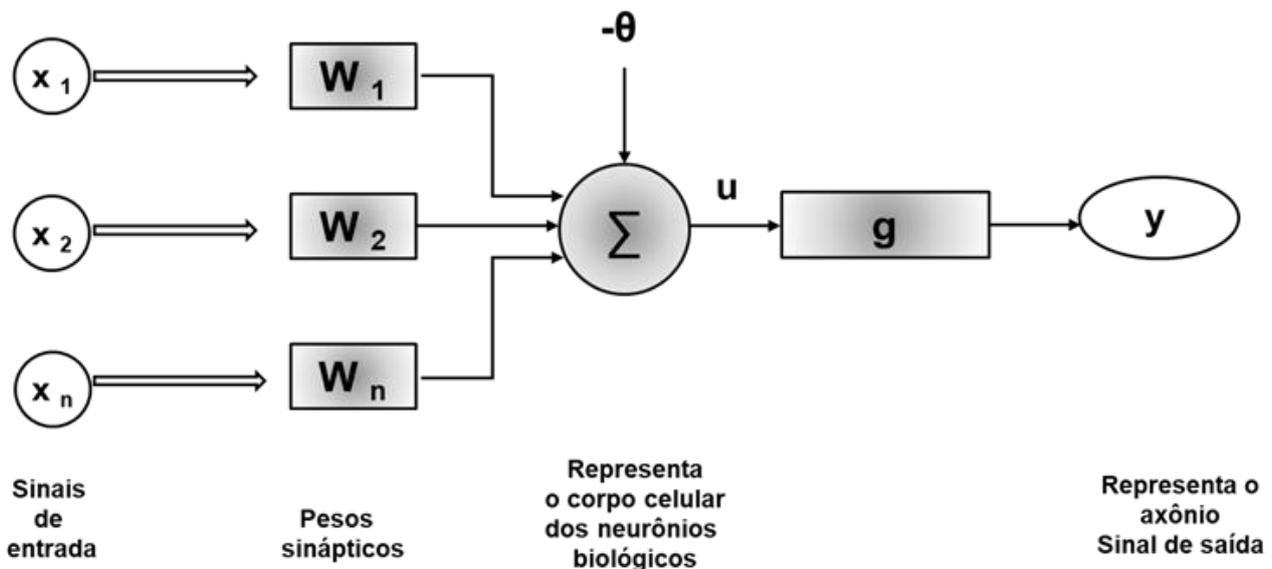


Figura 3: Modelo não linear de um neurônio. Σ (soma ponderada das entradas, $f(u)$ é a função de ativação e θ é o limiar de ativação do neurônio (In Haykin, 2001).

A primeira rede neural artificial projetada para resolver problemas práticos, foi proposta por Rosenblatt (1958), a qual foi chamada de Perceptron, e ela seguia o objetivo dos processos neurais naturais. A função de ativação é a função limiar, todas as entradas e saídas são representadas por zero ou um. Esta foi a primeira rede neural a usar um algoritmo de treinamento derivado da álgebra vetorial. Depois desse estudo, as outras redes neurais de uma única camada foram chamadas de Perceptron.

Resultado das atividades desse campo de pesquisa, logo em seguida surgiria o Adaline (Adaptive Linear Element) por Widrow e Hoff, (1960). A sua principal aplicação se destinava aos sistemas de chaveamento de circuitos telefônicos. Foi efetivamente uma das primeiras aplicações industriais das RNA. A grande contribuição científica do Adaline foi a introdução do algoritmo de aprendizado e treinamento denominado e conhecido como Regra Delta proposto por Widrow e Hoff (1960). Isso permitiu que o Perceptron fosse usado para as saídas no domínio dos números reais. As funções de ativação contínuas, lineares ou não lineares serviram como base para a solução de problemas mais complexos. A regra delta é baseada no treinamento do gradiente descendente para reduzir o valor da função de erro, que deve convergir para um valor mínimo.

Minsky e Papert (1969) analisou matematicamente que o modelo Perceptron, publicando o livro "Perceptrons". Os autores apresentavam as limitações significativas, da estrutura de apenas uma camada o que impedia de detectar problemas não-linearmente separáveis, como paridade, conectividade e simetria. Demonstraram que redes de uma camada não são capazes de solucionar problemas que não sejam linearmente separáveis. Como não acreditavam na possibilidade de se construir um método de treinamento para redes com mais de uma camada, eles concluíram que as redes neurais seriam sempre suscetíveis a essa limitação. O impacto dessa crítica foi tão grande que a comunidade científica abandonou a área das redes neurais artificiais por um bom tempo, com a exceção de alguns pesquisadores por exemplo Fukushima, Grossberg, Hopfield e Kohonen.

Para ilustrar os neurônios da RNA multicamadas é apresentado na figura 4, um exemplo de RNA com quatro camadas, três neurônios na primeira camada (neurônios intermediários) e dois neurônios na camada de saída. As camadas que não pertencem a camada de saída são chamadas de camadas escondidas. É importante ressaltar que além das camadas de entrada da rede, todas as conexões entre os neurônios são multiplicadas por pesos. O corpo do neurônio realiza a soma da multiplicação termo a termo entre os sinais de entrada (representando os impulsos elétricos captados pelos dendritos) e os pesos sinápticos que informam o quão relevante é cada uma das entradas no neurônio. O resultado da soma da multiplicação (mais um fator corretivo chamados bias ou vies) representa a saída do corpo celular artificial. Tal valor é apresentado a uma função de ativação (representando o axônio) responsável por limitar a saída do neurônio (terminações sinápticas), evitando o acréscimo progressivo dos valores de saída ao longo das camadas da rede. (Hema e Kant – 2017).

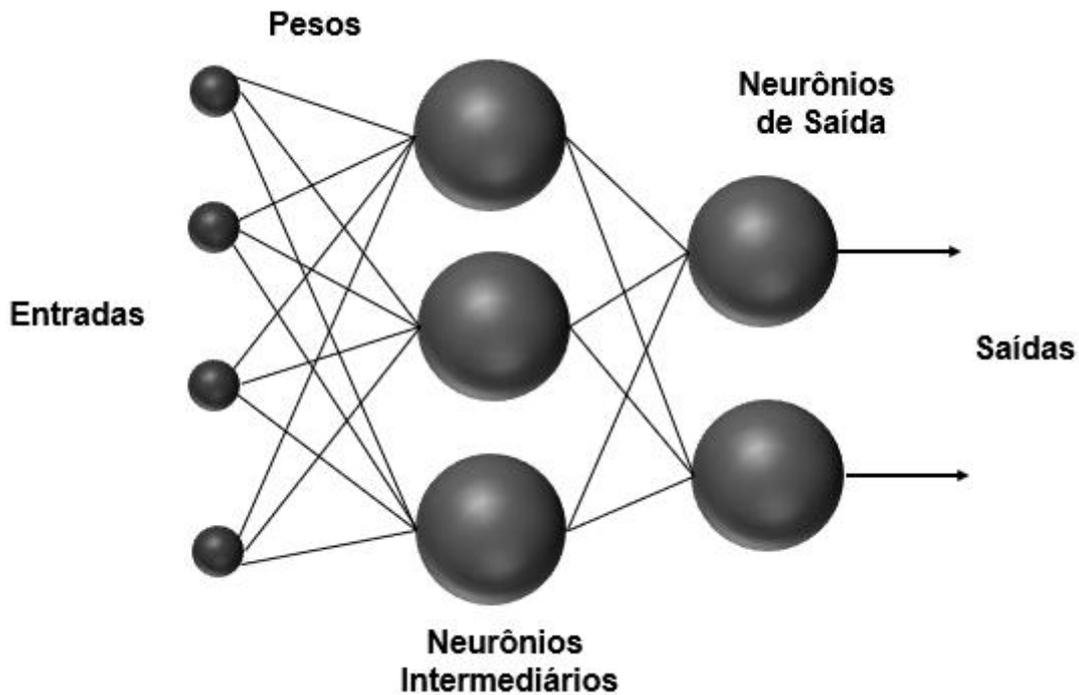


Figura 4: Representação esquemática da rede neural artificial (Adaptada de Haykin - 2001).

Contudo, o desenvolvimento do algoritmo de treinamento de retropropagação (*backpropagation*), proposto por Rumelhart, Hinton e Williams em 1986, precedido por propostas semelhantes ocorridas nos anos 70 e 80, mostrou que é possível treinar eficientemente redes com camadas intermediárias, resultando no modelo de Redes Neurais Artificiais mais utilizado atualmente, as redes MLP (*Multi Layer Perceptron*) ou PMC (Perceptron Multicamadas ou Perceptron de Múltiplas Camadas).

As redes neurais MLP ou PMC são caracterizadas por uma rede neural com uma ou mais camadas ocultas com um número indeterminado de neurônios. A camada oculta possui esse nome porque não é possível prever a saída desejada nas camadas intermediárias. Nessas redes, cada camada tem uma função específica (Figura 5). A camada de saída recebe os estímulos da camada intermediária e constrói o padrão que será a resposta. As camadas intermediárias funcionam como extratoras de características, seus pesos são uma codificação de características apresentadas nos padrões de entrada e permitem que a rede crie sua própria representação, mais rica e complexa, do problema (HAYKIN, 2001).

As redes MLP ou PMC possuem elevadas possibilidades de aplicações em diversos tipos de problemas, sendo aplicadas em várias áreas do conhecimento. A sua popularidade ocorreu no final da década de 1980, principalmente devido a publicação do livro *Parallel Distributed Processing* (RUMELHART et al., 1986). Esse livro descreveu o algoritmo de aprendizagem conhecido como *backpropagation*, que permitiu sua implementação no processo de treinamento dessas redes

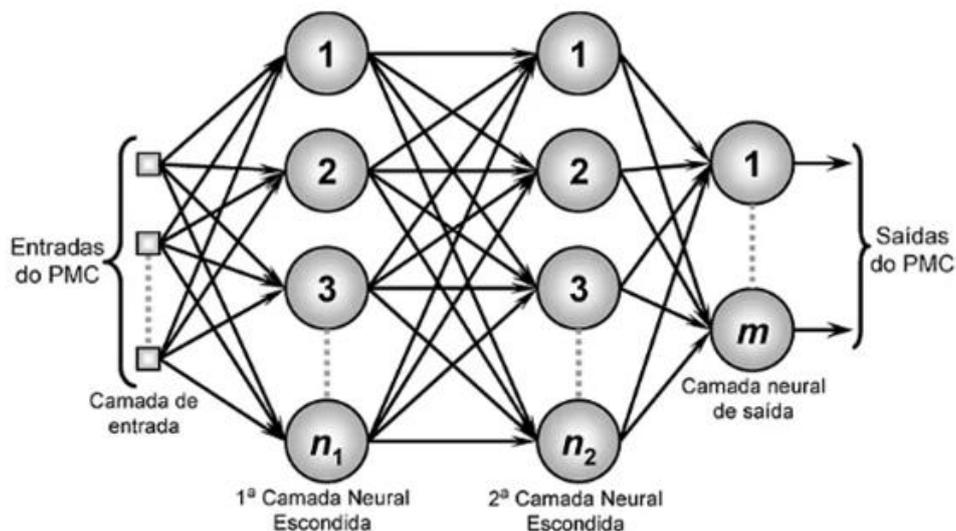


Figura 5: Representação esquemática de uma MLP ou PMC genérica (Adaptado de Haykin - 2001).



O treinamento de MLPs ou PMCs é permitido por uma generalização da Regra Delta apresentada por Rumelhart, et al. (1986) e conhecido como Retropropagativo de Rumelhart, et al. (1986). Esse usa a generalização da regra delta (WIDROW e HOFF, 1960) para treinar redes de múltiplas camadas calculando os erros produzidos pela última camada (saída) para cada neurônio de saída e posteriormente retropropagando esses erros para as camadas anteriores.

Diferente da rede Perctron simples e da rede Adaline, que a camada neural de saída pode ser formada por diversos neurônios, sendo que cada um destes representaria uma das saídas do processo a ser mapeado.

Quando possuem muitos graus de liberdade (neurônios internos) e são excessivamente treinadas, tendem a reproduzir exatamente as amostras de treinamento, mas perdem a capacidade de generalização para uso em amostras diferentes. Sugere-se então o uso da Validação Cruzada para resolver esse problema.

O estudo dos modelos de RNA com o avanço da tecnologia computacional vem ganhando muito interesse nos últimos anos porque estão próximos da função universal capazes de mapear qualquer função linear ou não linear. Eles têm sido usados em uma variedade de áreas de pesquisa e estão se tornando cada vez mais populares na estimativa e na classificação (SACHINDRA & KANAE, 2019).

Atualmente as RNAs são amplamente utilizadas para soluções de problemas complexos, onde o comportamento das variáveis não é rigorosamente conhecido. São utilizadas nas mais diversas áreas do conhecimento, principalmente em aplicações que envolvam reconhecimento de padrões, assim como, análise de séries temporais, diagnósticos médicos, previsões no mercado financeiro etc. Por esse motivo, possui a capacidade de aprender por meio de exemplos e de generalizar a informação aprendida, gerando um modelo não-linear, o que torna a sua aplicação na análise espacial bastante eficiente. O sucesso e a utilização das RNAs para modelar sistemas dinâmicos em vários campos da ciência e da engenharia, sugere que elas também possam ser.

Redes Neurais Artificiais (RNA) Aplicadas à Recursos Hídricos

Exemplos da aplicabilidade da RNA aplicados aofoi observado no estudo de Ali e Shahbaz (2020), onde os autores criaram 66 configurações diferentes de MLPs, utilizando uma RNA do MLP ou PMC, para prever a vazão diária. Cada uma delas passaram por treinamento, validação e teste para identificar a configuração ideal para previsão. Com o intuito de evitar o ajuste excessivo dos modelos, os dados de treinamento e o conjunto de dados de validação foram utilizados juntos. Como resultado, dentre todos os modelos, aquele que utilizou dados de entrada de precipitação dos quatro dias anteriores e fluxo diário do dia anterior apresentou a melhor representação. O modelo tinha uma arquitetura com 26 neurônios na camada de entrada, 52 neurônios na camada oculta e apenas um neurônio saindo.

Adongo, et al. (2021) desenvolveram dois modelos matemáticos utilizando regressão linear (RL) e redes neurais artificiais (RNA). Os parâmetros de entrada foram escolhidos com base na sua influência no processo de sedimentação do reservatório. Sendo esses: a precipitação anual, vazões anuais de água, eficiência anual da sedimentação e idade do reservatório. O parâmetro de saída, foi a previsão do volume anual dos sedimentos depositados para cada reservatório da Zona Ecológica da Savana da Guiné - Gana (Guinea Savannah Ecological Zone - GSEZ).

Para selecionar a arquitetura apropriada da RNA, os autores seguiram o procedimento de tentativa e erro de Jothiprakash & Garg (2009) e Salimi et al. (2013).

Os modelos revelaram que a retenção anual do volume de sedimentos aumenta à medida que todas as quatro variáveis independentes (parâmetros de entrada) aumentam. Os modelos matemáticos forneceram um meio simples e rápido de prever a perda anual de capacidade de armazenamento de água dos reservatórios da GESZ de Gana. Os autores utilizaram o algoritmo de *feed-forward* e retropropagação Perceptron Multicamada MLP. Com base nas previsões dos modelos, os resultados não mostraram diferença significativa entre eles e, portanto, todos os modelos desenvolvidos foram considerados eficientes com precisões acima de 76% sendo adequado para prever a sedimentação anual de reservatórios com características como as do GSEZ de Gana.

A otimização do estudo do gerenciamento de reservatórios foi realizada por Boudjerda et al (2022) usando uma Rede Neural de Programação Dinâmica. Incorporou-se uma regra de operação ideal desenvolvida para minimizar a lacuna entre as liberações de água e as demandas de irrigação. A barragem Fom El-Gherza, na Argélia, foi selecionada para validar o modelo de otimização proposto. O objetivo principal desse projeto foi o de determinar o valor ideal de liberação de água para os casos de operação quando não há estratégia, dragagem e ventilação. Os períodos de operação foram avaliados com base em registros históricos de atividades de dragagem realizadas em janeiro de 2005 a dezembro de 2008. Enquanto a ventilação era feita de janeiro de 2009 a dezembro de 2013. De acordo com os autores os critérios para a escolha das entradas do modelo foram: armazenamento real, fluxo e demanda; enquanto as saídas (resultados) foram as liberações ideais derivado da programação dinâmica. Este estudo demonstrou que RNAs podem ser eficazes e ser aplicada para otimizar as regras de operação do reservatório. Os pesquisadores recomendaram que em estudos futuros avaliassem as medidas de mitigação para sedimentação de reservatórios. Para isso, como base para o seu sucesso deveriam usar modelos para quantificar benefícios, tais como: rendimento firme ou economia de água para irrigação.

Vantagens e Desvantagens no Uso das Redes Neurais Artificiais

Uma das exigências no uso das RNAs é a necessidade de grandes conjuntos de dados de treinamento de alta qualidade para produzir resultados precisos. Isso pode ser um grande desafio no estudo do assoreamento, onde os dados podem ser limitados ou apresentar inconsistências. Com isso as RNAs são frequentemente consideradas como "*caixas-pretas*", ou seja, os processos internos de como elas chegam às suas conclusões não são facilmente compreensíveis. Isso pode dificultar a interpretação dos resultados e a identificação das variáveis mais influentes no processo de assoreamento.



É importante ressaltar que o aumento indiscriminado de neurônios e das camadas intermediárias não garantem uma generalização adequada das redes PMC em relação às amostras de diferentes subconjuntos de teste. Há um risco de uma suscetibilidade a *Overfitting* (sobreajuste ou superajuste), isto é, uma memorização excessiva em que a RNA acaba decorando as respostas frente aos estímulos introduzidos em suas entradas. Isso ocorre quando um modelo estatístico se ajusta exatamente aos seus dados de treinamento. Com isso, existe a possibilidade de que as RNAs se ajustem demais aos dados de treinamento específicos e, portanto, não generalizando bem para novos conjuntos de dados. Isso pode levar a previsões imprecisas, especialmente em cenários onde há uma grande variabilidade nos dados.

O desenvolvimento e treinamento de uma RNA podem ser complexos e exigir conhecimento especializado, além de recursos computacionais significativos.

Mas, uma das grandes vantagens do seu uso é a capacidade de aprendizado não linear. Isto ocorre porque elas têm a habilidade de aprender padrões complexos e não lineares nos dados, o que pode ser crucial ao lidar com as nuances do assoreamento em centrais elétricas, onde os fatores podem interagir de maneiras não triviais. Aliás, elas podem capturar relações multivariadas entre os diferentes parâmetros que afetam o assoreamento, como características hidráulicas, sedimentares e ambientais, permitindo uma modelagem mais abrangente e precisa.

Ademais, uma vez treinadas, podem ser adaptadas facilmente a novos conjuntos de dados ou a mudanças nas condições ambientais, o que é útil em um contexto dinâmico como o estudo do assoreamento. E finalmente, podem lidar eficientemente com grandes conjuntos de dados, o que é comum em estudos hidrológicos e ambientais, onde há uma quantidade considerável de variáveis a serem consideradas.

Perspectiva Futura Para o Uso das Redes Neurais Artificiais no Estudo do Assoreamento

O uso de Redes Neurais Artificiais (RNAs) no estudo do assoreamento de centrais elétricas é uma área de pesquisa promissora que pode oferecer várias perspectivas futuras. Aqui estão algumas direções potenciais para pesquisas nesse campo tais como: modelagem preditiva, otimização de operações, detecção de mudanças climáticas, integração de dados multifontes, análises de incertezas, aplicação de aprendizado por reforço e integração com tecnologias emergentes.

A modelagem preditiva as RNAs são capazes de desenvolver modelos preditivos mais precisos do comportamento do assoreamento em centrais elétricas. Esses modelos podem levar em conta uma variedade de variáveis, como características hidráulicas, sedimentológicas e ambientais, para prever taxas futuras de acúmulo de sedimentos. Na otimização de operações as RNAs ajudam no aperfeiçoamento das operações de manutenção e limpeza de centrais elétricas, fornecendo uma visão sobre os momentos ideais para realizar a limpeza dos sedimentos e minimizar os impactos no desempenho das centrais.

No que se refere a detecção de mudanças climáticas essas podem afetar significativamente os padrões de assoreamento em centrais elétricas. Sendo então capazes de analisar grandes conjuntos de dados ambientais e identificar tendências de longo prazo no assoreamento, permitindo uma melhor adaptação das centrais às mudanças climáticas.

No caso da integração de dados multifontes, as RNAs têm o potencial de integrar dados de várias fontes, como monitoramento remoto por satélite, sensores *in-situ* e modelagem hidrodinâmica, para fornecer uma compreensão mais abrangente e em tempo real do processo de assoreamento em centrais elétricas.

O assoreamento em centrais elétricas é influenciado por uma série de incertezas, incluindo variações sazonais, eventos extremos e erros de medição. Dessa forma, elas conseguem quantificar e mitigar essas incertezas, melhorando a confiabilidade dos modelos de previsão.

Na aplicação de aprendizado, os algoritmos são empregados para desenvolver estratégias adaptativas de gerenciamento de assoreamento em centrais elétricas. Essas estratégias podem aprender com a experiência passada e ajustar as ações futuras para otimizar o desempenho das centrais em condições variáveis.

Além disso, as RNAs há possibilidades de serem integradas com outras tecnologias emergentes, como Internet das Coisas (IoT) e armazenamento em nuvem. Dessa forma produz sistemas de monitoramento e controle mais avançados e eficientes para o gerenciamento do assoreamento em centrais elétricas. Criado por Kevin Ashton em 1999, o conceito em torno da Internet das Coisas consiste na interconexão de objetos, dispositivos e ativos para troca de informações por meio de uma rede.

Considerações Finais

Analisando a literatura em questão, observou-se que há uma carência muito grande relacionado a aplicabilidade das Redes Neurais Artificiais ao assoreamento de reservatórios. Poucos trabalhos foram encontrados para a área de vazão, inundações, transporte e muito poucos relativos ao assoreamento.

Por ser um modelo empírico tem sido amplamente aceito como forma potencialmente útil de se modelar sistemas não-lineares complexos com grande quantidade de dados. Esses modelos são particularmente úteis em situações nas quais as relações dos processos físicos ainda não são completamente compreendidas. A RNA pode ser interpretada como um esquema de processamento capaz de armazenar conhecimento baseado em aprendizagem (experiência). Sendo uma das propriedades mais importantes que é a habilidade de aprender, melhorar seu desempenho e disponibilizar este conhecimento para a aplicação em questão. O aprendizado ocorre quando a rede neural atinge uma solução generalizada para uma classe de problemas. Isso é feito através de um processo iterativo de ajustes aplicado a seus pesos.

Como qualquer técnica de ajuste de dados, as redes neurais também são avaliadas pela sua habilidade de ajustar os dados de treinamento e prever dados externos ao conjunto de treinamento. Geralmente, o objetivo de métodos estatísticos é identificar o efeito de cada variável na resposta de forma a justificar tendências de aumento ou diminuição nos componentes do modelo.



O seu uso no estudo do assoreamento de centrais elétricas oferece muitas vantagens em termos de capacidade de modelagem e flexibilidade, mas também apresenta desafios significativos, especialmente em relação à qualidade dos dados, interpretação dos resultados e necessidade de expertise técnica.

Finalmente, o uso de RNAs oferece uma ampla gama de oportunidades para avançar no estudo e gerenciamento do assoreamento de reservatórios em centrais elétricas, permitindo uma melhor compreensão dos processos envolvidos e a implementação de estratégias mais eficazes de mitigação e adaptação.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq e a Universidade de São Paulo (USP) pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

- Ali, S.; Shahbaz, M. 2020. Streamflow forecasting by modelling the rainfall–streamflow relationship using artificial neural networks. *Modelling Earth Systems and Environment*, v. 6, n. 3, p. 1645–1656.
- Adongo, T. A., Abagale, F. K., & Agyare, W. A. 2021. Modelling and forecasting reservoir sedimentation of irrigation dams in the Guinea Savannah Ecological Zone of Ghana. *Water Practice & Technology*, 16(4), 1355-1369.
- Ashton, Kevin. 1999. That internet of things. *RFID journal*, v. 22, n. 1, p. 1-7.
- Boudjerda, M., Touaibia, B., Mihoubi, M. K., Basson, G. R., & Vonkeman, J. K. 2022. Application of sediment management strategies to improve reservoir operation: a case study Foug El-Gherza Dam in Algeria. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19 (11), 10957-10972.
- Braga, A. P.; Carvalho, A. P. L.; Ludemir, T. B. 2011. *Redes Neurais Artificiais: Teoria e Aplicações*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC. E-book.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. 2020. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2030*. Ministério de Minas e Energia. Brasília: MME/EPE.
- Haykin, S. 2001. *Redes neurais: princípios e prática*. Tradução. Paulo Martins Engel. 2 ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 900p. ISBN. 85-7307-718-2.
- Jothiprakash, V. & Garg, V. 2009. Reservoir sedimentation estimation using artificial neural network. *Journal of Hydrologic Engineering* 14(9), 1035–1040.
- Mcculloch, W. S.; Pitts, W. 1943. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of mathematical biophysics*, [S. l.], v. 5, p. 115–133. In: Haykin, S. 2001. *Redes neurais: princípios e prática*. Tradução. Paulo Martins Engel. 2 ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 900p.
- Minsky, M.; Papert, S. 1969. *Perceptrons*. Cambridge, MA: MIT Press. In HAYKIN, S. *Redes neurais: princípios e prática*. 2 ed. Porto Alegre. Bookman Editora, 900p. 2001. ISBN. 85-7307-718-2.
- Niu, W. J., Feng, Z. K., Feng, B. F., Min, Y. W., Cheng, C. T., & Zhou, J. Z. 2019. Comparison of multiple linear regression, artificial neural network, extreme learning machine, and support vector machine in deriving operation rule of hydropower reservoir. *Water*, v. 11, n. 1, p. 88.
- Rumelhart, D. E.; Hinton, G. E.; Williams, R. J. 1986. Learning representations by back-propagating errors. In *Parallel Distributed Processing*, v. 1, chapter 8. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA.
- Rosenblatt, F. 1958. The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Review*, v. 65, n. 6, p. 386–408.
- Sachindra, D. A.; Kanae, S. 2019. Machine learning for downscaling: the use of parallel multiple populations in genetic programming. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, v. 33, n. 8-9, p. 1497-1533.
- Salimi, M., Hassanzadeh, Y., Daneshfaraz, R. 2013 Sedimentation estimation study using artificial neural network for Karaj dam reservoir in Iran. *Journal of Basic and Applied Scientific Research* 3(8), 185–193.
- Tundisi, J.G. 1999. *Limnologia no século XXI: perspectivas e desafios*. Conferência de abertura do VII Congresso Brasileiro de Limnologia. Instituto Internacional de Ecologia.
- Widrow, B.; Hoff, M. E. 2001. Adaptive switching circuits. *Ire wescon convention record*, v. 8, n. 4, p. 96–104, 1960. In HAYKIN, S. *Redes neurais: princípios e prática*. Tradução. Paulo Martins Engel. 2 ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 900p. 2001.



INTERVENÇÕES DE ENGENHARIA NATURAL PARA CONTROLE DE PROCESSOS EROSIVOS EM RESERVATÓRIOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS

**1Rita dos Santos Sousa, 2Junior Joel Dewes, 3Mitieli de Cristo Ivo,
4Mariana Sangoi Kupke, 5Fabrício Jaques Sutili**

1 Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Laboratório de Engenharia Natural, e-mail: ritasousa.ufsm@gmail.com; 2 Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Laboratório de Engenharia Natural, e-mail: junior.dewes@acad.ufsm.br; 3 Universidade Federal de Santa Maria, Curso de Engenharia Florestal, Laboratório de Engenharia Natural, e-mail: mitieli.cristo@acad.ufsm.br; 4 Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Laboratório de Engenharia Natural, e-mail: mariana.kupke@acad.ufsm.br, 5 Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Ciências Florestais, e-mail: sutili.fabricio@ufsm.br

Palavras-chave: Soluções Baseadas na Natureza; Recuperação de Áreas Degradadas; Assoreamento de reservatórios

Resumo

Atualmente, seja em contexto brasileiro ou mundial, existe um aumento com a preocupação da preservação de recursos naturais, principalmente em áreas de maior fragilidade ambiental, como as áreas no entorno de cursos de água. Fatores como a suscetibilidade natural dos solos à erosão, altos níveis pluviométricos e relevo ondulado influenciam fortemente a dinâmica dos processos erosivos. Particularmente os reservatórios de água são muito susceptíveis à ocorrência de processos erosivos. Essa problemática, recorrente a nível mundial é mais intensificada em países de clima tropical e subtropical, como o Brasil, principalmente devido a fatores como precipitação elevada e presença de solos profundos. A combinação destes fatores favorece a ocorrência de erosões nas margens de reservatórios de água no Brasil. Para mitigar e controlar os processos erosivos em margens de reservatórios devem ser realizadas intervenções nos trechos classificados como prioritários em atividades de monitoramento. No entanto, o controle e mitigação dessas erosões ainda é muito incipiente, principalmente devido aos elevados custos das obras. Tradicionalmente esse controle é realizado com técnicas de engenharia como gabiões, enrocamentos, concretagem, geocélulas, solo-cimento, entre outras, que têm altos custos de execução e manutenção. Além disso, estas técnicas apresentam alto impacto ambiental e não valorizam as características ecológicas e ambientais do local de intervenção. Desta forma, a procura por soluções técnicas sustentáveis, de baixo impacto ambiental e viáveis do ponto de vista econômico ganha destaque nos últimos anos num contexto de promoção da economia verde, sustentabilidade e das soluções baseadas na natureza. As técnicas de Engenharia Natural mostram-se como uma alternativa viável às técnicas tradicionais, uma vez que, além de levarem em consideração critérios técnicos no dimensionamento das obras, também valorizam os fatores ecológicos e ambientais. A Engenharia Natural utiliza principalmente materiais construtivos vivos (sementes, plantas, partes de plantas, etc.) que podem, ou não, ser combinados com materiais inertes. As técnicas de Engenharia Natural podem ser aplicadas na solução de problemas de instabilidade geotécnica e hidráulica, controle de processos erosivos superficiais e simultaneamente projetar ecossistemas em equilíbrio dinâmico. O objetivo deste trabalho é apresentar uma intervenção de Engenharia Natural executada para estabilização e controle de processos erosivos num trecho do reservatório da Usina Hidrelétrica de Itá (UHE Itá).

A área de estudo está localizada no reservatório da UHE Itá, no rio Uruguai entre os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. O local apresenta pequenos deslizamentos de solo e recuo da margem causada pela perda de solo do talude superior, bem como aprofundamento do talude inferior, denotando perda e transporte de solo para dentro do reservatório causando assoreamento. O trecho de intervenção tem comprimento total de 169,0 e foi dividido em dois subtrechos: o subtrecho 1 tem 57 m e foram especificadas as técnicas de solo envolvido vegetado, paliçadas de madeira vegetadas, plantio de mudas herbáceas, arbustivas e arbóreas; e o subtrecho 2 tem 112 m de intervenção e foram especificadas as técnicas de parede de biorretentores de coco vegetada, paliçadas de madeira vegetadas, plantio de mudas herbáceas, arbustivas e arbóreas. Além disso, foi previsto em projeto o reafixamento do talude superior e a aplicação de calcário previamente à execução das técnicas nos dois subtrechos. Todas as espécies vegetais especificadas são autóctones da região do Alto Rio Uruguai e foram observadas recolonizando naturalmente áreas da UHE Itá. A equipe do Laboratório de Engenharia Natural da UFSM elaborou o projeto em junho/2020, em junho/2021 foi iniciada a execução da obra e a sua conclusão ocorreu em agosto/2021. Nos meses subsequentes foi realizado o monitoramento das técnicas, observando-se que as mudas apresentaram excelentes taxas de sobrevivência e crescimento, as estruturas não sofreram movimentações ou recalques e não foram detectados processos erosivos. As técnicas de Engenharia Natural mostraram-se tecnicamente eficientes para mitigar os processos erosivos nas margens do reservatório da UHE Itá. Além dos benefícios técnicos, as soluções implementadas trouxeram melhorias nas funções ecológicas e ambientais, com restabelecimento de vegetação nativa e aumento da biodiversidade florística e faunística. É importante destacar que as técnicas utilizadas na UHE Itá proporcionaram soluções inovadoras e tecnicamente viáveis para projetos de recuperação em áreas do entorno de reservatórios de usinas hidrelétricas, podendo ser utilizadas independente ou complementarmente às técnicas tradicionais de engenharia.



Introdução

Os reservatórios de água, sejam naturais ou artificiais, são muito susceptíveis à ocorrência de processos erosivos marginais. Essa problemática é recorrente a nível mundial, e é ainda mais intensificada em países de clima tropical e subtropical, como o Brasil, devido à distribuição desigual de precipitação, com concentração de grandes volumes de chuva em poucos meses do ano e presença de solos com perfis bem desenvolvidos e profundos. A combinação destes fatores favorece a ocorrência de processos erosivos nas margens de reservatórios de água no Brasil. Em reservatórios artificiais, independentemente das suas dimensões, ocorrem dois processos: erosão nas margens e sedimentação no fundo (MACIEL FILHO; NUMMER, 2014).

Os principais fatores deflagradores das erosões nas margens de reservatórios são a ação das ondas e a oscilação do nível de operação do reservatório, que ocorre desde uma escala temporal diária até anual (DEWES, 2023). A ação contínua das ondas em taludes de reservatórios resulta em dois efeitos principais (ASDSO, 2014). O primeiro efeito é o beaching, onde ocorre erosão do solo e posteriormente transporte e deposição na base do talude, com formação de uma zona bastante plana denominada plataforma de abrasão e de sedimentação com um talude ou escarpa muito inclinada a montante (MACIEL FILHO; NUMMER, 2014). Estas plataformas podem apresentar grandes dimensões e ter ocorrência de movimentos de massa. O segundo efeito causa a degradação rápida da proteção que reveste os taludes. Desta forma, estas estruturas de proteção devem ser frequentemente monitoradas e reparadas ou substituídas se apresentarem danos (ASDSO, 2014).

Outro fator de especial relevância, além da ação das ondas nas margens, é a influência da oscilação anual do reservatório. As ondas solicitam e erodem os taludes na cota em que se encontra momentaneamente o nível da água. À medida que o nível oscila ao longo do ano, os processos erosivos acompanham essa oscilação e vão erodindo diferentes trechos do talude localizados entre a cota máxima e mínima de operação do reservatório. Quanto maior for o número de oscilações durante o ano, maior será o número de vezes que as ondas atingirão diferentes cotas e maior tenderá a ser o desgaste dos taludes (DEWES, 2023). Diferentes taxas de erosão também podem ocorrer em diferentes cotas no talude, a depender do tempo de permanência do nível da água em determinada posição (BAO et al., 2015; HAMPTON et al., 2004; SU et al., 2017), bem como da suscetibilidade do material à erosão e das características geométricas do talude.

Portanto, as margens de reservatórios são muito susceptíveis à ocorrência de processos erosivos que resultam em perda de estabilidade.

A perda de área referente à faixa de vegetação ciliar (Área de Preservação Permanente – APP) e de proprietários lindeiros (credores de possíveis indenizações) causa perdas ambientais e econômicas de difícil quantificação considerando os inúmeros fatores envolvidos. Outro fator importante é a grande pressão antrópica nas áreas marginais de reservatórios, nomeadamente atividades agropecuárias, empreendimentos e espaços de lazer. Todos estes fatores associados contribuem para a diminuição da vida útil do aproveitamento hidrelétrico devido ao assoreamento, perda de cobertura vegetal autóctone, diminuição da biodiversidade, alteração da qualidade da água, eutrofização, entre outros (DEWES, 2023; DEWES et al., 2021).

Para mitigar os processos erosivos e minimizar as perdas descrita, o empreendedor responsável pelo reservatório é obrigado a intervir tecnicamente para o cumprimento do Plano Ambiental de Conservação e Uso do Entorno do Reservatório (PACUERA), além de manter uma faixa de mata ciliar que, atualmente, é de 30 m, segundo o Novo Código Florestal Brasileiro (BRASIL, 2012).

Desta forma, devem ser realizadas intervenções para mitigação e controle de processos erosivos em margens de reservatórios, principalmente nos trechos classificados como prioritários em atividades de monitoramento de erosões no reservatório. Apesar disso, o controle e mitigação dessas erosões ainda é muito incipiente, principalmente devido aos elevados custos das obras. No entanto, quando esse controle é realizado, este tradicionalmente é executado com técnicas tradicionais de engenharia como gabiões, enrocamentos, concretagem, geocélulas, solo-cimentos, geotêxteis, entre outras, que têm altos custos de execução e manutenção (COPPIN; RICHARDS, 2007; SALES, 2017; UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA - NRCS), 2014). Estas técnicas apresentam alto impacto ambiental, uma vez que não valorizam as características ecológicas e ambientais do local de intervenção (DEWES; SOUSA; SUTILI, 2018). Além disso, a procura por soluções técnicas sustentáveis, de baixo impacto ambiental e viáveis do ponto de vista econômico ganha destaque nos últimos anos num contexto de promoção da economia verde, sustentabilidade e das soluções baseadas na natureza.

As técnicas de Engenharia Natural mostram-se como uma alternativa viável às técnicas tradicionais, uma vez que, além de levarem em consideração critérios técnicos no dimensionamento das obras, também valorizam os fatores ecológicos e ambientais (COPPIN; RICHARDS, 2007; SOUSA; SUTILI, 2017). A Engenharia Natural utiliza principalmente materiais construtivos vivos (sementes, plantas, partes de plantas, etc.) que podem, ou não, ser combinados com materiais inertes. Pode ser utilizada como substituto, mas principalmente como complemento útil e por vezes necessário às técnicas clássicas de Engenharia Civil (SCHIECHTL, 1980). As técnicas de Engenharia Natural podem ser aplicadas na solução de problemas de instabilidade geotécnica e hidráulica, controle de processos erosivos superficiais. Para isso, as soluções envolvem o projeto de ecossistemas em equilíbrio dinâmico (SOUSA, 2015; SOUSA et al., 2020; SOUSA; SUTILI, 2017). São utilizados os conhecimentos biológicos das plantas que lhes conferem propriedades biotécnicas para o uso nas intervenções de recuperação de áreas degradadas (COPPIN; RICHARDS, 2007; DURLO; SUTILI, 2014; MORGAN; RICKSON, 1995). Desta forma, a seleção de plantas para as intervenções de Engenharia Natural é realizada com base em critérios técnicos, além de ecológicos e paisagísticos (SOUSA, 2015). São técnicas que apresentam baixo impacto ambiental (DE ANTONIS; MOLINARI, 2007; VENTI et al., 2003), que apresentam esquemas construtivos mais flexíveis e permeáveis, que podem ser mais facilmente integrados na natureza, não sofrendo recalques e movimentações de solo, e também não alteram a condutividade hidráulica do solo (SOUSA, 2015). Além disso, a Engenharia Natural apresenta soluções construtivas mais econômicas que as soluções



tradicionais (BONATTI; MARONGIU, 2013; FERNANDES; FREITAS, 2011; SCHIECHTL; STERN, 1996; STUDER; ZEH, 2014). Análises realizadas no Brasil demonstram que intervenções com técnicas de Engenharia Natural podem ter um custo de aproximadamente 50% inferior às intervenções clássicas (SOUSA et al., 2021; SOUSA; DEWES; SUTILI, 2018). Esta redução de custos de execução está relacionada com o fato que, normalmente, obras de Engenharia Natural exigem menos equipamentos pesados para trabalhos de terraplanagem, e como resultado disso o seu custo é mais baixo e apresentam impactos ambientais menores que obras convencionais (LEWIS, 2000). Além disso, a utilização de materiais naturais, como por exemplo, solo, pedra, madeira e plantas, que normalmente estão disponíveis no local de intervenção reduz custos de execução (BLOEMER et al., 2015; SOTIR; GRAY, 1992; VENTI et al., 2003).

O objetivo deste trabalho é apresentar uma intervenção de Engenharia Natural executada para estabilização e controle de processos erosivos num trecho do reservatório da Usina Hidrelétrica de Itá (UHE Itá).

Material e Métodos

Descrição da área de estudo

A área de estudo está localizada no reservatório da Usina Hidrelétrica de Itá (UHE Itá). A usina encontra-se localizada no sul do Brasil, especificamente no rio Uruguai entre os estados de Santa Catarina (SC) e Rio Grande do Sul (RS). O reservatório da usina tem 141 km² de área superficial e 760 km de perímetro quando o nível se encontra na cota máxima (Figura 1).

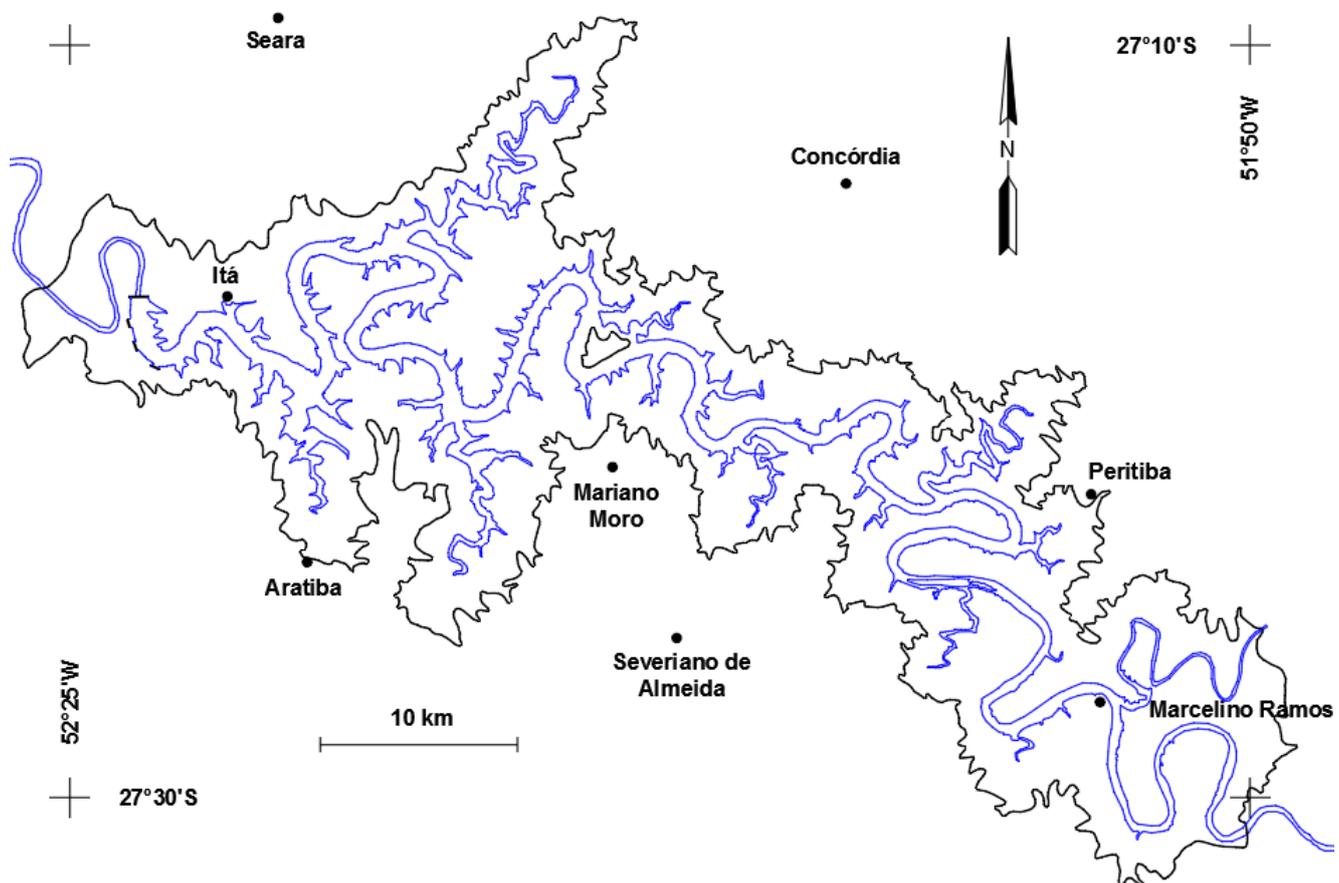


Figura 1: Perímetro do reservatório da UHE Itá (azul) e área diretamente afetada (preto) (DEWES, 2019).

Este perímetro é resultado do relevo acidentado e recortado da região, formando grandes braços adjacentes e inúmeras extensões laterais ao corpo principal do reservatório. O nível máximo normal de operação do reservatório situa-se a 370 m acima do nível do mar. A amplitude de oscilação do nível da água é de aproximadamente 6 m, com nível mínimo de operação situado a 364 m acima do nível do mar (DEWES, 2023).

A análise de estabilidade das encostas realizada durante os estudos de viabilidade do empreendimento mostrou que a espessura do solo ao longo do reservatório é reduzida, variando geralmente até no máximo 10 m de profundidade, embora possa atingir até 15 m (CNEC, 1989). Os fatores de segurança obtidos para diferentes pontos no entorno do reservatório classificam 30% das encostas como estáveis ($\alpha < 15^\circ$); 30% como passíveis de apresentar instabilidades ($15^\circ \leq \alpha < 20^\circ$) e 40% como instáveis ou potencialmente instáveis ($\alpha > 20^\circ$).

Os solos comumente encontrados são de constituição argilosa de baixa permeabilidade, que apresentam com frequência blocos de rocha imersos no perfil morfológico (DEWES, 2023).

Segundo a classificação de Köppen, a área de estudo insere-se no clima subtropical do tipo Cfa, temperado, chuvoso, de ambiente úmido com grandes variações nas temperaturas médias ao longo do ano. A temperatura média anual é superior a 18°C e a temperatura média do mês mais quente (Janeiro) supera os 22°C. O mês mais frio (Julho) apresenta a média na faixa de 3°C - 18°C. A precipitação média anual permanece entre 1600 mm e 1900 mm (ALVARES et al., 2013).

O trecho de intervenção tem 169 m de extensão, apresenta talude superior com inclinação variável entre 38° e 60° (média de $46,8^\circ \pm 9,3^\circ$) e altura variável entre 0,8 m e 3,5 m (média de $1,9 \text{ m} \pm 1,2 \text{ m}$). O talude inferior apresenta inclinação média de $7,5^\circ \pm 0,9^\circ$, sendo a inclinação máxima de 9° e a mínima de 7°. O trecho de intervenção (Figura 2) foi monitorado quanto à presença de processos erosivos, tendo duas seções de monitoramento topográfico instaladas. Verificou-se no local que ocorre pequenos deslizamentos de solo e recuo da margem causada pela perda de solo do talude superior, bem como aprofundamento do talude inferior, denotando perda e transporte de solo para dentro do reservatório causando assoreamento do mesmo.

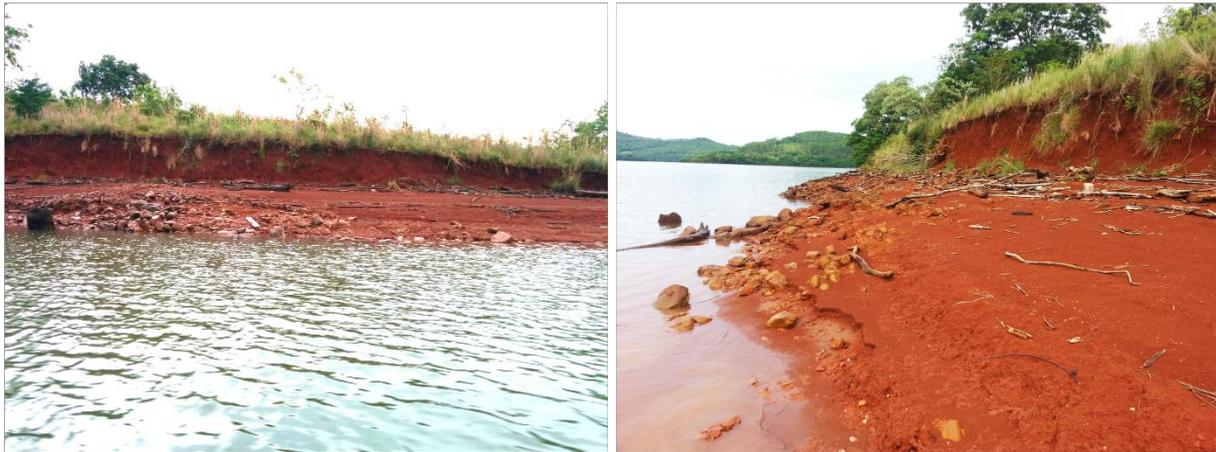


Figura 2: Condições do trecho de intervenção com ocorrência de processos erosivos. Fotografias: Rita SOUSA, 2017 e Junior DEWES, 2018 (arquivo pessoal).

No trecho de estudo não existem plantas na área de influência da oscilação do nível de operação do reservatório. Isso se dá pela ação constante das ondas que não permitem a fixação e o desenvolvimento das plantas, uma vez que promovem a remoção contínua de solo. Esta condição pode ser observada na Figura 2.

Descrição das técnicas de intervenção

O trecho de intervenção apresenta um comprimento total de com 169,0 m e foi dividido em dois subtrechos dividido às suas características geométricas. O subtrecho 1 tem 57 m e foram especificadas as seguintes técnicas de Engenharia Natural: solo envelopado vegetado, paliçadas de madeira vegetadas, plantio de mudas herbáceas, arbustivas e arbóreas (Figura 3).

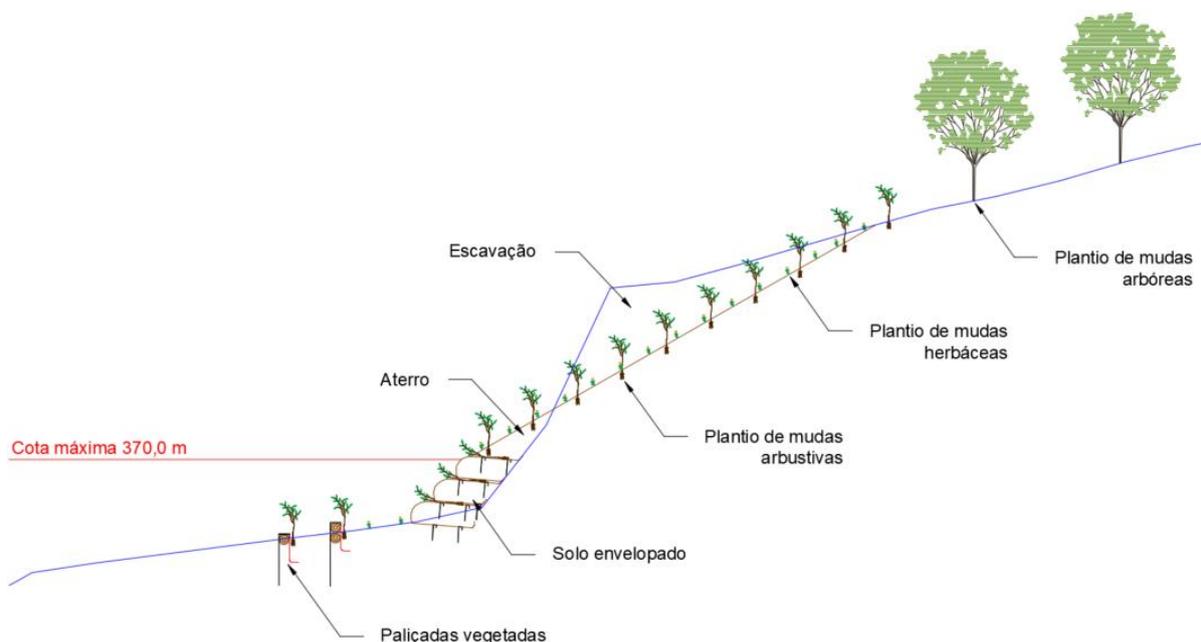


Figura 3: Técnicas de Engenharia Natural projetadas para o subtrecho 1.

O subtrecho 2 tem 112 m de intervenção e foram especificadas as seguintes técnicas: parede de biorretentores de coco vegetada, paliçadas de madeira vegetadas, plantio de mudas herbáceas, arbustivas e arbóreas (Figura 4).

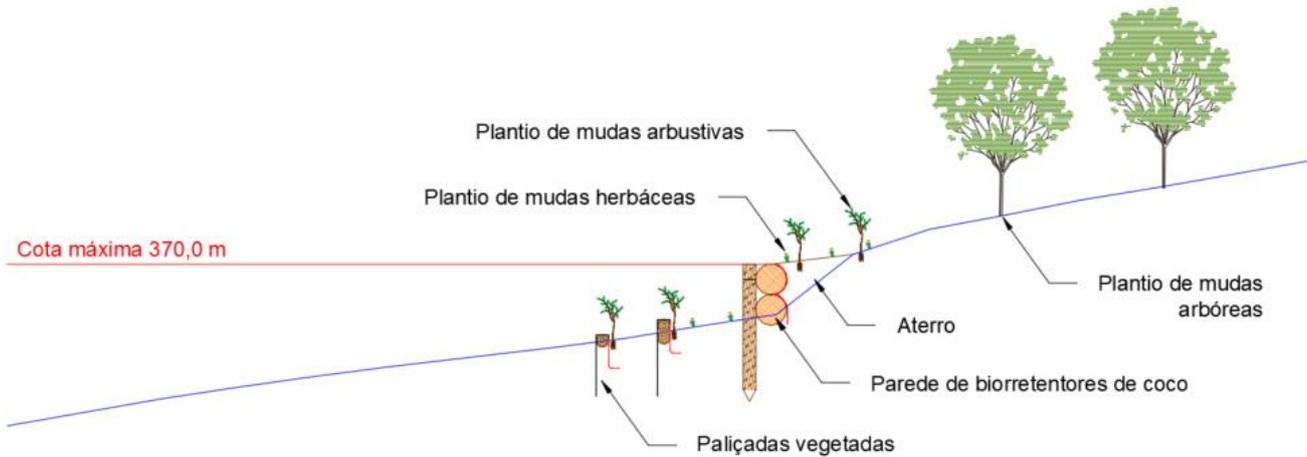


Figura 4: Técnicas de Engenharia Natural projetadas para o subtrecho 2.

Nos dois subtrechos foi previsto em projeto o reafeiçoamento do talude superior e a aplicação de calcário previamente à execução das técnicas.

O solo envelopado e a parede de biorretentores de coco visam proteger e estabilizar a base do talude superior dos processos erosivos provocados pela ação das ondas e oscilações do nível de água do reservatório. Desta forma, as estruturas funcionam barreiras físicas vivas que evitam a progressão do processo erosivo e conseqüentemente o recuo da margem e a perda de área de APP. O solo envelopado consiste na sobreposição de várias camadas de solo envolvido ou “envelopado” por um geotêxtil, e com mudas dispostas entre essas camadas. A parede de biorretentores de coco consiste na aplicação de dois biorretentores de fibra 100% coco sobrepostos e aplicados longitudinalmente.

As paliçadas de madeira atuam como elemento de proteção contra a ação das ondas e visam reter os sedimentos transportados por erosão superficial do terreno natural e do talude superior e consiste na aplicação longitudinal de troncos de madeira combinados com geotêxtil.

Todas as técnicas devem ser combinadas com a aplicação de mudas arbustivas, o que aumenta a sua ação estabilizante à medida que o sistema radicular das plantas se desenvolve.

O plantio de mudas de espécies herbáceas e arbustivas foi executado de modo a cobrir e proteger superficialmente o solo exposto decorrente de reafeiçoamentos de taludes em ambos os trechos intervencionados. Já o plantio de mudas arbóreas visa promover o aumento da biodiversidade da faixa ciliar através do enriquecimento com espécies florestais autóctones.

As espécies utilizadas nas intervenções foram produzidas no Horto Botânico da Usina Hidrelétrica Itá. Todas as espécies especificadas são autóctones da região do Alto Rio Uruguai e foram observadas recolonizando naturalmente áreas da UHE Itá (nas margens do reservatório e a jusante do barramento principal). Desta forma foram utilizadas as espécies arbustivas *Phyllanthus sellowianus* (sarandi-branco), *Gymnanthes schottiana* (sarandi-vermelho), *Mimosa pigra* (malícia-de-boi), *Sesbania virgata* (cambaí-amarelo) e *Calliandra brevipes* (topete-de-cardeal); e as espécies herbáceas *Sphagneticola trilobata* (mal-me-quer) e *Arachis repens* (grama-amendoim). Também foram utilizadas as seguintes espécies arbóreas: *Bauhinia forficata* (pata-de-vaca), *Eugenia involucrata* (cerejeira-do-mato), *Eugenia uniflora* (pitangueira), *Inga marginata* (ingá-feijão), *Inga vera* (ingá-banana), *Psidium cattleianum* (araçá) e *Schinus terebinthifolius* (aroeira-vermelha).

Resultados e Discussão

A equipe do Laboratório de Engenharia Natural (LabEN) da UFSM elaborou um projeto durante o mês de junho de 2020 para tratamento de trecho de margem do reservatório da UHE Itá com 169,0 m. No início de 2021, o empreendedor responsável pela operação da UHE Itá fez a contratação da empresa executante e em junho de 2021 foi iniciada a execução da obra e a sua conclusão ocorreu em agosto de 2021, com tempo de duração de aproximadamente 2 meses.

As Figuras 5 e 6 apresentam a evolução dos subtrechos 1 e 2, respectivamente, considerando a situação após a obra em setembro de 2021 até dezembro de 2022, aproximadamente 16 meses após a sua execução.

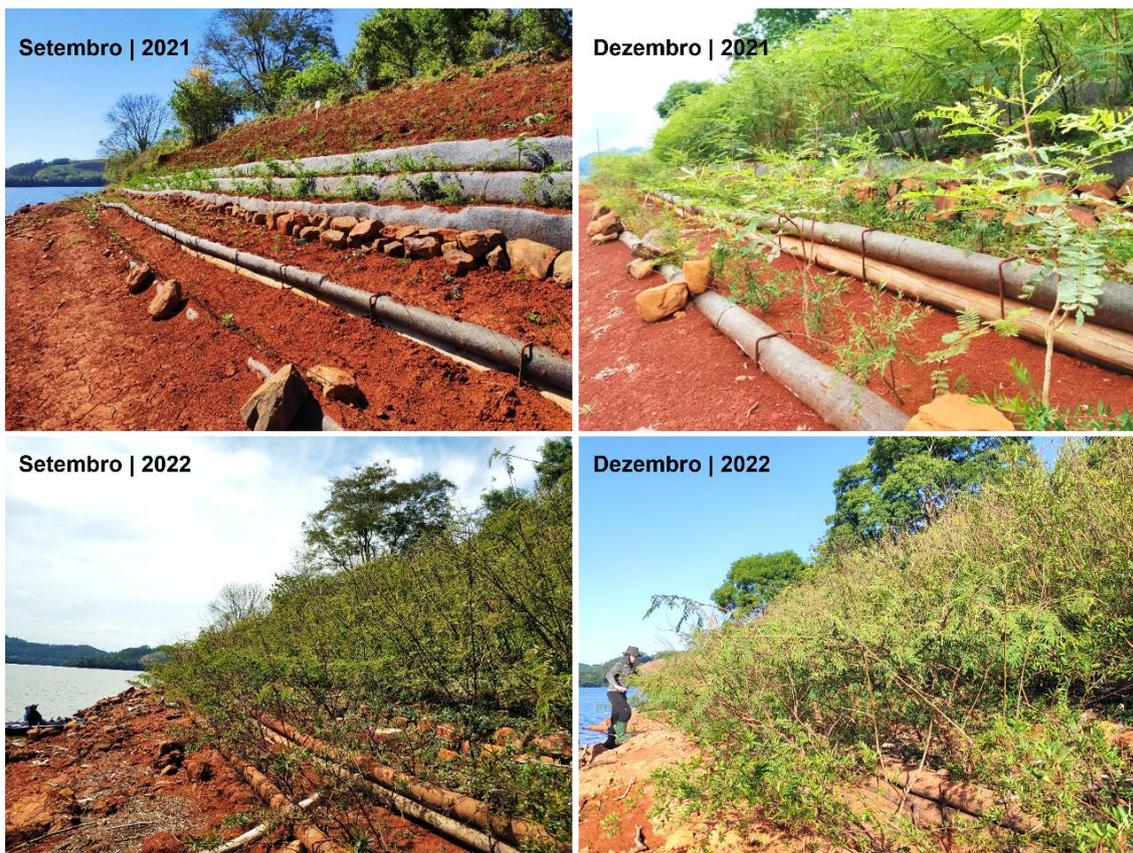


Figura 5: Evolução das técnicas de Engenharia Natural constituídas por solo envelopado vegetado e paliçadas combinadas com mudas no subtrecho 1 entre 2021 e 2022. Fotografias: Rita SOUSA e Junior DEWES, 2021 e 2022.

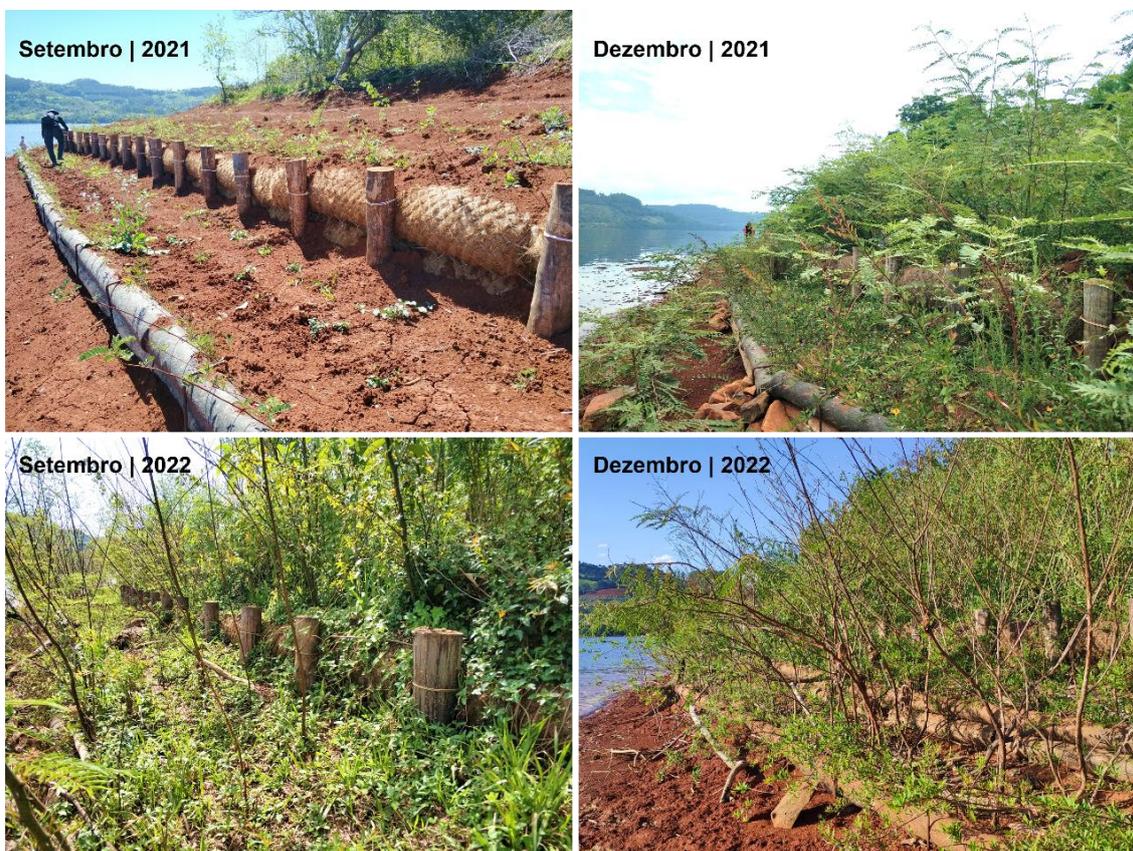


Figura 6: Evolução das técnicas de Engenharia Natural constituídas por parede de biorretentores e paliçadas combinadas com mudas no subtrecho 2 entre 2021 e 2022. Fotografias: Rita SOUSA e Junior DEWES, 2021 e 2022.



Imediatamente após a execução das intervenções foi realizada uma vistoria para verificação da conformidade executiva das técnicas. Verificou-se que as técnicas de Engenharia Natural foram bem executadas e os materiais construtivos apresentaram as especificações determinadas em projeto. Nos meses subsequentes foi realizado o monitoramento visual das técnicas. Verificou-se que as mudas herbáceas, arbustivas e arbóreas apresentaram excelentes taxas de sobrevivência e crescimento conforme se pode observar nas Figuras 5 e 6 e as estruturas não sofreram movimentações ou recalques. Também não foram detectados processos erosivos.

Portanto, as técnicas de Engenharia Natural mostraram-se tecnicamente eficientes para mitigar os processos erosivos nas margens do reservatório da UHE Itá. Além dos benefícios técnicos, as soluções implementadas trouxeram melhorias nas funções ecológicas e ambientais, com restabelecimento de vegetação nativa e aumento da biodiversidade florística e faunística. Uma vez que as intervenções de Engenharia Natural têm eficiência técnica crescente com o passar do tempo, espera-se que as mesmas continuem a atender os critérios para as quais foram projetadas.

Considerações Finais

A utilização de técnicas de Engenharia Natural em reservatórios visa mitigar os processos erosivos nas margens, que contribuem para o assoreamento e diminuição da vida útil do reservatório. As soluções especificadas visam o revestimento e proteção das margens com espécies reófitas nativas que antes da construção da UHE Itá ocorriam naturalmente nos taludes fluviais do Rio Uruguai.

A reintrodução da flora original é essencial uma vez que favorece a colonização espontânea das margens do reservatório, bem como a jusante da usina, devido à criação de novas áreas fonte de propágulos. A combinação de materiais inertes com as plantas visa proteger e fornecer suporte estrutural para o estabelecimento e desenvolvimento das mesmas. Sem esse suporte inicial, essas novas áreas não conseguiriam estabelecer-se devido à ação adversa e constante das ondas e do regime de operação do reservatório.

Por fim, é importante destacar que as técnicas de Engenharia Natural utilizadas na UHE Itá proporcionaram soluções inovadoras e tecnicamente viáveis para projetos de recuperação em áreas do entorno de reservatórios de usinas hidrelétricas, podendo ser utilizadas independente ou complementarmente às técnicas tradicionais de engenharia. Além disso, da sua utilização advêm vantagens ecológicas, econômicas, ambientais e estéticas.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Apoio à Tecnologia e Ciência (FATEC) e à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

- ALVARES, C. A. et al.; 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728.
- ASDSO; 2014. **Training Aids for Dam Safety - Inspection of Embankment Dams**. Kentucky, USA: Association of State Dam Safety Officials (ASDSO).
- BAO, Y.; GAO, P.; HE, X.; 2015. The water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir — A unique geomorphological unit. *Earth-Science Reviews*, v. 150, p. 14–24.
- BLOEMER, S. et al.; 2015. **European Guidelines for Soil and Water bioengineering**. [s.l.] Europäische Föderation für Ingenieurbiologie.
- BONATTI, G.; MARONGIU, I.; 2013. **Soil Bio-engineering Techniques for Slope Protection and Stabilization - Natural Resource Management Handbook**. Financed by the Humanitarian Aid and Civil Protection Department of the European Commission (ECHO) ed. Kujand, Tajikistan: Cesvi.
- BRASIL. 2012. Lei n. 12.651, de 25 de maio de 2012. Proteção da vegetação nativa. Brasília, DF, maio 2012. 29 p.
- CNEC — CONSÓRCIO NACIONAL DE ENGENHEIROS CONSULTORES S.A.; 1989. **ESTUDO DE IMPACTO AMBIENTAL da Usina Hidrelétrica de Itá: IR2 - RT - RE1 - CN - 42**.
- COPPIN, N. J.; RICHARDS, I. G. (EDS.); 2007. **Use of Vegetation in Civil Engineering**. 2ª ed. London, UK: Construction Industry Research and Information Association (CIRIA).
- DE ANTONIS, L.; MOLINARI, V.; 2007. **Ingegneria Naturalistica - Nozione e Tecniche di Base**. Itália: Società Consortile per Azione, Regione Piemonte.
- DEWES, J. J. et al.; 2021. METODOLOGIA PARA MONITORAMENTO DE PROCESSOS EROSIVOS EM MARGENS DE RESERVATÓRIOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS. *International Journal of Development Research*, v. 11, n. 08, p.



49246–49252.

DEWES, J. J.; 2019. Metodologia para monitoramento de processos erosivos em margens de reservatórios de usinas hidrelétricas. Dissertação de Mestrado —Santa Maria, Brasil: Universidade Federal de Santa Maria.

DEWES, J. J.; 2023. **Modelagem e controle de processos erosivos em margens de reservatórios de usinas hidrelétricas.** Tese—Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria.

DEWES, J.; SOUSA, R.; SUTILI, F.; 2018. Execução de soleiras vegetadas para correção das condições hidráulicas de um canal de drenagem: Estudo de Caso. **Enciclopédia Biosfera**, v. 15, n. 27, p. 529–540.

DURLO, M.; SUTILI, F.; 2014. **Bioengenharia - Manejo biotécnico de cursos de água.** 3ª ed. Santa Maria: Pallotti.

FERNANDES, J.; FREITAS, A.; 2011. **Introdução à Engenharia Natural.** Portugal: EPAL - Empresa Portuguesa das Águas Livres, S.A.

HAMPTON, M. A. et al.; 2004. Processes that govern the formation and evolution of coastal cliffs. In: Hampton, M.A., Griggs, G.B. (Eds.), *Formation, Evolution, and Stability of Coastal Cliffs – Status and Trends.* Washington: US Geological Survey p. 7–38.

LEWIS, L.; 2000. **Soil Bioengineering An Alternative for Roadside Management - A Practical Guide.** San Dimas, California, USA: United States Department of Agriculture.

MACIEL FILHO, C. L.; NUMMER, A. V.; 2014. **Introdução à Geologia de Engenharia.** 5ª ed. Santa Maria, Brasil: Editora UFSM.

MORGAN, R. P. C.; RICKSON, R. J.; 1995. **Slope stabilization and erosion control - A bioengineering approach.** 1ª ed. London, UK: Chapman & Hall.

SALES, M. M.; 2017. **Erosão em borda de reservatório.** Escola de Engenharia Civil e Ambiental ed. Goiânia: Gráfica UFG, Volume 3.

SCHIECHTL, H.; 1980. **Bioengineering for land reclamation and conservation.** Edmonton, Canada: Department of the Environment, Government of Alberta. University of Alberta Press.

SCHIECHTL, H.; STERN, R.; 1996. **Ground bioengineering techniques for slope protection and erosion control.** Oxford, UK: Blackwell Science Ltd.

SOTIR, R.; GRAY, D. H.; 1992. **Soil Bioengineering for Upland Slope Protection and Erosion Reduction.** United States Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service ed. Washington, D.C.: Soil Conservation Service, USDA/NRCS.

SOUSA, R. S.; 2015. **Metodologia para especificação de plantas com potencial biotécnico em Engenharia Natural.** Dissertação de Mestrado—Santa Maria, Brasil: Universidade Federal de Santa Maria.

SOUSA, R. S. et al.; 2020. Engenharia natural: o uso e avaliação de plantas de uma perspectiva de engenharia. **Scientia Vitae**, v. 9, n. 27, p. 1–13.

SOUSA, R. S. et al.; 2021. Economic viability of streambank stabilization work with nature-based solutions applied to a pipeline stream crossing in South America. **International Journal of Development Research**, v. 11, n. 5, p. 46864–46868.

SOUSA, R. S.; DEWES, J. J.; SUTILI, F. J.; 2018. **Viabilidade econômica de uma obra de estabilização fluvial realizada com técnicas de Engenharia Natural.** Anais do XIII Congresso Florestal Estadual do Rio Grande do Sul. **Anais...** Em: XIII CONGRESSO FLORESTAL ESTADUAL DO RIO GRANDE DO SUL. Nova Prata.

SOUSA, R. S.; SUTILI, F. J.; 2017. Aspectos Técnicos das Plantas utilizadas em Engenharia Natural. **Ciência & Ambiente**, v. 46/47, p. 31–71.

STUDER, R.; ZEH, H.; 2014. **Soil Bioengineering: Construction Type Manual.** 2ª ed. Zurich: vdf Hochschulverlag an der ETH



SU, X. et al.; 2017. Soil erosion and deposition in the new shorelines of the Three Gorges Reservoir. *Science of The Total Environment*, v. 599–600, p. 1485–1492.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA - NRCS); 2014. **A guide for design and layout of vegetated wave protection for earthen embankments and shoreline**. Littleton, CO: United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service.

VENTI, D. et al.; 2003. **Manuale Tecnico di Ingegneria Naturalistica della Provincia di Terni. Applicabilità delle tecniche, limiti e soluzioni**. Itália: Provincia di Terni, Servizio Assetto del Territorio.

ÁREA TEMÁTICA 2

DESASTRES NATURAIS



3º CONGRESSO INTERNACIONAL DE
**ENGENHARIA
AMBIENTAL**



ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE A DESASTRES DE ORIGEM HIDROLÓGICA PARA AS REGIÕES METROPOLITANA DE SÃO PAULO, LITORAL SUL E VALE DO PARAÍBA

1Tamara Vieira Pascoto, 2Renato Macari, 3Anna Silvia Palcheco Peixoto

1 UNESP - BAURU, e-mail: tamara.pascoto@unesp.br; 2 DAE - BAURU, e-mail: remacari@yahoo.; 3 UNESP - BAURU, e-mail: anna.peixoto@unesp.br

Palavras-chave: Carta de Suscetibilidade; Desastres Hidrológicos; Fatores Condicionantes

Resumo

Desastres de origem hidrológica compreendem alagamentos, enchentes, inundações, transbordamentos de rios e enxurradas. Geralmente esses fenômenos ocorrem devido a combinação de chuvas intensas com urbanização não planejada, e muitas vezes em função de sistemas de drenagem urbana ineficientes ou inexistentes. Anualmente, esses desastres acarretaram em muitas perdas de vida humana, milhares de pessoas afetadas, infraestrutura urbana deteriorada e perdas econômicas na casa dos bilhões de dólares em todo o mundo. O perigo de ocorrência é função do regime pluviométrico da região aliado a suscetibilidade da área. A suscetibilidade, por sua vez, é função de inúmeros fatores condicionantes: uso e ocupação, geologia, declividade, geomorfologia, distancia até os rios e ao sistema de drenagem entre outros. Com isso, o objetivo desse trabalho foi desenvolver uma carta de suscetibilidade a desastres hidrológicos em função da geologia, uso e ocupação e declividade da área. A área de estudo compreende as regiões administrativas de São José dos Campos, São Paulo, Baixada Santista e Registro. Para tanto, foram desenvolvidas cartas de suscetibilidade a desastres hidrológicos em função de cada fator e posteriormente somadas em ambiente SIG para gerar a carta de suscetibilidade da área de estudo. A carta de suscetibilidade apontou a região metropolitana de São Paulo, parte do entorno da BR-116 e algumas regiões do litoral como muito alta e alta suscetibilidade. Por fim, o estudo se mostrou uma ferramenta capaz de auxiliar as lideranças políticas e tomadores de decisão na criação e desenvolvimento de políticas públicas destinadas a mitigação e prevenção a desastres de origem hidrológica.

Introdução

Os desastres de origem hidrológica estão entre os mais preocupantes em todo o mundo. No ano de 2022, dos 387 desastres de grande porte ocorridos no mundo, 176 foram relacionadas as inundações, o que totaliza 45,5% de todos os desastres. Além disso, estão presentes no ranking dos desastres com maior mortalidade, mais pessoas afetadas e mais perdas econômicas mundiais em 2022. Em relação a mortalidade, 2035 pessoas morreram nas inundações da Índia, 1739 no Paquistão, 603 na Nigéria, 544 na África do Sul e 272 no Brasil (3ª, 4ª, 6ª, 7ª e 10ª posição no ranking). Em relação ao ranking das pessoas afetadas por desastres no ano de 2022, o Paquistão está em primeiro lugar com 33 milhões de pessoas, e as enchentes de Bangladesh em 7º lugar com 7,2 milhões de afetados. E no ranking de perdas econômicas, as inundações do Paquistão estão em 3º lugar com perdas de 15 bilhões de dólares, seguidos da Austrália, China, Nigéria e Índia, nas 6ª, 7ª, 8ª e 9ª posição no ranking, com 6,6 bilhões de dólares, 5 bilhões, 4,2 bilhões e 4,2 bilhões de dólares respectivamente (CRED, 2023).

Os desastres do Brasil aparecem apenas no ranking de mortalidade mundial, entretanto, a frequência e as perdas econômicas em que ocorrem também são alarmantes. Somente no mês de fevereiro de 2024, o CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais) registrou 86 ocorrências no país de desastres hidrológicos, sendo 56 na região sudeste (CEMADEN, 2024). No ano de 2023, segundo dados do Tribunal de Contas da União (TCU), foram destinados 2,27 bilhões de reais às defesas civis em todo o país, sendo 1,46 bilhões para programas de resposta e recuperação de desastres e 355,9 milhões para programas de prevenção (BRASIL, 2024).

Um dos locais com a maior quantidade de alagamentos do estado de São Paulo é a cidade de São Paulo. Somente entre novembro de 2022 a abril de 2023, foram registradas 771 ocorrências de desastres hidrológicos na cidade, mesmo a prefeitura tendo investido mais de R\$ 3 bilhões de reais entre 2022 e 2023 (KRUSE, 2024).

Tendo em vista que as previsões para os próximos anos indiquem um aumento nas chuvas extremas para a região Sudeste (GREVE *et al.*, 2018), esse cenário dos desastres hidrológicos pode ser ainda mais alarmante para o estado de São Paulo. Em função disso, técnicas para previsão de desastres são cada vez mais necessárias para que a sociedade se torne mais resiliente. Dessa maneira, mapeamento de áreas suscetíveis se tornam cada vez mais indispensáveis.

Os desastres hidrológicos no banco de dados do IPMET compreendem os alagamentos, enchentes, inundações (graduais, bruscas e litorâneas), transbordamentos de rios e enxurradas (PELLEGRINA, 2011). A definição de cada um desses desastres não costumam ser claras e acabam causando confusões para a população em geral. Por alagamentos entende-se pelos fenômenos de acumulação de água de chuva devido ao extravasamento do sistema de drenagem urbana. As inundações correspondem as submersões de água fora dos leitos dos cursos d'água. E as enchentes são elevações dos níveis dos cursos d'água (BRASIL, 2017).

Diversos autores mapeiam áreas suscetíveis aos desastres com metodologias e ferramentas distintas. Alguns autores utilizam análise multicritérios (KHALAJ *et al.*, 2021; SANTOS *et al.*, 2019; ZZAMAN *et al.*, 2021), inteligência artificial (ALBERTON *et al.*, 2021; KALANTAR *et al.*, 2021; LIMA; SCOFIELD, 2021), estatística multivariada (AHMED *et al.*, 2023), entre outros métodos (DUTTA *et al.*, 2023; OLIVEIRA CHAVES *et al.*, 2021; SUPPAWIMUT, 2021) ou ainda através da combinação de mais de um desses métodos (ARORA, 2023; RANA; MAHANTA, 2023; SHAHIRI TABARESTANI *et al.*, 2023).



Independentemente do método utilizado, todos eles são embasados em fatores condicionantes que influenciam diretamente na ocorrência dos desastres, uma vez que as áreas suscetíveis estão correlacionadas a diversos fatores físicos do meio, como por exemplo, o uso e ocupação do local, a geologia, declividade, geomorfologia, relevo, entre outros.

A importância desses fatores depende muito do local. Por exemplo, em uma certa região da Índia, Ramesh e Iqbal (2020) apontaram que os fatores que mais influenciam na suscetibilidade são o uso do solo e a proximidade ao sistema de drenagem superficial. Kalantar et al. (2021) apontaram que na região da Austrália que estudaram, os fatores mais importantes foram a altitude, a distância até os rios e o índice de potencia de fluxo. Suppawimut (2021) apontaram que na região da Tailândia estudada os fatores foram o uso e ocupação, drenagem do solo e elevação. Por outro lado, Oliveira Chaves et al. (2021) ao estudarem uma sub-bacia no Distrito Federal Brasileiro concluíram que os fatores com maior influencia nos desastres de origem hidrológica foram uso e cobertura do solo, geologia e curvatura do terreno.

Independente da região, para criar os modelos representativos de suscetibilidade é comum utilizar vários fatores condicionantes. Isso costuma gerar cartas fidedignas das áreas de estudo, porém torna-se um trabalho que desprende muito tempo, uma vez que nem sempre esses dados estão disponíveis de forma rápida e fácil para os pesquisadores. Desse modo, gerar cartas de suscetibilidade embasada em poucos fatores condicionantes, que estão disponíveis abertamente na internet torna-se fundamental devido a dinamicidade desses fatores.

A fim de facilitar na execução das cartas de suscetibilidade, embasada na literatura, esse trabalho tem como objetivo desenvolver uma carta de suscetibilidade a desastres de origem hidrológica para as regiões metropolitana de São Paulo, litoral sul e Vale do Paraíba embasada em apenas três fatores condicionantes: geologia, uso e ocupação do solo e declividade.

Área de Estudo

A área de estudo possui 38.672,8 Km² de extensão e é composta pelas regiões administrativas de Registro (31,4% da área), Baixada Santista (6,2%), São Paulo (20,6%) e São José dos Campos (41,8% da área total) (Figura 1).

A escolha dessa área se deu em função da grande quantidade de desastres que as quatro regiões juntas possuem em relação ao todo estado de São Paulo. Após um levantamento prévio feito no banco de dados desenvolvido por (PELLEGRINA, 2011) e disponível no site do IPMET, no período de 1996 a 2020, contabilizou-se 4327 desastres de origem hidrológica no estado de São Paulo, sendo que 43,1% aconteceram nessas quatro regiões administrativas. É importante destacar que essa quantidade de desastres provavelmente seja maior, uma vez que só é inserido no banco de dados aqueles desastres que tiveram ocorrência na Defesa Civil.

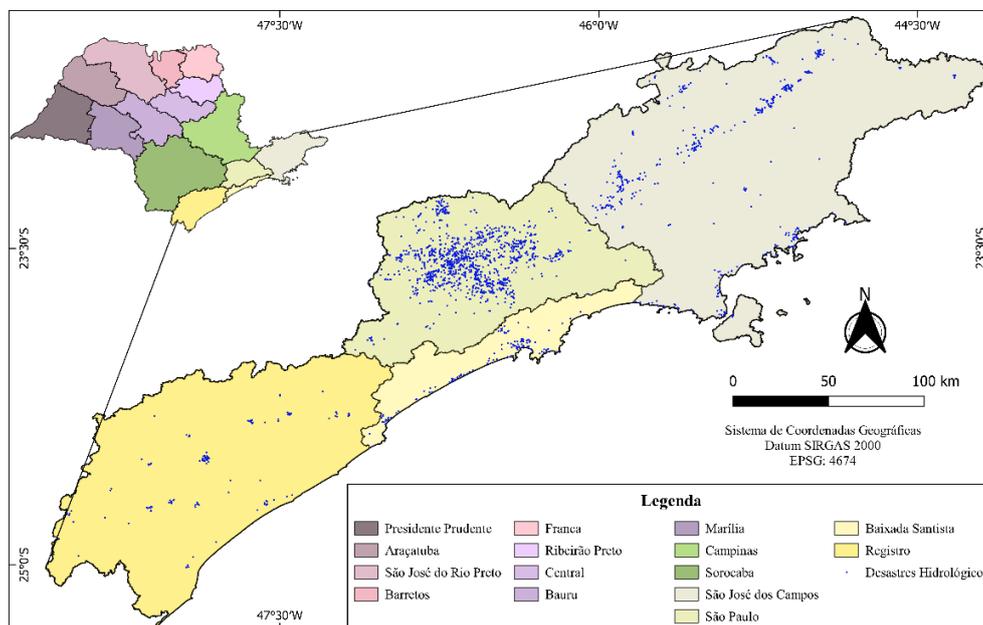


Figura 1. Área de Estudo

Material e Métodos

Inicialmente foi feito o levantamento do inventário de desastres de origem hidrológica da área de estudo. Para isso, foi feita uma consulta aos arquivos físicos e digitais do IPMET. Também resolveu-se tratar alagamentos, enchentes e inundações em um único grupo de desastres e apenas as enxurradas em um grupo separado devido ao fato dela possuir características distintas ligadas ao escoamento superficial das demais. Assim, houve uma mudança no número de desastres apontados inicialmente, uma vez que nos registros físicos foi constatado casos em que havia o registro de alagamento, enchente, inundação e transbordamento de rio para um mesmo evento de chuva em uma mesma localidade. Outro motivo que levou a mudança na quantidade de desastres foi que se constatou novos registros que estavam incompletos ou inexistentes no banco de dados digitais e que passaram a integrar o inventário desse estudo.

Para a escolha dos fatores foi feita uma pesquisa na literatura nacional e internacional, a qual indicou que três fatores costumam aparecer com frequência nas listagens de maiores importância nos desastres: geologia, uso e ocupação e declividade do terreno.



Posteriormente, foi levantado os mapas dos fatores condicionantes dos desastres analisados: o mapa geológico utilizado foi o desenvolvido pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) (IPT, 1981) na escala de 1:50.000; o uso e ocupação foi obtido por meio da Coleção 8 do Projeto MapBiomias Brasil (MapBiomias Brasil, 2023); e a declividade foi proveniente do modelo digital de elevação (MDE) disponível no Portal do DataGeo do Sistema Ambiental Paulista, na escala de 1:50.000.

Para cada mapa foram calculadas as áreas e determinado a quantidade de ocorrências de desastres hidrológicos para cada classe do fator. Para excluir a hipótese de que a maior ocorrência de desastres se dá em classes de fatores com maior extensão de área e não em função das características das classes, a análise da suscetibilidade desses fatores foi feita através da relação no número de ocorrência pela área de cada classe. Por exemplo, em uma determinada classe de uso e ocupação, ocorreram x desastres no período estudado, e essa classe está localizada em y quilômetros quadrados da área de estudo. O peso para essa classe de uso e ocupação foi de x/y .

Na sequência, essa relação foi normalizada buscando-se obter valores entre 0 e 1 e espacializada em ambiente SIG, gerando uma carta de suscetibilidade de cada fator. As frequências normalizadas foram divididas em cinco classes de suscetibilidade: muito baixa (0 a 0,2), baixa (0,2 a 0,4), média (0,4 a 0,6), alta (0,6 a 0,8) e muito alta (0,8 a 1,0).

A fim de realizar uma análise conjunta desses fatores, através da calculadora *raster*, as três cartas dos fatores foram somadas, o resultado normalizado novamente e divididas nas cinco classes, obtendo-se assim a carta de suscetibilidade da área de estudo.

Resultados e Discussão

Após a análise completa dos chamados da defesa civil, no banco de dados físico do IPMET, entre os anos de 1996 a 2020, ocorreu na área de estudo 2889 desastres de origem hidrológica, sendo 65% desses desastres ocorridos na região de São Paulo, 20% na região administrativa de São José dos Campos, 8% em Registro e 7% na Baixada Santista. A Figura 2 mostra o mapa dos fatores analisados e o inventário dos desastres, sendo a Figura 2a o mapa de geologia, Figura 2b o mapa de declividade e Figura 2c o mapa de uso e ocupação referente ao ano de 2010.

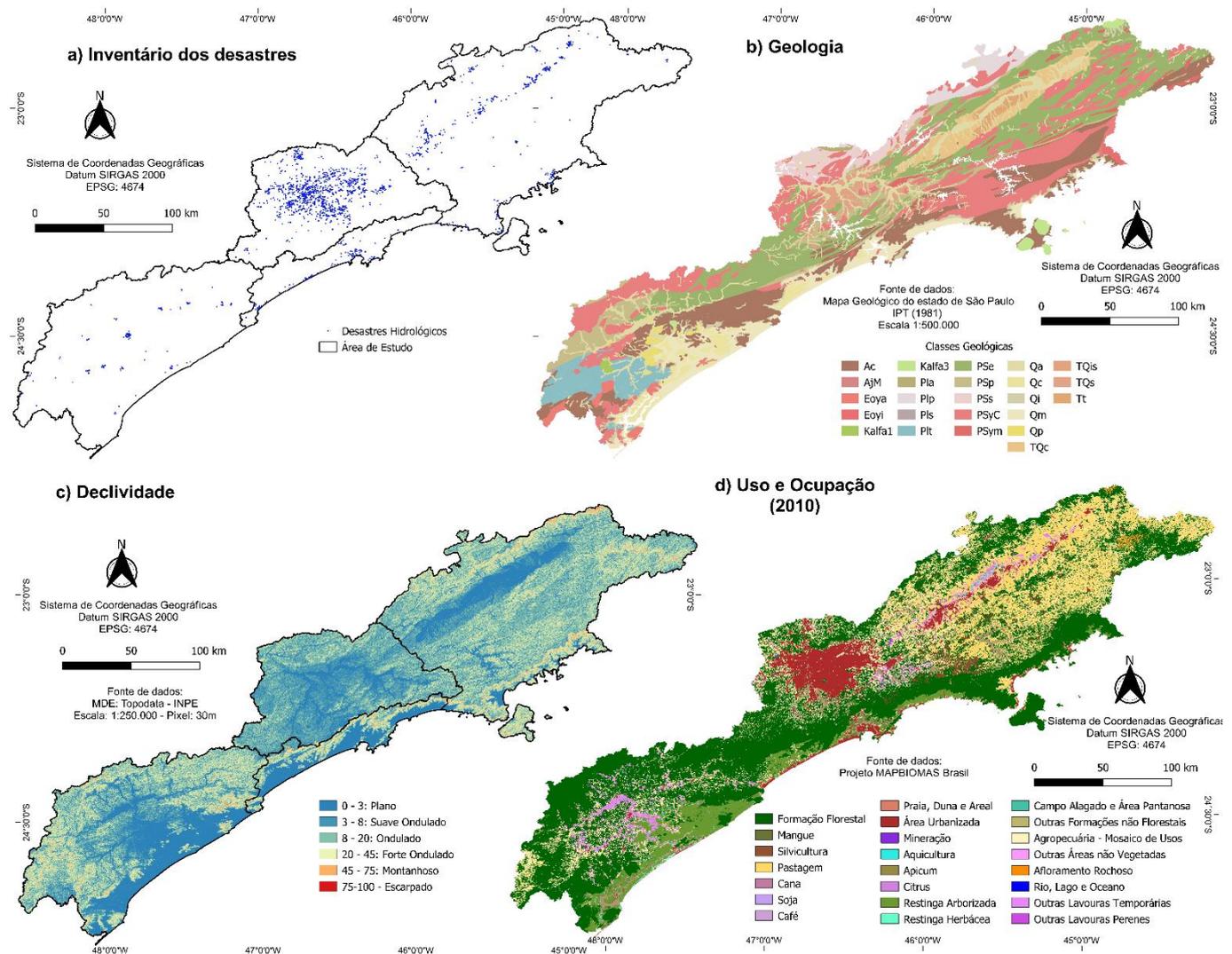


Figura 2 – Inventário dos desastres (a) e Mapa dos fatores desencadeadores: b) geologia, c) declividade, d) uso e ocupação do ano de 2010



Em relação a geologia, as classes que possuem as maiores extensões são as Fácies Cantareira (PSyc), Complexo Embu (PSe), Complexo Costeiro (Ac) e Sedimentos Aluvionares (Qa), com 21,43%, 20,09%, 13,77% e 8,79% de toda a área de estudo, respectivamente. A maioria dessas classes também apresentam a maior quantidade dos desastres ocorridos, exceto o Complexo Costeiro (Ac). As classes com maiores ocorrência de desastres foram os Sedimentos Aluvionares (Qa) com 854 desastres, seguida da Formação São Paulo (TQs) com 516 desastres, Complexo Embu (PSe) com 298 desastres e Fácies Cantareira (PSyc) com 291 desastres, totalizando 67,81% de todas as ocorrências (Tabela 1).

As quatro classes com maior quantidade de ocorrências de desastres ocupam juntas 52,09% da área de estudo. Sendo que, entre essas classes, a com a menor área, a TQs, que compreende apenas 1,78%, é a formação São Paulo, localizada principalmente na região metropolitana de São Paulo. Região essa com a maior quantidade de moradores de toda a região de estudo, o que acaba, naturalmente, podendo ter uma maior quantidade de chamado da defesa civil e conseqüentemente, uma maior quantidade de desastres registrados.

Por outro lado, também é importante ressaltar que, devido a grande quantidade dos desastres terem ocorrido nas classes com maior extensão de área, foi feita uma análise desses fatores em relação ao tamanho da área de cada classe. Assim, buscou-se avaliar a hipótese de que só aconteceram muitos desastres em uma determinada classe, devido ao seu grande tamanho, e não unicamente em função da sua litologia. Com isso, a hipótese que permaneceu na análise foi de que se a relação desastres/área for alta provavelmente a classe possui uma alta suscetibilidade a ocorrer esses desastres.

Tabela 1 – Algumas das classes de geologia existentes na área de estudo, com a respectiva análise de suscetibilidade

Classes	Geologia	Área (%)	Qtdd	Qtdd/área	Valores Norm.
Ac	Complexos Costeiros	13,77%	55	0,0100	0,014
Kα1	Corpo Alcalino de Jacupiranga	0,17%	14	0,2074	0,285
PIs	Formação Setuva	0,04%	5	0,3525	0,485
PSe	Complexo Embu	20,09%	298	0,0372	0,051
PSp	Complexo Pilar	5,89%	180	0,0766	0,105
PSs	Grupo São Roque	2,68%	108	0,1009	0,139
PSyc	Facies Cantareira	21,43%	291	0,0340	0,047
Qa	Sedimentos Aluvionares	8,79%	854	0,2436	0,335
Qm	Sedimentos Marinhos e Mistos	5,78%	223	0,0968	0,133
TQc	Formação Caçapava	2,89%	171	0,1482	0,204
TQs	Formação São Paulo	1,78%	516	0,7274	1,000

A Tabela 1 mostra a relação entre a quantidade de desastres e a área que a classe ocupa e essa relação normalizada. A coloração apresentada corresponde as cinco classes de suscetibilidade: valores de 0 a 0,2, na coloração verde, representando muito baixa suscetibilidade; valores de 0,2 a 0,4, na coloração verde claro, representando baixa suscetibilidade; de 0,4 a 0,6, amarelo, representando média suscetibilidade; de 0,6 a 0,8, em laranja, representando alta suscetibilidade; e valores de 0,8 a 1,0, em vermelho, representando muito alta suscetibilidade.

Com isso, a classe que apresentou muita alta suscetibilidade foi a classe da Formação São Paulo (TQs). Isso pode ser explicado devido ao fato dessa classe ser composta de sedimentos fluviais e por estar situado na região metropolitana de São Paulo, local em que há muitos registros desse tipo de desastres. O que também poderia ter acontecido na classe de Sedimentos Aluvionares (Qa) devido ao alto número de desastres desse tipo (852). Entretanto a classe Qa tem uma extensão muito superior a TQs. Enquanto a primeira classe de Sedimentos Aluvionares (Qa) possui 8,79% da área em extensão, a formação São Paulo (TQs) possui apenas 1,78% da área.

Os valores normalizados foram espacializados em SIG e seguiram a mesma coloração da Tabela 1. As classes de muito alta e alta suscetibilidade ocupam apenas 1,78% da área de estudo. Desse modo, a maior extensão da área de estudo foi classificada como muito baixa suscetibilidade (Figura 3a).

A Figura 2 c mostra o mapa de declividade da área de estudo. De maneira geral, a região estudada apresenta declividades mais acentuadas, sendo que 61,55 % de toda a área possui declividades entre 8 a 45%, classificadas como Forte Ondulado e Ondulado. Como o esperado, a classe que apresentou maior quantidade de desastres hidrológicos foi a classe Plana (0 a 3% de declividade), com 1338 desastres (46,3% dos desastres) (Tabela 2).

Nas regiões escarpadas é possível notar que aconteceu um único desastre hidrológico. Isso pode ter ocorrido porque a defesa civil só é acionada quando há chamado devido a comunidade da área ser afetada diretamente pelos desastres e, nesse



caso, como essa classe situa-se em região de serra e, nesses locais costumam ter uma densidade populacional muito baixa, a probabilidade de ter pessoas afetadas também é muito baixa.

Do mesmo modo que foi feito para a geologia, a declividade também foi analisada em função da área e depois normalizada (Tabela 2). As áreas mais planas, de 0 a 3%, foram as mais suscetíveis a desastres de origem hidrológica, o que era esperado, uma vez que, quanto mais plana a área for, maior é a propensão da área em sofrer inundações (CAMPIOLI; VIEIRA, 2019; PESSOA NETO *et al.*, 2023). A Figura 3b mostra a especialização da análise normalizada e ilustra a carta de suscetibilidade a desastres de origem hidrológica em função da declividade.

Por fim, para a análise do fator uso e ocupação, foi calculada a área de cada classe, ano a ano, entre o período de 1996 a 2020. Notou-se que a variação das áreas não foi significativa ao longo dos anos, por isso, a análise foi feita com a área média de classe ao longo dos anos. Em toda a área de estudo, a formação florestal foi a classe com maior extensão (48,93%), seguida da pastagem (16,68%) e da agropecuária (13,71%) (Tabela 3).

Como os registros só ocorrem com o chamado da defesa civil, era esperado que locais com maior concentração de pessoas tivessem a maior quantidade de ocorrências. Desse modo, a classe que apresentou a maior quantidade de desastres de origem hidrológica foi a área urbanizada (2335 desastres, totalizando 80,8% do total), seguido da agropecuária (263 desastres – 9,10%) e formação florestal (107 desastres – 3,7%) (Tabela 3).

A suscetibilidade em função do uso e ocupação também foi analisada através da relação número de ocorrências pela área da classe e normalizada (Tabela 3). Como o número de ocorrências foi muito alto nas áreas urbanizadas, era esperado que essa classe apresentasse muito alta suscetibilidade. Como o escoamento superficial e a infiltração de água dependem diretamente do uso e ocupação do local (KARYMBALIS *et al.*, 2021), a urbanização acaba por elevar a taxa de impermeabilização da região, o que diminui a infiltração de água de chuva e aumenta significativamente o escoamento superficial dessas regiões (OLII *et al.*, 2021).

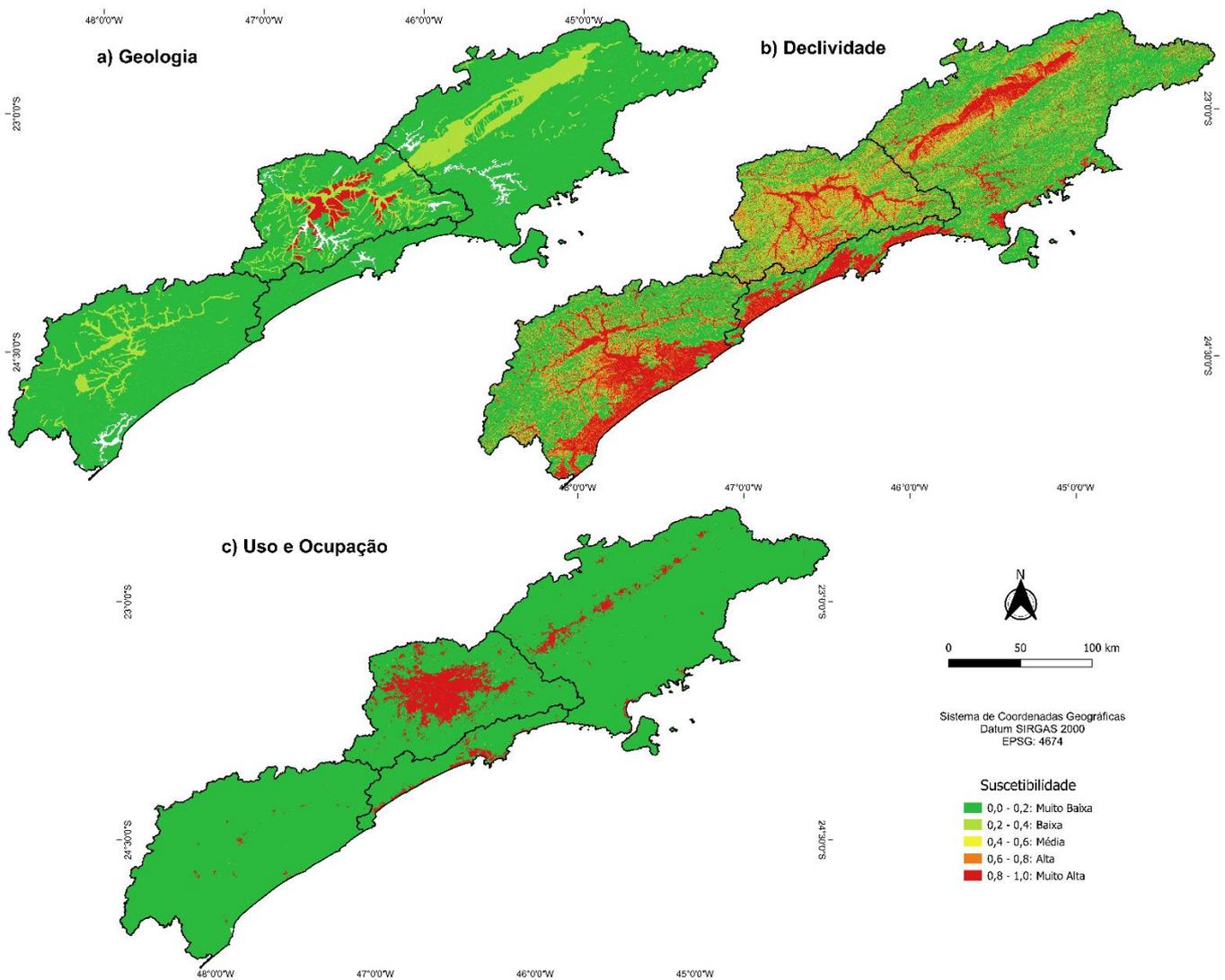


Figura 3 - Cartas de suscetibilidade à desastres hidrológicos em função da geologia (a), da declividade (b) e do uso e ocupação (c)



Tabela 2 – Classes da declividade existentes na área de estudo, com a respectiva análise de suscetibilidade

Classes de declividade	Área %	Qtdd	Qtdd/ área	Valores Norm.
0 - 3: Plano	18,68%	1338	0,1857	1,000
3 - 8: Suave Ondulado	11,32%	646	0,1480	0,793
8 - 20: Ondulado	26,00%	707	0,0705	0,367
20 - 45: Forte Ondulado	35,55%	186	0,0136	0,055
45- 75: Montanhoso	7,90%	11	0,0036	0,000
75 - 100: Escarpado	0,55%	1	0,0047	0,006

A classe de Apicum foi classificada como alta suscetibilidade. Apicum é composta por áreas adjacentes a manguezais, formadas a partir de erosões de encostas localizadas nas redondezas. Essa classe de uso dificilmente possui vegetação densa, uma vez que esses locais apresentam uma quantidade elevada de sais (UCHA *et al.*, 2008). Desse modo, essa classe pode apresentar elevada suscetibilidade a desastres. Entretanto, a classe Apicum (32) apresentou alta suscetibilidade, não devido apenas a quantidade de desastres, uma vez que ocorreu apenas 3, mas sim devido a área em que ela ocupa que é pequena, apenas 0,01% do total.

A Figura 3d ilustra a espacialização da suscetibilidade dos desastres de origem hidrológica em função das classes de uso e ocupação. Grande parte da área de estudo foi classificada como muito baixa suscetibilidade, exceto a região litorânea, a grande São Paulo e a BR -116. Essas áreas somam pouco mais de 6 % da área de estudo e foram classificadas como alta e muito alta suscetibilidade.

Tabela 3 – Algumas das classes do uso e ocupação existentes na área de estudo, com a respectiva análise de suscetibilidade

Classe	Área Média (%)	Qtdd	Qtdd/área	Valores Norm.
Formação Florestal	48,93%	107	0,0056	0,006
Pastagem	16,68%	66	0,0102	0,011
Agropecuária - Mosaico de Usos	13,71%	263	0,0494	0,053
Praia, Duna e Areal	0,03%	4	0,3974	0,431
Área Urbanizada	6,51%	2335	0,9230	1,000
Outras Áreas não vegetadas	0,21%	16	0,1920	0,208
Apicum	0,01%	3	0,6617	0,717
Rio, Lago e Oceano	2,18%	25	0,0295	0,032
Outras Lavouras Temporárias	2,83%	47	0,0428	0,046
Restinga Arborizada	6,30%	23	0,0094	0,010

As três cartas de suscetibilidade dos fatores desencadeadores foram somadas, normalizadas e dividida em cinco classes de suscetibilidade gerando a carta de suscetibilidade da área de estudo (Figura 4). A classe de alta, muito alta e média suscetibilidade compreendem 0,88%, 3,97% e 5,72% da área de estudo, respectivamente. Elas estão localizadas principalmente na região metropolitana de São Paulo, ao longo da BR – 116, nas cidades litorâneas da Baixada Santista e em algumas cidades do Litoral Norte do estado.

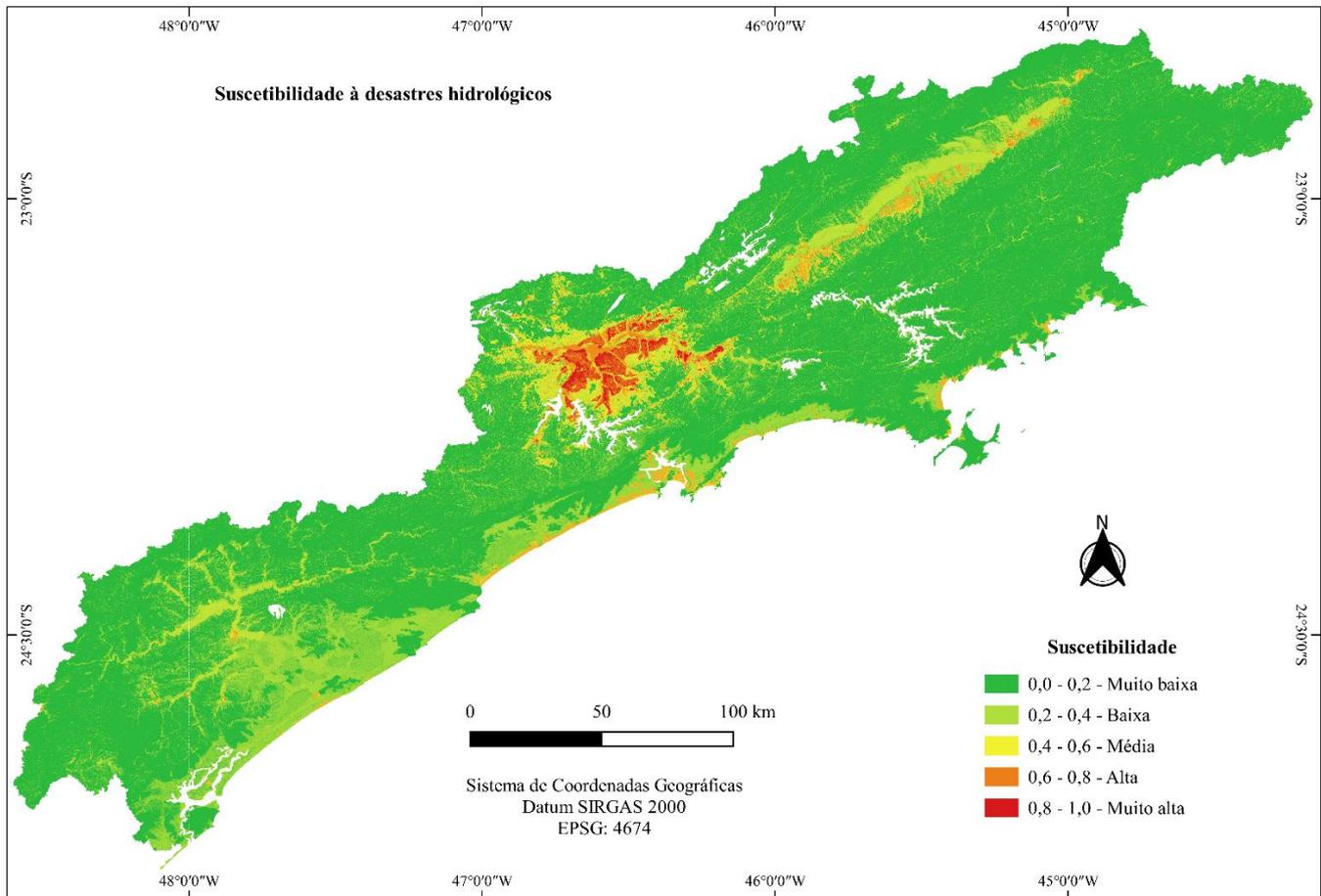


Figura 4 - Cartas de suscetibilidade à desastres hidrológicos da área de estudo

Considerações Finais

As três cartas de suscetibilidade separadas em geologia, declividade e uso e ocupação foram capazes de indicar regiões mais suscetíveis a desastres de origem hidrológica em função do fator condicionante. Nos três casos foi possível observar que a região metropolitana de São Paulo foi classificada como muito alta suscetibilidade. Além disso, na carta do uso e ocupação parte da região do litoral e da BR – 116 também foram classificadas como muito alta suscetibilidade. Por fim, para a carta embasada na declividade, uma maior área foi classificada como muito alta suscetibilidade: além da região metropolitana de São Paulo, do litoral e da BR-116, uma grande parte da região administrativa de Registro também foi.

Ao somar essas três cartas foi possível identificar as regiões mais suscetíveis da área de estudo, uma vez que foi embasada nos três fatores condicionantes de maneira igual. As regiões que requerem maiores atenções são: região metropolitana de São Paulo, litoral da Baixada Santista, parte do litoral norte, em torno da BR-116, e uma área central da região administrativa de Registro.

Dessa maneira, a carta de suscetibilidade da área de estudo, indicou a necessidade de fortalecimento de políticas públicas voltadas a prevenção e mitigação de riscos para que, principalmente, as regiões apontadas como muito alta a alta suscetibilidade aumentem a resiliência à desastres de origem hidrológica.

Também é importante salientar que as cartas de suscetibilidade são dinâmicas, uma vez que são construídas em função da quantidade de desastres que ocorreram na área. Isso significa que mudanças nos fatores condicionantes podem acarretar em um aumento ou uma queda na classificação da suscetibilidade. Desse modo, a atualização das cartas torna-se indispensáveis para auxiliar os tomadores de decisão frente as diferentes possibilidades de melhorias disponíveis para a região estudada. Essa atualização requer não somente a mudança das frequências dos fatores condicionantes, mas também na escolha dos fatores que serão analisados para a determinação da carta de suscetibilidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES pela bolsa de doutorado concedida ao primeiro autor.

Referências Bibliográficas

Ahmed, A.; Al Maliki, A.; Hashim, B.; Alshamsi, D.; Arman, H.; Gad, A. (2023) Flood susceptibility mapping utilizing the integration of geospatial and multivariate statistical analysis, Erbil area in Northern Iraq as a case study. Scientific Reports, v. 13, n. 1.



- Alberton, G. B.; Severo, D. L.; Melo, M. N. V. de; Potelicki, H.; Sartori, A. (2021) Aplicação de redes neurais artificiais para previsão de enchentes no rio Itajaí-Açu em Blumenau, SC, Brasil. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 12, n. 4, p. 686–696.
- Arora, A. (2023) Flood susceptibility prediction using multi criteria decision analysis and bivariate statistical models: a case study of Lower Kosi River Basin, Ganga River Basin, India. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, v. 37, n. 5, p. 1855–1875.
- Brasil (2017). *Manual de Proteção e Defesa Civil: Glossário de Proteção e Defesa Civil*.
- Brasil, Tribunal de Contas da União (TCU) (2024) Recursos para Gestão de Risco e Desastres. Disponível em: <https://paineis.tcu.gov.br/pub/?workspaceId=8bfb0cc-f2cd-4e1c-8cde-6abfdffea6a8&reportId=38677b6b-e536-4ad5-896c-5bef379e67d5>. Acesso em: 31 mar. 2024.
- Campioli, P. F.; Vieira, C. V. (2019) Flood Risk Assessment in the Cubatão do Norte River Basin, Joinville/Santa Catarina – Brazil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 12, n. 1, p. 124–138.
- CEMADEN (2024). *Boletim de impactos de origem hidro-geo-climático em atividades estratégicas para o Brasil*. São José dos Campos: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação.
- CRED (2023). *Disasters Year in Review 2022*. Cred Crunch, n. 70. Disponível em: https://cred.be/sites/default/files/2022_EMDAT_report.pdf.
- Dutta, M.; Saha, S.; Saikh, N. I.; Sarkar, D.; Mondal, P. (2023) Application of bivariate approaches for flood susceptibility mapping: a district level study in Eastern India. *HydroResearch*, v. 6, p. 108–121.
- Greve, P.; Gudmundsson, L.; Seneviratne, S. I. (2018) Regional scaling of annual mean precipitation and water availability with global temperature change. *Earth System Dynamics*, v. 9, n. 1, p. 227–240.
- IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1981). *Mapa Geológico do Estado de São Paulo*. Escala 1:500.000, Volumes I e II.
- Kalantar, B.; Ueda, N.; Saeidi, V.; Janizadeh, S.; Shabani, Fariborz; Ahmadi, K.; Shabani, Farzin. (2021) Deep neural network utilizing remote sensing datasets for flood hazard susceptibility mapping in Brisbane, Australia. *Remote Sensing*, v. 13, n. 13
- Khalaj, M. R.; Noor, H.; Dastranj, A. (2021) Investigation and simulation of flood inundation hazard in urban areas in Iran. *Geoenvironmental Disasters*, v. 8, n. 1, p. 1–13.
- Kruse, T. (2024) Alagamentos aumentaram 57% na temporada passada de chuvas em São Paulo. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2024/01/alagamentos-aumentaram-57-na-temporada-passada-de-chuvas-em-sao-paulo.shtml#:~:text=Enchentes%20crescem%20na%20cidade%20de%20SP&text=%22Vale%20ressaltar%20ainda%20que%20C%20em,per%C3%ADodo%20de%20novembro%20a%20abril.%22>. Acesso em: 31 mar. 2024.
- Lima, G. R. T.; Scofield, G. B. (2021) Feasibility study on operational use of neural networks in a flash flood early warning system. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 26.
- MAPBIOMAS Brasil (2023). Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>. Acesso em: 28 jun. 2023.
- Oliveira Chaves, H. L.; Costa, M. E. L.; Koide, S.; De Almeida, T.; Cicerelli, R. E. (2021) Mapeamento De Suscetibilidade À Inundação Utilizando O Método Da Razão De Frequência Aplicado À Bacia Do Riacho Fundo - Distrito Federal. *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais*, n. 2018, p. 148–166.
- Pellegrina, G. J. (2011) Proposta de um procedimento metodológico para o estudo de problemas geoambientais com base em banco de dados de eventos atmosféricos severos. *Dissertação - Universidade Estadual Paulista, Bauru*.
- Pessoa Neto, A. G.; Silva, S. R. da; Barbosa, I. M. B. R. (2023) Mapeamento das áreas suscetíveis a inundações na bacia hidrográfica do rio Tejiipió, em Pernambuco, Brasil. *Entorno Geográfico*, n. 26, p. e22413055.
- Ramesh, V.; Iqbal, S. S. (2020) Urban flood susceptibility zonation mapping using evidential belief function, frequency ratio and fuzzy gamma operator models in GIS: a case study of Greater Mumbai, Maharashtra, India. *Geocarto International*, v. 0, n. 0, p. 1–26. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1730448>.
- Rana, M. S.; Mahanta, C. (2023) Spatial prediction of flash flood susceptible areas using novel ensemble of bivariate statistics and machine learning techniques for ungauged region. *Natural Hazards*, v. 115, n. 1, p. 947–969.



Santos, P. P.; Reis, E.; Pereira, S.; Santos, M. (2019) A flood susceptibility model at the national scale based on multicriteria analysis. *Science of the Total Environment*, v. 667, p. 325–337.

Shahiri Tabarestani, E.; Hadian, S.; Pham, Q. B.; Ali, S. A.; Phung, D. T. (2023) Flood potential mapping by integrating the bivariate statistics, multi-criteria decision-making, and machine learning techniques. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, v. 37, n. 4, p. 1415–1430.

Suppawimut, W. (2021) GIS-Based Flood Susceptibility Mapping Using Statistical Index and Weighting Factor Models. *Environment and Natural Resources Journal*, v. 19, n. 6, p. 1–13.

Ucha, J. M.; Hadlich, G. M.; Celino, J. J. (2008) Apicum: Transição entre solos de encostas e de manguezais. *Revista E.T.C. Educação, tecnologia e cultura*, v. 5, p. 58–63.

Zzaman, R. U.; Nowreen, S.; Billah, M.; Islam, A. S. (2021) Flood hazard mapping of Sangu River basin in Bangladesh using multi-criteria analysis of hydro-geomorphological factors.pdf. *Journal of Flood Risk Management*, p. 19.



INFLUENCIA DE COBERTURAS VEGETALES ARBÓREAS Y NO ARBÓREAS EN LA ATENUACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS

1Andrés Camilo Rey Sánchez, 2Juan Carlos Medina Avellaneda, 3Carlos Francisco García Olmos

1Universidad Distrital Francisco José de Caldas, e-mail: areysan@ncsu.edu; 2Universidad Distrital Francisco José de Caldas, e-mail: jcomedinaa@udistrital.edu.co; 3Universidad Distrital Francisco José de Caldas, e-mail: cfgarcao@udistrital.edu.co

Palabras-clave: Bosques; modelización; crecientes

Resumen

El objetivo principal fue determinar la influencia de los bosques plantados de ciprés (*Cupressus lusitánica* mill.), eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill.) y el bosque natural en la atenuación de caudales máximos en la cuenca alta del río San Cristóbal, cerros orientales de la ciudad de Bogotá D.C. Para alcanzar este propósito se fijaron como objetivos específicos el realizar la caracterización morfométrica, hidrológica, de suelos y de vegetación de la cuenca alta del río San Cristóbal; hacer la modelación hidrológica para la predicción de inundaciones en la cuenca alta del río San Cristóbal y evaluar la influencia de las coberturas vegetales en el comportamiento de los caudales máximos en la cuenca alta del río San Cristóbal.

La cuenca alta del río San Cristóbal se encuentra al sur oriente de la ciudad de Bogotá DC, en una zona de reserva forestal de los cerros orientales que pertenece a la empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá DC (DELSA, 1986). Se ubica en las coordenadas geográficas X= 74° 01' 41" de latitud norte; y Y=04° 30' 42" latitud oeste. En un rango altitudinal de los 2900 msnm a los 3600 msnm. Se realizó la caracterización de la cuenca con énfasis en las coberturas arbóreas. Con ella se definieron parámetros utilizados para generar modelos de lluvia-escorrentía bajo la plataforma del programa HEC-HMS (US Army Corps of Engineers, Redlands, CA). Adicionalmente, se creó un modelo geo-espacial con ayuda de los programas HEC-GeoHMS y ArcGIS 9.2 (ESRI, Redlands, CA) para evaluar en detalle las variaciones espaciales de la cuenca.

La predicción de los hidrogramas se hizo para tres microcuencas en las cuales se distribuyó la cuenca, en las cuales hay coberturas de ciprés, eucalipto y bosque natural, además de coberturas no arbóreas en las tres microcuencas. Para obtener el mejor modelo se propusieron 6 opciones con base en combinaciones de los procesos de pérdida, transformación y tránsito. Según un proceso de optimización, calibración y evaluación se identificó el mejor modelo de acuerdo con dos funciones objetivo. Estas funciones se formularon valorando la precisión en la predicción del caudal máximo en donde tiene mayor valoración un caudal en exceso al real que uno por defecto; y la predicción del tiempo en alcanzar el caudal máximo en los hidrogramas generados, donde se valora mejor una predicción anticipada en el tiempo que una con un tiempo mayor al real. La mejor combinación fue la Curva Número con el hidrograma unitario de Snyder.

La influencia del bosque en la predicción de crecientes, se estudió con el método de la Curva Número. Se propuso una ecuación para determinar el valor de la CN con base en datos físicos de suelos y de los tipos de bosques considerados. Se hizo un diseño experimental en el cual se plantearon situaciones en las cuales cada una de las coberturas boscosas se modeló en todas y cada una de las microcuencas conservando sus coberturas no boscosas. Se hallaron, a partir del modelo, los caudales máximos por microcuenca que cada arreglo de coberturas generó, encontrando la cobertura con mejor capacidad de atenuación de crecientes.

La predicción en inundaciones se hizo para dos tipos de coberturas contrastantes, la primera vegetación actual y la segunda en caso hipotético de que solo existan coberturas no arbóreas en las microcuencas. El hidrograma resultante es el obtenido en el punto de cierre denominado el Delirio y las predicciones se hicieron para eventos de lluvia extremos con periodos de retorno de 5, 15 y 25 años. La calibración se logró mediante ensayos de optimización. Un ensayo de optimización es una búsqueda programada por un algoritmo que define cambios en los parámetros identificados para de esta forma acercar el valor calculado al observado, hasta cumplir con los criterios de búsqueda.

Los resultados muestran que la diferencia del caudal máximo entre las situaciones de la cobertura de bosques actual y la situación hipotética de la cobertura total de la cuenca como no boscosa las diferencias son en promedio de $2.53 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, donde los incrementos porcentuales se van reduciendo a mayores periodos de retorno y fueron en promedio 8.0%. No hubo diferencias significativas estadísticamente entre los Bosques, ni tampoco entre estos y las coberturas no arbóreas, con variaciones de -0.5% cuando predominó la cobertura de bosque natural, de 0% con el eucalipto, 1% con el ciprés, y 8.0% en la cobertura no boscosa. Se concluye que los incrementos en el caudal máximo están más condicionados por las características de la cuenca y de la precipitación que por la cobertura cuando de eventos muy extremos se trata.

Introducción

Las crecientes en cuencas de alta montaña son fenómenos naturales que han llegado a causar grandes problemas a escala nacional, con fuertes pérdidas materiales y de vidas humanas (DNP, 2006). Para hacer frente a esta problemática, la modelación hidrológica ha sido una herramienta usada por la comunidad científica en las últimas décadas (Feldman, 2000). Esta tiene como objetivo la planeación y evaluación de obras hidráulicas, el manejo de aguas, y la predicción de avenidas, entre otras.

Se ha atribuido a los bosques un papel positivo en la protección y regulación de flujos hídricos. Algunos autores afirman que las coberturas vegetales actúan como un agente regulador de inundaciones que absorbe las precipitaciones fuertes y ayuda,



además de evitar la erosión, a atenuar el caudal de salida ante un evento extremo. (Bruijnzeel, 1990, De La Torre, 2004). Estas afirmaciones no son totalmente aceptadas y aun existen hipótesis por comprobar (FAO, 2008), no obstante, el conocimiento común indica que los bosques son fundamentales, por una parte, en el control de inundaciones cuando las lluvias son altas, y, por otro lado, en el abastecimiento continuo del recurso cuando haga falta de ellas.

Sin embargo no todas las coberturas vegetales se comportan de la misma manera ante las precipitaciones (Sellers & Lockwood, 1981), esto es debido a factores propios de las plantas y de los suelos (Radersma *et al.* 2006), que generan que los procesos del ciclo hidrológico tales como el escurrimiento superficial, evaporación infiltración e interceptación varíen con el tiempo, todo esto determina la magnitud de aguas gravitacionales que alimentan las subterráneas, y que van a significar la regulación y la sostenibilidad de los caudales. (De Las Salas & García, 2000).

Los bosques cumplen un rol fundamental en la atenuación de crecientes. No obstante, el conocimiento del papel de diferentes coberturas en la regulación de este fenómeno es incierto y aun existe el debate entre la conveniencia de las coberturas naturales y las plantaciones de especies foráneas de rápido crecimiento en la regulación del ciclo hidrológico. En este estudio se determinó la influencia de 3 tipos de coberturas forestales (nativas e introducidas) y no forestales, en el control de crecientes mediante las herramientas de la modelación hidrológica.

Materiales y Métodos

La Figura 1 señala las etapas que siguió este proyecto, y la Figura 2 las ilustra en forma específica.



Figura 5: Etapas Generales del Proceso.

Área de Estudio

La cuenca alta del río San Cristóbal se encuentra al sur oriente de la ciudad de Bogotá DC, en una zona de reserva forestal de los cerros orientales que pertenece a la empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá DC (DELSA, 1986). Se ubica en las coordenadas geográficas X= 74° 01' 41" de latitud norte; y Y=04° 30' 42" latitud oeste. En un rango altitudinal de los 2900 msnm a los 3600 msnm. De acuerdo a los registros de las estaciones climatológicas de la empresa de acueducto de Bogotá la precipitación tiene un régimen monomodal con un promedio anual de 1225 mm, con los valores más altos a mediados del año. La temperatura media anual es de 13°C sobre la cota de los 3000 m.s.n.m. La humedad relativa presenta un régimen casi uniforme a lo largo del año, entre el 75 y el 80 %.

Caracterización de las Microcuencas

Se tuvo en cuenta, como características más representativas, las morfométricas, las de la cobertura vegetal, las relacionadas con los suelos y las hidrológicas. Estas variables se determinaron de forma separada para la microcuencas de Paloblanco, la Osa y La Upata, a partir de un sistema de información geográfica con ayuda del programa ArcGIS (ESRI, Redlands, CA, 2010)

Instrumentación

En cada microcuenca se instalaron dos máxímetros que se ubicaron en el punto de cierre, y con los que se tomó información durante un año. De la misma forma, en cada una de las microcuencas se instaló un pluviómetro.

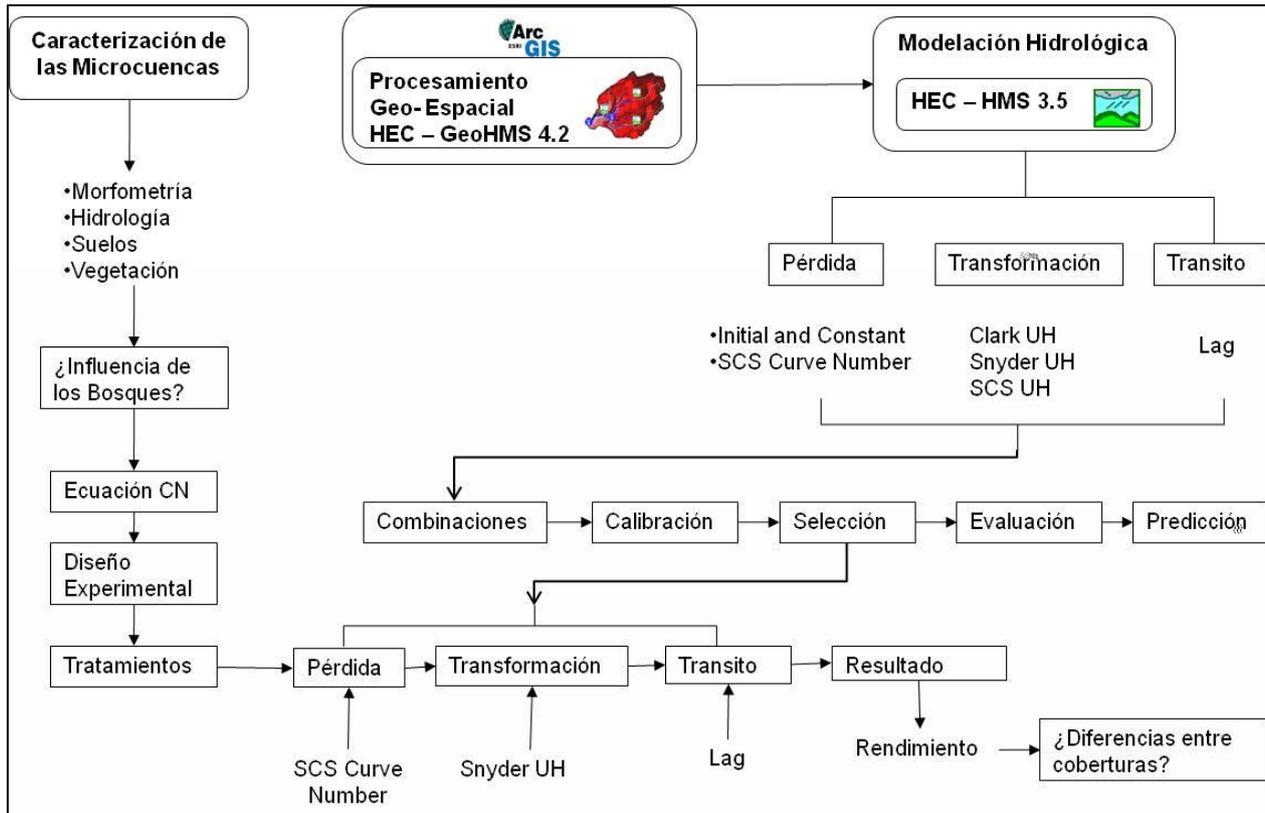


Figura 6. Etapas Específicas del Proceso.

Recopilación de la Información de Lluvias y Caudales Históricos

Se recogieron dos tipos de información: la primera relacionada con los datos históricos registrados por la estación Limnigráfica el Delirio de propiedad de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB). Para ello, se revisaron los niveles del río (limnigramas) de la estación y se identificaron eventos aislados de crecimiento del caudal. El segundo tipo de información fue la propiamente obtenida durante el año de la investigación. La toma de los datos se hizo diariamente.

Generación de Modelos

Se seleccionaron varios métodos para cada proceso, con los cuales se hizo el máximo número de combinaciones posibles.

Métodos de pérdida utilizados

Initial and Constant

Los datos de este método son el: Porcentaje de Área permeable de la cuenca, Tasa de infiltración del suelo y pérdida inicial. La tasa de infiltración del suelo, se estimó de acuerdo con los valores registrados por la tabla de grupos de Suelos del SCS y de tasas de Infiltración y la pérdida inicial fue un valor obtenido vía calibración.

La clasificación de los suelos en cada uno de los grupos del SCS y sus Tasas de Infiltración se obtuvieron del mapa de estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del departamento de Cundinamarca (IGAC, 2000). Las unidades identificadas fueron asignadas de un valor de infiltración en mm/h. Posteriormente con ayuda del SIG se calcularon las áreas de cada unidad dentro de cada microcuenca, esto permitió calcular un valor de infiltración ponderado de acuerdo con los valores de infiltración de cada unidad.

Curva Numero

El valor de la CN se obtuvo a partir de las tablas del SCS (SCS, 1972, 1986). Teniendo en cuenta la presencia de diferentes coberturas vegetales en cada una de las microcuencas, se realizó un análisis cualitativo con base en las visitas de campo y los muestreos realizados para determinar el valor de CN inicial. Después se elaboró un valor de CN compuesto en el cual de cada cobertura obtuvo una ponderación de acuerdo con el porcentaje de área en la cuenca, como lo muestra la siguiente ecuación:

$$CN_{COMPUESTA} = \frac{\sum A_i CN_i}{\sum A_i} \quad (1)$$

Donde A_i , es el área de la i -ésima cobertura y CN_i , es el valor de la CN de la i -ésima cobertura.



Métodos de escorrentía

Según los hidrogramas unitarios “HU”:

HU de Clark

Para los datos de entrada, el tiempo de concentración se halló de acuerdo con la caracterización morfométrica de las microcuencas. El coeficiente de Clark se encontró por calibración del modelo.

HU de SCS

El único dato que requiere este modelo es la identificación del lag o, tiempo de retardo. Este lag se halló bajo la siguiente relación con el tiempo de concentración (T_c):

$$\text{Lag} = 0.6 T_c$$

HU de Snyder

Este método requiere como datos de entrada, el lag y el coeficiente del pico. El Lag se halló de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$t_p = CC_t (LL_c)^{0.3} \quad (2)$$

Donde t_p es el Lag, C_t es el coeficiente de la cuenca, L es la longitud de la corriente principal, L_c es la longitud de la corriente principal hasta el centroide de la cuenca y C es la constante de conversión de 0.75 para SI

El coeficiente de la cuenca (C_t), se halló con base en las pendientes de la cuenca. El coeficiente del pico, el cual es el otro dato de entrada, se asoció con las características morfométricas de la cuenca, principalmente la pendiente. No obstante, estos valores fueron sometidos a proceso de calibración.

Métodos de tránsito

Dado que los tránsitos en este modelo, son relativamente cortos, se determinó utilizar el método del Lag. Para las dos secciones en donde se va a transitar el hidrograma, se determinó el tiempo de traslación a partir de la medida de la longitud de la sección, la pendiente y la rugosidad.

Combinaciones

Se realizaron 6 combinaciones que se muestran en la Tabla 1. Para cada combinación se simularon un total de 15 eventos. Los datos de entrada de cada método, fueron los hallados en los numerales anteriores, aquellos que pudieron ser medidos directamente, fueron estimados vía calibración.

Combinación	Pérdida	Escorrentía	Transito
1	Initial and Constant	Clark UH	Lag
2	SCS CN	Clark UH	Lag
3	SCS CN	SCS	Lag
4	Initial and Constant	SCS	Lag
5	Initial and Constant	Snyder	Lag
6	SCS CN	Snyder	Lag

Tabla 1. Combinaciones Utilizadas en la Modelación

Calibración

Una vez determinadas las variables que iban a alimentar el modelo, se procedió a correr simulaciones con los valores hallados. Después de esto se realizó una calibración para todos los eventos de una misma combinación. Esta calibración consiguió identificar el hidrograma calculado que mejor se ajustaba al hidrograma observado. Figura 3.

La calibración se logró mediante ensayos de optimización. Un ensayo de optimización es una búsqueda programada por un algoritmo que define cambios en los parámetros identificados para de esta forma acercar el valor calculado al observado, hasta cumplir con los criterios de búsqueda.

El cálculo de que tan bien se está acercando el valor calculado al observado se hace mediante la utilización de una función objetivo. Esta función es un algoritmo que evalúa las diferencias entre el caudal observado y el calculado, dándole valores grandes a aquellas simulaciones que no se acercan y valores bajos a los mejores resultados, siendo de esta forma el cero el valor obtenido cuando el ajuste es perfecto.

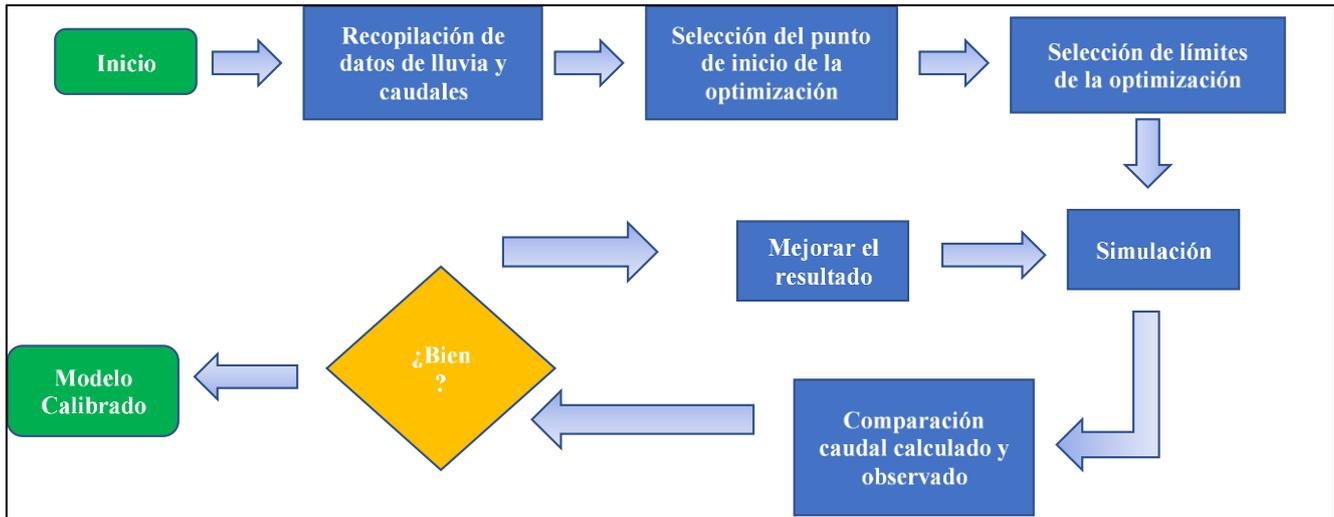


Figura 3. Procedimiento de la Calibración de Modelos

Selección de Modelos

Los aspectos tenidos en cuenta para la predicción de crecientes fueron la predicción de los caudales máximos, y de los tiempos de caudal máximo. Para medir el comportamiento de los modelos propuestos se definió una función matemática, que identificó el modelo que mejor representó los hidrogramas de las crecientes máximas.

Evaluación de Modelos

Una vez identificado el mejor modelo con la función objetivo, se procedió a evaluar el mismo con otros eventos que no fueron utilizados en la calibración. Este procedimiento se hizo de manera tal, que no solo se comprobara en el punto de cierre de la cuenca alta, es decir la Estación LM El Delirio, sino que también se hizo la evaluación en cada una de las tres microcuencas.

Predicción de crecientes

Para la predicción de crecientes se utilizó el concepto del caudal asociado a un posible riesgo de inundación, mas no se consideró un análisis del área inundable dado que el riesgo asociado a estas crecientes se encuentra en la parte media y baja, en donde la topografía es plana y existen urbanizaciones en las cuales el río se encuentra canalizado.

Por esta razón se hizo un análisis de la probabilidad de las lluvias, en donde se predijo las lluvias que ocurrirían con un periodo de retorno de 5, 15 y 25 años. Este análisis se hizo a partir de los registros históricos de lluvia máxima diaria de la estación pluviográfica del Delirio la cual contó con datos del año 1931 hasta el 2010. El análisis de probabilidad de las lluvias se hizo por el método de Gumbel.

Determinación de la Influencia de los Bosques

Para determinar la influencia de los bosques en la modelación, se definieron valores de curva número, de acuerdo con una ecuación propuesta que tuvo en cuenta: parámetros físicos, representados por el análisis de suelos y parámetros empíricos, representado por las tablas de curva número del servicio de conservación de suelos (SCS) de los Estados Unidos.

Resultados y Discusión

Los resultados de la predicción en inundaciones se hicieron para dos tipos de coberturas contrastantes, la primera vegetación actual y la segunda en caso hipotético de que solo existan coberturas no arbóreas en las microcuencas.

El hidrograma resultante es el obtenido en el punto de cierre denominado el Delirio y como se observa en la Figura 4, las predicciones se hicieron para eventos de lluvia extremos con periodos de retorno de 5, 15 y 25 años.

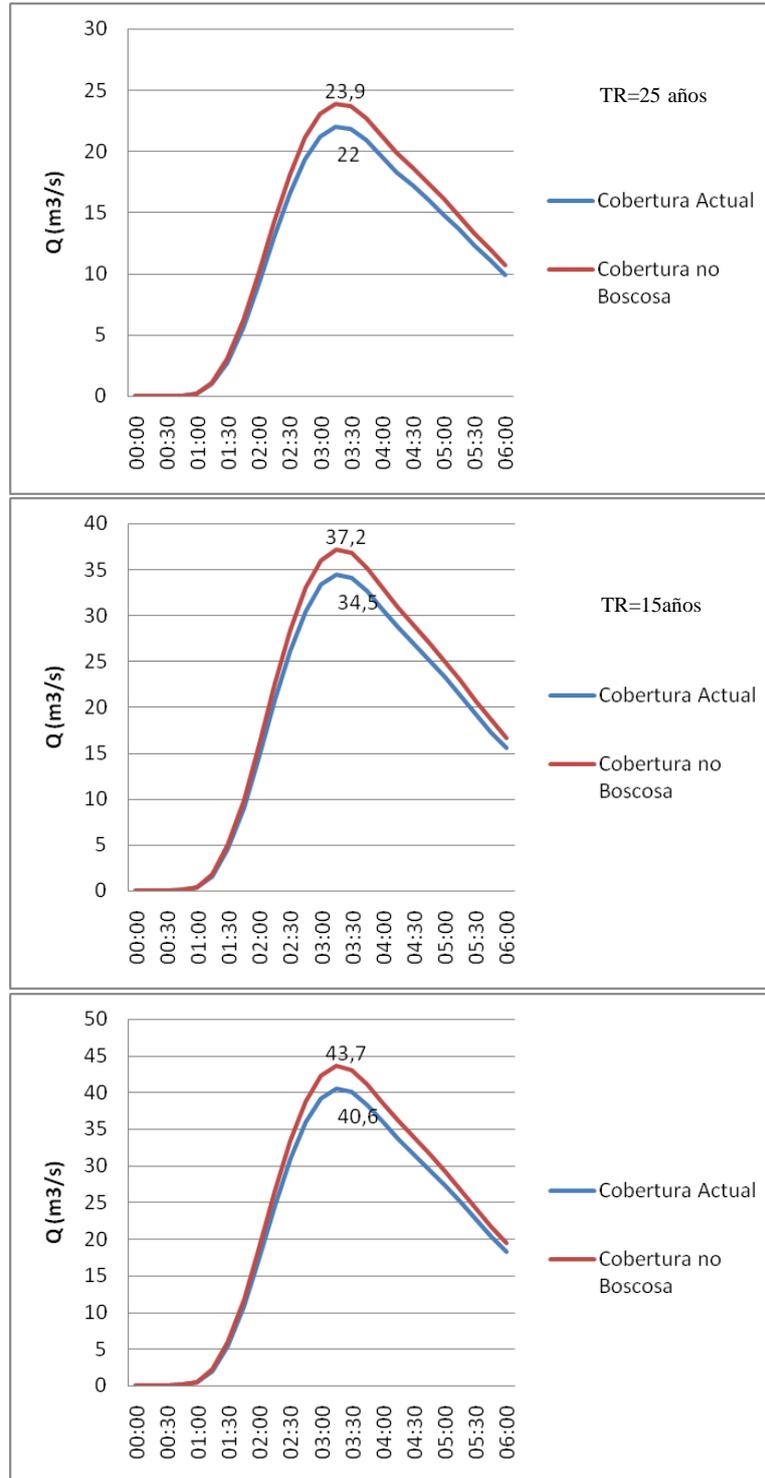


Figura 4. Predicción de Hidrogramas en la Estación El Delirio

Evento	Diferencia Caudal Pico ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Incremento
TR= 5 años	2	8.63 %
TR=15 años	2,5	7.82 %
TR=25 años	3,1	7.63 %
Promedio	2.53	8.03 %

Tabla 1. Diferencias en los Caudales por Cambio de Cobertura Boscosa para Diferentes Periodos de Retorno.

En la Tabla 2 se observa la diferencia del caudal pico en dos situaciones: la cobertura de bosques actual y la situación hipotética de la cobertura no boscosa. Se puede apreciar que las diferencias son menores y presentan un promedio de $2.53 m^3 \cdot s^{-1}$. Los incrementos porcentuales, fueron en promedio 8.03 %



.Evento	Diferencia Caudal Pico (m ³ /s ⁻¹)	Incremento
08-Jun-02	0,5	10,20 %
29-May-02	1,4	8,48 %
29-Oct-02	1,3	7,60 %
25-Jul-03	0,8	7,14 %
29-Oct-99	2,6	7,01 %
Promedio	1,32	8,08 %

Tabla 2. Diferencias en los Caudales pico por Cambio de Cobertura para los Eventos Máximos Registrados

En cuanto a las diferencias presentadas en los eventos de lluvia máxima, las diferencias fueron menores en términos absolutos pero mayores en términos porcentuales, presentado un promedio de 1.32 m³/s y 8.08 %, respectivamente. Tabla 3.

De acuerdo con el ANAVA utilizado en la evaluación de diferencias entre los tratamientos planteados: el real y el hipotético, se asevera que no existen diferencias significativas entre los tratamientos con un nivel de confiabilidad del 99.5 %. Tabla 4.

.Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	
				C	T
Tratamientos	1	12,78	12,78	0,0702	16,24
E.E.	14	2548,28	182,02		
Total	15	2561,06			

Tabla 3. ANAVA para las Diferencias dadas por los Cambios de Cobertura Boscosa en el Punto El Delirio

Los resultados obtenidos por otros autores con respecto a las variaciones del caudal pico dados por cambios en la cobertura vegetal de la cuenca son variables. Por un lado, autores como Guillemette *et al.* (2004), encontraron que después del aprovechamiento forestal a tala rasa del 85% de los bosques de pino (*Abies balsamea*) en una cuenca de 122 Has localizada en Montmorency Forest (Quebec, Canada), los cambios en el flujo fueron representados por reducciones en el tiempo de retardo (lag), y en el tiempo base. Así mismo, los incrementos en el caudal pico alcanzaron un valor máximo de 57%. Luego al comparar los datos de estudios hechos en 50 cuencas, se obtuvo que existió un promedio de 49% de aumento en el caudal pico cuando se remueve entre el 70 y el 100% de la cobertura forestal. Sin embargo otras cuencas tuvieron variaciones similares a las de este estudio, cercanas al 10 %.

Tremblay *et al.* (2008), determinaron que la hipótesis de que para que el incremento en los caudales pico no sobrepase el 50%, el área intervenida en aprovechamiento debería ser menor al 50%. Ellos concluyen que en cuencas pequeñas (>50 Has), estos incrementos en caudal picos son menores y que estas respuestas son potenciadas por fenómenos climatológicos como los ocurridos durante el huracán Katrina. Además, encontraron que pese a lo que se cree, los incrementos en el caudal pico no fueron mayores cuando las áreas aprovechadas correspondían a áreas cercanas a los drenajes.

Hay que considerar que los datos anteriores corresponden a bosques en su mayoría boreales y no a bosques tropicales. Estos bosques boreales presentan características de fisiográficas, climáticas de manejo forestal y de especies diferentes, además se comparan las condiciones iniciales y las condiciones después del aprovechamiento, las cuales son por lo general presentan cambios más marcados al principio hasta que después se establece la nueva cobertura, ya sea pastos, arbustos o bosque natural sucesional.

En ecosistemas europeos, Robinson *et al* (2003) encontraron que las coníferas, generalmente plantadas en suelos pobremente drenados y los eucaliptos del sureste de Europa son las situaciones en las que pueden presentar las mayores variaciones en caudal pico. Por último concluyen que cambios de otro tipo de coberturas a escala regional producen leves cambios tanto en los caudales pico como en los caudales bajos.

Consideraciones Finales

Los bosques no influyen significativamente en eventos de precipitación extrema. No obstante, algunas diferencias son observables cuando se comparan con vegetación no boscosa. La respuesta del hidrograma, específicamente el caudal pico alcanzado por este, depende primordialmente de la intensidad de la precipitación y de las características morfológicas de la cuenca hidrográfica.

La influencia de los bosques en la regulación de eventos extremos, es trascendente si se compara con las coberturas no boscosas, como vegetación de paramo, arbustos y pastos, esto es debido al incremento porcentual en el caudal pico cuando se contrastan estas coberturas, lo que no ocurrió al analizar diferencias significativas entre bosques. Además, se evidencio que entre mayor el tiempo de retorno, mayor la diferencia entre regulación de caudal pico de las cobertura boscosa y no boscosa.

La morfometría influye de manera significativa en el tamaño del caudal pico. Esto se evidencia, a partir de la observación de los caudales picos de La Osa que pese a ser más pequeña que la microcuenca Paloblanco, presenta hidrogramas más agudos y por consiguiente niveles más altos. Concluyendo que no existe una relación lineal entre área de la microcuenca y los caudales pico generados, relación que si existe cuando se habla en términos de volumen.



A nivel del balance hídrico, dentro de los bosques estudiados, se infiere que las pérdidas por interceptación, evaporación y demás, son mínimas con relación a la infiltración y posterior escorrentía. Esto se debe a que en un evento de pocas horas donde caen varios centímetros de lluvia, algunos procesos como la evapotranspiración, evaporación del agua del suelo y de las copas, se presentan en una escala temporal mayor y son menores en cantidad de agua en movimiento.

Las microcuencas no se pueden considerar muestras dentro del diseño ya que estas presentan características únicas que no permiten que sean comparables entre sí, por ejemplo la microcuenca de La Osa se observa que los valores de rendimiento, en términos de caudal pico, son mucho mayores que en las otras dos microcuencas, debido a ser una cuenca torrencial, con pendientes fuertes y bajo tiempo de concentración.

A pesar de que en el suelo del bosque no se observe escorrentía superficial directa, si puede haber un movimiento de agua a nivel del suelo, en el denominado flujo sub-superficial que va a alimentar el drenaje más cercano. No obstante los movimientos del agua bajo el suelo son diferentes, así que futuras investigaciones relacionadas con la modelación de la escorrentía bajo el bosque deberán tener en cuenta diferentes tiempos de concentración que suceden en este complejo sistema.

Los incrementos porcentuales fueron mayores en los eventos de lluvia reales, que en los eventos con un periodo de retorno determinado, pese a que la magnitud de la lluvia fue mayor en los últimos. Esto indica que la respuesta del hidrograma también está condicionada por las características del hietograma (*i.e.* la intensidad de la lluvia efectiva en cada uno de los intervalos de tiempo)

Agradecimientos

A los profesores, Miguel Cadena, Robert Leal y Germán Hurtado del Proyecto Curricular de Ingeniería Forestal de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, D.C.

A los Ingenieros de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá Carlos Bello, Ricardo Rosero y Gustavo Herrán.

A los guardabosques de la Empresa de acueducto, Reynaldo Vanegas y Jairo.

A los integrantes del semillero de investigación en Hidrología Forestal, SHIF Alexander Castillo y Alfonso Triana .

A los estudiantes de Mediciones Forestales de 2010-I, y en especial al Monitor Fabián Herrera y a María Catalina Becerra.

A nuestros amigos, María Fernanda Garrido, Nataly Andrea García, Lady Carolina Parra, Daniel León (Mono), Iván Camilo Rodríguez y José Luis Vergara.

Referencias Bibliográficas

Bruijnzeel, L.A. 1990. Hydrology of Moist Tropical Forests and Effects of Conversion: a State of Knowledge Review. Humid Tropics Programme, IHP-UNESCO, Paris, and Vrije Universiteit, Amsterdam, 224 p.

Cantú, I. & Takenobu, O. 1996. Throughfall, stemflow and interception loss in a mixed white oak forest (*Quercus serrata* Thunb.) Journal of Forest Research: 1(3): 123- 129

Crockford, R. & Richardson, D. 2000. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. Hydrol. Process. 14, 2903-2920.

De la Torre, E. 2004. Hidrología de Superficie. Editorial Fondo de Publicaciones del la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Apuntes de Clase. Colombia. Bogotá DC. 198 pg.

De las Salas, G. & García, C. 2000. "Balance hídrico bajo tres coberturas contrastantes en la cuenca del río San Cristóbal". Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Separata, Volumen XXIV, NÚMERO 91, <http://77www.accefyn.org.co/Publicad/rev/rev.htm/> Fondo FEN, Bogotá.

DELSA Ltda. 1986. Plan de Aprovechamiento de las plantaciones de Ciprés y Eucalipto de la cuenca hidrográfica del río San Cristóbal. Bogotá, 2 volúmenes.

Departamento Nacional de Planeación, DNP. 2006. Plan Nacional De Desarrollo 2006 - 2010. URL: <http://www.dnp.gov.co/PortalWeb/tabid/54/Default.aspx>. (F consulta: 2008 02 14).

FAO, 2008. Forests and water. A thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005. Rome, 78 p.

Feldman, A. 2000. Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center Davis. California. Estados Unidos. 149p.

Guillemette, F. Plamondon, A. Prévost M. & Lévesque, D. 2004. Rainfall generated stormflow response to clearcutting a boreal forest: peak flow comparison with 50 world-wide basin studies. Journal of Hydrology. Volume 302. Pg 137- 153

Hamilton, L.S. & King, P.N. 1983. Tropical forested watersheds: hydrologic and soils response to major uses or conversions. Boulder, Colorado, USA, Westview Press.



- Hawkins, R.H. 1984. A comparison of predicted and observed runoff curve numbers. In: Proceedings of the Special Conference, held in Flagstaff, Arizona, Irrigation and Drainage Division, American Society of Civil Engineers, New York.
- Hewlett, J.D. & Helvey, J.D. 1970. Effects of forest clear-felling on the storm hydrograph. *Water Resources Research*. 6(3): 768-782.
- Hornbeck, J.W. 1973. Storm flow from hardwood-forested and cleared watersheds in New Hampshire. *Water Resources Research*. 9(2): 346-354.
- Huber, A. Barriga, P. Trecaman, R. 1998. Efecto de la Densidad de Plantaciones de *Eucalyptus nitens* Sobre el Balance Hídrico en la Ona e Collipulli IX Region (Chile). *Bosque* 19(1): 61-69.
- Hydrologic Engineering Center. 1990. HEC-I Flood Hydrograph Package User's Manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. Davis, California. EU.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC. 2000. Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del departamento de Cundinamarca. Bogotá DC
- Ives, J.D. & Messerli, B. 1989. The Himalayan dilemma: reconciling development and conservation. United Nations University. London and New York, Routledge.
- Levia, D.F. Bollinger, W.C. and Hrabik, R.A. 2005. Evaporation of intercepted precipitation from fruit litter of *Liquidambar styraciflua* L. (sweetgum) in a clearing as a function of meteorological conditions. *International Journal of Biometeorology* 49 (5): 325-331.
- Liu, L & Liu, J. 2008. A rainfall interception model for inhomogeneous forest canopy. *Frontiers or forestry in China*, 3(1): 50 – 57.
- Radersma, S. Ong, C.K. & Coe, R. 2006. Water Use of Tree Lines: Importance of Leaf Area and Micrometeorology in Sub-Humid Kenya. *Agroforestry Systems*: 66 (3): 179- 189
- Robinson, M. Cognard-Plancq, A. C. Cosandey, J. David, P. Durand, H. -W. Führer, R. Hall, M. O. Hendriques, V. Marc, R. McCarthy, M. McDonnell, C. Martin, T. Nisbet, P. O'Dea, M. Rodgers, Zollner, A. 2003. Studies of the impact of forests on peak flows and baseflows: a European perspective *Forest Ecology and Management*, Volume 186, Issues 1-3, 5, Pages 85-97
- Scharffenberg, W. & Fleming, M. 2009. Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center Davis. California. Estados Unidos. 298p.
- Sellers, P.J & Lockwood, J. G. 1981. A numerical simulation of the effects of changing vegetation type on surface hydroclimatology. *Climatic Change*: 3 (2): 121- 136
- Silva, G. 1986. Hidrología Básica. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C.
- Smart, J. 1972. Channel networks. *Adv Hydrosoci* 8:305–346
- Soil Conservation Service, SCS. 1972 National engineering handbook, sec. 4: hydrology, soil conservation service (SCS). USDA, Washington, D.C.
- Soil Conservation Service, SCS. (1986) National engineering handbook, sec. 4: hydrology
- Tremblay, Y. Alain N. Rousseau, André P. Plamondon, Denis Lévesque, Sylvain Jutras 2008. Rainfall peak flow response to clearcutting 50% of three small watersheds in a boreal forest, Montmorency Forest, Québec *Journal of Hydrology*, Volume 352, Issues 1-2, 30 April 2008, Pages 67-76.
- Van der Hammen, T. & Gonzales, E. 1963. Historia de Clima y la Vegetación del Pleistoceno Superior y del Holoceno de la Sabana de Bogotá. *Boletín Geológico* V. XI (1-3)
- Woolhiser, D, A. Smith R E and Goodrich D, C. 1990. KINEROS, Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual. USDA-ARS, ARS 77, Washington D.C., USA.



INUNDAÇÕES NO ESTADO DO ACRE, NA AMAZÔNIA BRASILEIRA: EVENTOS DE 2015, IMPACTOS E DESAFIOS

1George Luiz Pereira Santos, 2Lucas Barbosa e Souza; 3Maria Teresa Fidélis da Silva

1 PPGCIAMB/UFT-TRPP/UA, e-mail: george.santos@uft.edu.br; 2 PPGCIAMB-UFT, e-mail: lbsgeo@uft.edu.br

3 Departamento de Ambiente e Ordenamento - DAO/UA-Portugal, e-mail: teresafidelis@ua.pt

Palavras-chave: Percepção de riscos; Resiliência; Governança

Resumo

Inundações são processos estressores e perturbadores do ambiente em que ocorrem. Este artigo tem o objetivo de analisar, sob a ótica dos impactos, a maior inundação que se tem registro na cidade de Rio Branco, capital do estado do Acre, na Amazônia Sul-Occidental brasileira. Pretende-se, ainda, propor medidas para a redução de riscos e minimização de impactos. No ano de 2015 o nível do Rio Acre atingiu a marca histórica de 18,40m (4,40m acima de sua cota de transbordamento). Como consequência, foram 32 dias em situação de submersão de uma área superior a 4.500ha da área urbana do município, mais de cem mil afetados e uma quantidade superior a dez mil desabrigados. Os danos (humanos e materiais) e prejuízos (econômicos e sociais) superaram o montante de quinhentos milhões de reais. Para a análise proposta, a pesquisa centrou-se em uma revisão de literatura de trabalhos sobre percepção de riscos, resiliência e governança, no sentido de acolher contributos teóricos e estudos de caso voltados para estas temáticas, análises de relatórios, planos e documentos oficiais, bem como pesquisa em banco de dados oficiais. Os resultados mostraram impactos negativos severos de ordem social e econômica na população afetada e requerem, no contexto subjetivo (individual e comunidade), institucional e da governança, de ferramentas e mecanismos que conduzam à redução dos riscos de sua ocorrência e minimização de seus impactos. Prevenção e preparação para o seu enfrentamento perpassam pelos aspectos da capacidade adaptativa, participação social, fortalecimento das instituições e da governança dos riscos.

Keywords: Risk Perception; Resilience; Governance

Abstract

Floods are stressful and disruptive processes in the environment in which they occur. This article aims to analyze, from the perspective of impacts, the largest flood ever recorded in the city of Rio Branco, capital of the state of Acre, in the Brazilian South-Western Amazon. It is also intended to propose measures to reduce risks and minimize impacts. In 2015, the level of the Acre River reached the historic mark of 18.40m (4.40m above its overflow level). As a consequence, there were 32 days in a situation of submergence of an area of more than 4,500ha of the municipality's urban area, more than one hundred thousand affected and more than ten thousand homeless. five hundred million reais. official plans and documents, as well as research in official databases. The results showed severe negative social and economic impacts on the affected population and require, in the subjective (individual and community), institutional and governance context, tools and mechanisms that lead to the reduction of the risks of their occurrence and minimization of their Preventing and preparing to deal with them involves aspects of adaptive capacity, social participation, strengthening institutions and risk governance.

Introdução

Inundações são eventos estressores e perturbadores do ambiente em que ocorrem. Essa modalidade de desastres, entre os anos de 1900 e 2021, apresentou-se como a mais impactante, em termos globais (EM-DAT, 2021). Em decorrência das alterações climáticas, as inundações estão cada vez mais frequentes e com intensidade mais severa (MARENGO et al, 2009). Eventos extremos do clima, relacionados à crise climática, somente alcançam o reconhecimento político quando a ordem social é afetada (ZANGALLI JÚNIOR, 2024). As inundações resultam da interação entre elementos físico-naturais (chuvas e dinâmica fluvial) e sociais (ocupação de áreas suscetíveis). Ameaças (processos hidrometeorológicos) e vulnerabilidades (exposição social), em interação, dão origem aos riscos (SOUZA; ZANELLA, 2010). Os riscos, quando concretizados, dão origem aos desastres e, por apresentarem características multidimensionais, configuram-se quase sempre como riscos híbridos (MENDONÇA; BUFFON, 2021). No contexto socioespacial, o ser humano assume um papel de agressor e de vítima do ambiente que ocupa (VEYRET, 2007), pois impõe transformações que findam por torná-lo vulnerável aos consequentes efeitos negativos dessas alterações.

Percepção de riscos, resiliência e governança são alguns dos caminhos que podem contribuir para a redução de riscos de inundações e minimização de impactos e efeitos negativos. Neste sentido, a percepção de riscos pode ser compreendida como o conjunto de atributos subjetivos (o que envolve medo, preocupação, experiências, aprendizados, incertezas e comportamentos) que dão suporte ao indivíduo para encarar as adversidades de um desastre (MOTOKI et al, 2014; S. BIRKHOLZ et al, 2014). Em pesquisas sobre percepção de riscos se identifica a ausência de um padrão metodológico, o que acarreta a dificuldade em comparar os estudos em torno dessa temática (KELLENS et al, 2013). A frequência com que eventos de inundação ocorrem pode definir o modo de percepção de um indivíduo que foi afetado (LECHOWSKA, 2018) e implicar no seu comportamento



para enfrentar esse tipo de elemento estressor. As condutas dos indivíduos, sob a ótica da prevenção, da preparação e da resposta, denotam a existência ou não de capacidade adaptativa frente a eventos frequentes (LOPEZ-MARRERO, 2010). Vinculados à percepção de riscos, são necessários os devidos ajustamentos, a partir de inundações ocorridas, e, no caso de ocorrências futuras, deve haver o aperfeiçoamento das condutas, com vistas à minimização dos impactos (CALGARO; VILLENEUVE, 2020; CURTIS et al, 2022). Juntamente com a capacidade adaptativa, a comunicação de riscos desenvolve um papel importante para a percepção de riscos. A geração e a difusão da informação mantêm as pessoas cientes e atualizadas sobre a possibilidade de ocorrência de inundações e, dessa forma, as tornam mais preparadas (KAMMERBAUER; MINNERY, 2019). Normas sociais que interfiram em comportamentos, em aspectos psicológicos e na comunicação de riscos favorecem atitudes mais eficazes frente às inundações (LIM et al. 2022; SANTORO et al. 2022).

Também associada à percepção de riscos, a resiliência surge como um fator agregador no que tange às ações de resposta e de recuperação em um cenário de desastre. Conceitualmente, pode ser compreendida como uma condição que permite fortalecer as capacidades, a flexibilidade para a sobrevivência, o aprendizado e a adaptação necessária para lidar com a imprevisível mudança (BUSCHBACHER, 2014; BACHRACH; ZAUTRA (1985). A participação da comunidade, sua capacidade adaptativa, a comunicação de riscos e a governança, no campo da resiliência, são igualmente mecanismos que conferem papéis importantes em circunstância de inundações. As pesquisas sobre resiliência a desastres encontram-se, ainda, incipientes na América Latina e no Caribe. Estudos voltados para a incorporação de tecnologias, maior robustez de dados, o papel dos sistemas naturais e as interações dos efeitos na bacia hidrográfica afetada, são alguns dos campos a serem explorados (PINOS; QUESADA-ROMÁN, 2022). Quando se fala em resiliência, é preciso repensar os sistemas de planejamento frente às mudanças climáticas, riscos naturais e desastres (BIRKMANN et al, 2014). A governança dos riscos, face à vulnerabilidade de comunidades expostas ao perigo, deve observar os conhecimentos tradicionais e a participação das estruturas sociais locais no direcionamento das ações a serem desencadeadas, em circunstâncias de ameaças climáticas (IOCCA; FIDÉLIS, 2018; 2021). O fato de a resiliência abranger o campo da multidisciplinaridade faz com que os aspectos socioecológicos se beneficiem da efetiva participação da comunidade, das instituições e de especialistas (ZEVENBERGER et al, 2020), juntamente com a construção e o aperfeiçoamento contínuo de uma resiliência empírica (ASADZADEH et al, 2015).

O Estado do Acre, localizado na região norte do país, na porção mais ocidental da Amazônia brasileira, tem sido afetado, nos últimos 30 anos, por eventos frequentes e intensos de inundações. No caso em estudo, o município de Rio Branco (capital do estado) teve a quebra severa de normalidade por repetidos eventos. O objetivo deste artigo é fazer uma análise das inundações ocorridas em Rio Branco, no ano de 2015, bem como propor medidas que venham a reduzir os riscos e a minimizar os impactos desses eventos hidrológicos que afetam a ordem social, econômica e ambiental da população local. A pesquisa assentou-se na revisão de literatura sobre percepção de riscos, resiliência e governança, aliada a uma pesquisa exploratória em planos de contingência para inundações e relatórios institucionais. Buscou-se, ainda, informações sociodemográficas e hidrometeorológicas em banco de dados oficiais. Tais fontes e procedimentos nortearam a pesquisa do ponto de vista metodológico.

Material e métodos

Conforme o exposto, esta pesquisa assentou-se metodologicamente nos seguintes passos: (a) revisão de literatura; (b) exploração de relatórios/documentos institucionais e (c) pesquisas em banco de dados oficiais. Para a **revisão de literatura**, procedeu-se à imersão nos conteúdos teóricos e em estudos de caso sobre percepção de riscos, resiliência e governança dos riscos no sentido de verificar as contribuições da literatura para a temática desenvolvida e alcance dos resultados propostos. Tal procedimento buscou as bases científicas necessárias para o embasamento do trabalho. Em decorrência da gama de trabalhos, selecionou-se aqueles com maior alinhamento, convergência e adequabilidade no contexto da pesquisa. Entretanto, é válido ressaltar que, em função da amplitude de trabalhos existentes, a literatura selecionada faz um recorte teórico e de estudos de casos sobre enfrentamento de desastres por inundações, que se mostraram suficientes para o embasamento desejado. No campo dos **documentos institucionais**, procurou-se, uma robusta visualização do cenário do desastre. Foram analisados os planos de contingência para inundações em Rio Branco, relatórios de avaliação de danos e prejuízos, decretos de situação de emergência, objetivando descrever as inundações ocorridas na capital do estado, em 2015, bem como caracterizar a sua ocorrência, impactos e consequências à população afetada, sob a ótica econômica, social e ambiental. As pesquisas exploratórias em **bancos de dados oficiais** (Agência Nacional de Águas – ANA, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE e EM-DAT-EmergencyDatabase) permitiram analisar os aspectos sociodemográficos e hidrometeorológicos, a elaboração de mapas e a verificação da dinâmica fluvial durante as inundações daquele ano. Por fim, foram consolidadas as informações e realizadas as análises no sentido de apontar as possíveis medidas para o enfrentamento desses eventos e minimização de seus impactos.

Resultados e discussão

Integrante da regional administrativa do Baixo Acre, a regional com maior número de municípios, Rio Branco possui uma área de 8.835km² e 364.756 habitantes (IBGE, 2022). A imagem a seguir (Figura 1) mostra o mapa da regional do Baixo Acre, com destaque para Rio Branco.

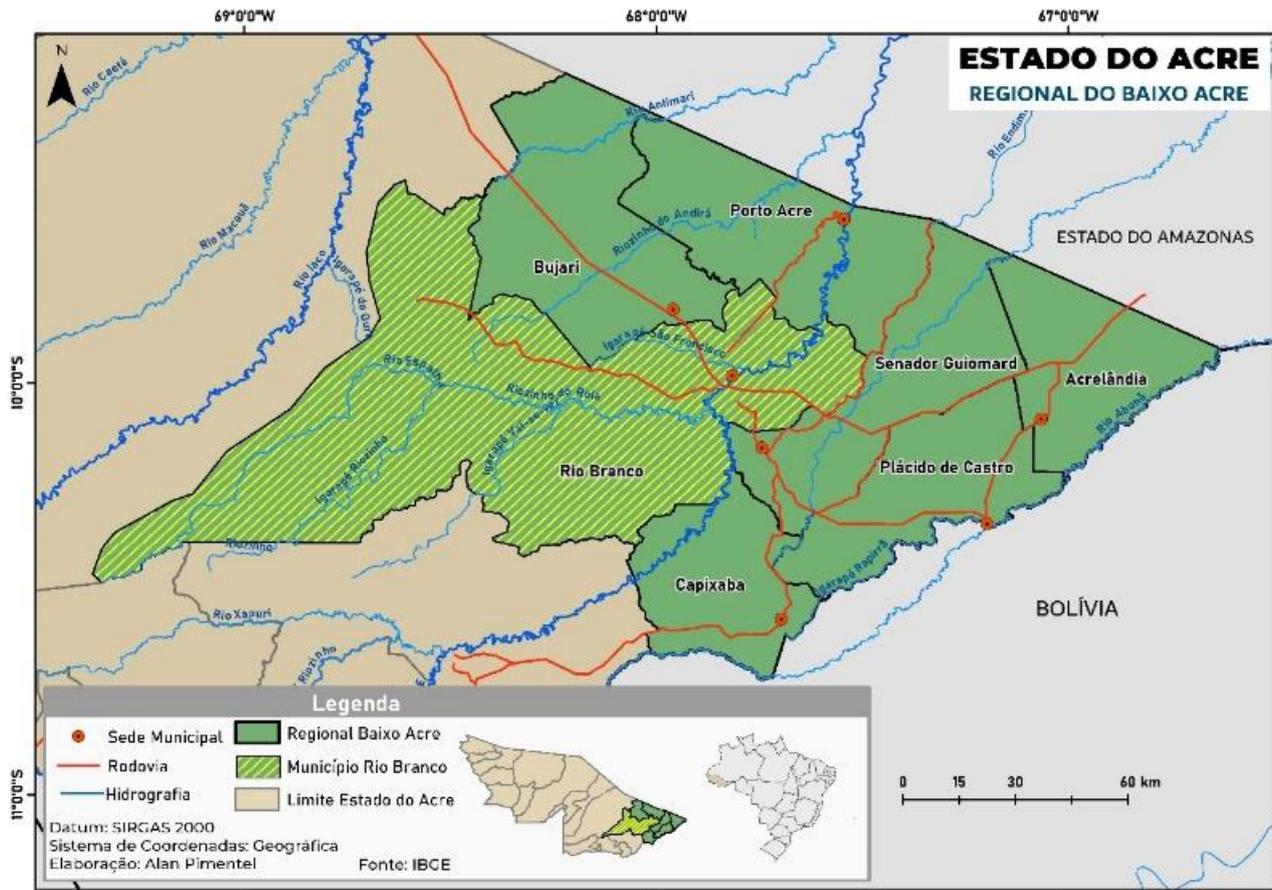


Figura 1 - Mapa da regional do Baixo Acre com destaque

Os registros indicam uma situação em que, ao longo dos anos, os intervalos entre as inundações estão mais próximos. Historicamente, na cidade de **Rio Branco**, há registros de inundações de grande magnitude, com danos e prejuízos consideráveis à população atingida. Os anos de 1988 e de 1997 tiveram inundações extraordinárias, ainda que em um intervalo de tempo de nove anos. Eventos sequenciais ocorreram entre os anos de 2009 e 2015, com magnitudes variadas, sendo que as inundações de 2015 traduziram-se nas maiores já registradas (DOLMAN et al, 2018). Em um intervalo de tempo menor, as inundações de 2012 e de 2015 atingiram proporções consideradas extraordinárias (RIO BRANCO, 2019). Válido ressaltar que o processo de formação do espaço urbano de Rio Branco ocorreu às margens do Rio Acre (SOUZA, 1995), na área que compreende a planície de inundação deste curso d'água, onde habita uma parcela considerável da população do município. Tal condição de vulnerabilidade ambiental associa-se às condições socioeconômicas desfavoráveis, o que torna a exposição ao perigo das inundações fator preponderante à ocorrência de danos e prejuízos de grande magnitude.

Desde 1970, o Rio Acre, em Rio Branco, tem a sua cota monitorada diariamente de duas formas: por observação visual da régua limimétrica e por telemetria (iniciada em 2012), sendo esta, a partir de uma estação telemétrica que transmite dados fluviométricos (cota do Rio) e pluviométricos (dados de chuva). Esse monitoramento é mantido pelo trabalho em conjunto da Agência Nacional de Águas (ANA), Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Políticas Indígenas (SEMAPI) e Coordenadoria Estadual de Proteção e Defesa Civil do Estado do Acre (CEDEC-AC).

A inundação do ano de 2015 foi a maior já registrada e trouxe consigo efeitos negativos severos, tornando-se um marco histórico para a cidade de Rio Branco e sua população. Iniciando a análise desse desastre, o Gráfico 1 descreve a cota do Rio Acre, em Rio Branco, nos meses de janeiro a abril daquele ano.

O comportamento do nível do Rio Acre nos primeiros quatro meses de 2015 está evidenciado no Gráfico 1 (linha azul) e demonstra uma situação de tranquilidade até o fim do mês de fevereiro (dia 23), quando supera a cota de transbordamento, atingindo 14,54m. Onze dias depois, atingiria os 18,40m, caracterizando o evento de 2015 como uma inundação extraordinária e a maior já registrada na capital do Estado. Ao todo, foram 32 dias em situação de transbordamento (círculo indicativo no Gráfico 1), de 22 de fevereiro a 24 de março, sendo sete dias acima dos 17,00m (limite inferior de uma inundação extraordinária) e quatro dias acima dos 18,00m, conforme monitoramento da Coordenadoria Municipal de Proteção e Defesa Civil de Rio Branco (RIO BRANCO, 2019).

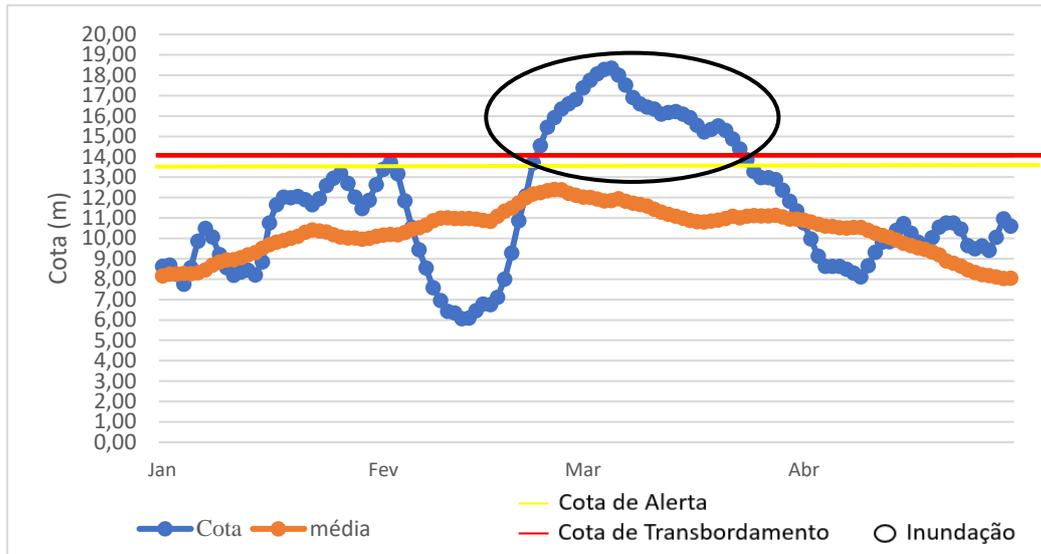


Gráfico 1 - Cota do Rio Acre em Rio Branco – 2015 (Jan a Abr)

Fonte: Elaborado pelos autores, a partir da Agência Nacional de Águas e Coordenadoria Municipal de Proteção e Defesa Civil

A Tabela 1 mostra a evolução da inundação de 2015, conforme a dinâmica de elevação do Rio Acre e a quantidade de pessoas afetadas (desabrigados).

Tabela 1 - Padrão evolutivo da inundação de 2015 em Rio Branco - AC

Data	Nível (m)	Desabrigados	Condição Decretada	Abrigos
23/fev	14,74	107	SE	1
27/fev	16,60	2.511	SE (ampliada)	1
01/mar	17,44	5.162	ECP	3

Fonte: Elaborado pelo primeiro autor, a partir de Rio Branco (2015a), (2015b) e 2015c)

De acordo com a Tabela 1, com o Rio Acre ao nível de 14,74m (dia 23 de fevereiro), foi decretada Situação de Emergência (SE) pelo prefeito de Rio Branco. Na referida data, já existiam mais de cem pessoas que tiveram que deixar suas residências, sendo acolhidas no primeiro abrigo (Parque de Exposição) instalado para o recebimento dos desabrigados (RIO BRANCO, 2015a). O padrão evolutivo do desastre agravou o cenário de anormalidade (Rio Acre atingiu a cota de 16,60m no dia 27 de fevereiro), sendo necessário publicar um novo decreto incorporando novas áreas e pessoas afetadas, uma vez que já estava acolhido no abrigo um quantitativo superior a 2.500 pessoas (RIO BRANCO, 2015b). Seguindo comportamento de elevação progressiva, o Rio Acre atingiu o nível de 17,44m (1º de março), obrigando o poder público municipal a decretar Estado de Calamidade Pública (ECP). Em três abrigos públicos já se contabilizavam mais de 5.100 pessoas desabrigadas. No dia 5 de março, o Rio Acre atingia a marca histórica de 18,40m.

Com relação aos efeitos negativos, as Tabelas de 2 a 7 mostram os danos e prejuízos decorrentes da inundação de 2015, tendo como base o constante no Formulário de Informação sobre Desastres – FIDE (RIO BRANCO, 2015d), preenchido por uma equipe multidisciplinar que envolveu integrantes de vários órgãos e secretarias. Válido ressaltar que o referido instrumento não reflete o cenário alcançando pelo pico da inundação, uma vez que foi realizado com o Rio Acre ao nível de 17,44m (em 1º de março), e, até o dia 5 de março o quadro agravou-se ainda mais, atingindo os 18,40m.



Tabela 2 - Danos humanos da inundação em Rio Branco – AC (até 01 mar 2015)

Danos Humanos Quantidade de Pessoas	Total
Mortos	1
Feridos	—
Enfermos	1.799
Desabrigados	5.160
Desalojados	14.500
Desaparecidos	—
Outros	50.106
Total de afetados	71.566

Fonte: Elaborado pelo primeiro autor, a partir de Rio Branco (2015d)

A situação constante na Tabela 2 demonstra uma quantidade significativa de danos humanos. Com mais de 70.000 afetados, sendo 5.160 desabrigados e 14.500 desalojados, o evento de 2015 representou efeitos negativos consideráveis para a população atingida. Registrou-se, ainda, um óbito ocasionado por descarga elétrica. A Tabela 3 faz a descrição dos danos ambientais ocorridos com o evento de 2015.

Tabela 3 - Danos ambientais da inundação de 2015, em Rio Branco-AC

Discriminação	Sim	Não	População atingida no município
Poluição ou contaminação água	X		Mais de 20% da população afetada
Poluição ou contaminação ar		X	
Poluição ou contaminação solo	X		Mais de 20% da população afetada
Diminuição ou exaurimento hídrico		X	

Fonte: Elaborado pelo primeiro autor, a partir de Rio Branco (2015d)

Os danos ambientais estão descritos na FIDE (RIO BRANCO, 2015d) e demonstrados na Tabela 3, definindo, basicamente, suas extensões em termos percentuais para água (mais de 20% da população afetada), ar (de 10% a 20% da população afetada) e solo (mais de 20% da população afetada). Podem ser descritos como efeitos negativos ao ambiente o acúmulo de lixo (resíduos sólidos e entulhos) transportados pela água durante o processo de elevação, afetando ruas, casas e terrenos. A contaminação de poços tubulares e rede de drenagem potencializa a proliferação de doenças de veiculação hídrica. Os danos ambientais foram contabilizados em mais de R\$ 7.000.000,00 (sete milhões de reais) que, quando atualizados monetariamente, atingiram o valor de quase R\$ 15.000.000,00 (quinze milhões de reais). A Tabela 4 descreve os danos materiais ocasionados pela inundação de 2015.

Tabela 4 - Danos materiais da inundação em Rio Branco – AC (até 01 mar 2015)

Tipo	Quantidades Destruidas	Quantidades Danificadas	Valor (R\$)
Instalações Públicas de Saúde	—	13	5.200.000,00
Instalações Públicas de Ensino	—	20	12.000.000,00
Inst. Púb. Prest de Outros Serviços	—	—	—
Instalações Públicas de Uso Comunitário	—	—	—
Unidades habitacionais	—	29.000	14.000.000,00
Obras de Infraestrutura Pública	—	15	25.000.000,00
Total			56.200.000,00
Atualização monetária			108.339.515,28

Fonte: Elaborado pelo primeiro autor, a partir de Rio Branco (2015d)

Os danos materiais constantes na Tabela 4 (com informações até 1º de março) descrevem o comprometimento de diversos segmentos de prestação de serviços públicos (saúde, ensino, infraestrutura e habitação). No segmento saúde, identificaram-se treze Unidades Básicas de Saúde parcial ou totalmente afetadas, prejudicando o atendimento da população que teve a vulnerabilidade potencializada pela inundação. A valoração dos impactos nas instalações de saúde foi totalizada em R\$ 5.200.000,00 (cinco milhões e duzentos mil reais). Um total de vinte instalações públicas de ensino foram de alguma forma



afetadas e totalizaram R\$ 12.000.000,00 (doze milhões de reais) em danos materiais. Até o momento da elaboração da FIDE, um total de 4.000 unidades habitacionais foram danificadas, perfazendo R\$ 14.000.000,00 (catorze milhões de reais). Os danos à infraestrutura pública (ruas, obras de arte e demais aparelhos públicos) totalizaram 15 unidades atingidas e alcançaram a cifra de R\$ 25.000.000,00 (vinte e cinco milhões de reais). O total dos danos materiais foi superior a R\$ 56.000.000,00 que, atualizados monetariamente, contabilizam um valor superior a R\$ 108.000.000,00 (cento e oito milhões de reais). A seguir, a Tabela 5 detalha os prejuízos econômicos.

Tabela 5 - Prejuízos econômicos decorrentes da inundação em Rio Branco – AC (até 01 mar 2015)

Serviços Essenciais Prejudicados	Valor para Restabelecimento (R\$)
Assistência Médica, Saúde Pública e Atendimento de Emergências Médicas	5.450.000,00
Abastecimento de Água Potável	8.600.000,00
Esgoto de Águas Pluviais e Sistema de Esgotos Sanitários	2.850.000,00
Sistema de Limpeza Urbana e de Recolhimento e Destinação do Lixo	4.300.000,00
Sistema de Desinfestação/Desinfecção do Habitat/Controle de Pragas e Vetores	3.000.000,00
Geração e Distribuição de Energia Elétrica	505.000,00
Telecomunicações	563.000,00
Transportes Locais, Regionais e de Longo Curso	32.000.000,00
Distribuição de Combustíveis, especialmente os de Uso Doméstico	—
Segurança Pública	942.000,00
Ensino	720.000,00
Valor Total dos Prejuízos Públicos	58.930.000,00
Atualização monetária	121.705.050,26

Fonte: Elaborado pelo primeiro autor, a partir de Rio Branco (2015d)

Os serviços essenciais, conforme a Tabela 5, sofreram prejuízos em vários setores, com ênfase para os serviços de assistência médica, saúde pública e atendimento de emergências médicas, os quais comprometeram significativamente o atendimento às demandas da população nas unidades da rede municipal de saúde, totalizando mais de R\$ 5.000.000,00 (cinco milhões de reais) em perdas. Quanto ao abastecimento de água potável, os prejuízos foram contabilizados em R\$ 8.600.000,00 (oito milhões e seiscentos mil reais), tendo sido afetados os processos de captação, tratamento e distribuição, com alguns bairros tendo o fornecimento interrompido. Quanto ao sistema de limpeza urbana, ocorreu o acúmulo de resíduos sólidos e de lixo nas áreas inundadas, devido ao acesso da coleta ter sido prejudicado, sendo um total superior a R\$ R\$ 4.000.000,00 (quatro milhões de reais) de prejuízos. A geração de energia elétrica sofreu um impacto de R\$ 505.000,00 (quinhentos e cinco mil reais) em função da interrupção do fornecimento para as áreas afetadas, pois havia unidades consumidoras submersas, ocasionando riscos de descarga elétrica. Os prejuízos totais contabilizaram quase R\$ 59.000.000,00 (cinquenta e nove milhões de reais). Após a atualização monetária, os valores alcançaram o montante próximo a R\$ 122.000.000,00 (cento vinte dois milhões de reais). A Tabela 6, a seguir, descreve os prejuízos dos setores da economia que foram afetados pelo evento de 2015.

Tabela 6 - Prejuízos da inundação (setores da economia) em Rio Branco – AC (até 01 mar 2015)

Setores da Economia	Valor (R\$)
Agricultura	59.000.000,00
Pecuária	34.226.000,00
Indústria	—
Serviços	65.400.000,00
Valor Total dos Prejuízos Privados	158.626.000,00
Atualização monetária	327.601.990,55

Fonte: Elaborado pelo primeiro autor, a partir de Rio Branco (2015d)

No tocante à agricultura, em especial a de caráter familiar, a inundação de 2015 afetou de forma severa a produção (Tabela 6). No intuito de preservar o que foi plantado, houve a necessidade de antecipar a colheita, muitas delas já comprometidas em função da elevação do Rio Acre, sendo atingidos os seguintes produtos: mandioca, banana, batata doce, mamão, arroz, urucum, entre outros (RIO BRANCO, 2015d). Nesse setor, os prejuízos ficaram em R\$ 59.000.000,00. O comprometimento da pastagem, em decorrência de um prolongado tempo em condição de submersão, além das perdas de cercas, foram alguns dos impactos ocasionados à pecuária, que contabilizaram mais de R\$ 34.000.000,00 (trinta e quatro milhões de reais). Os serviços foram afetados no tocante à interrupção das atividades prestadas, em função da quebra da normalidade, impedindo o funcionamento desse seguimento, sendo os prejuízos valorados em torno de 65.000.000,00 (sessenta e cinco milhões de reais).



O total geral dos prejuízos ocasionados aos setores da economia foi superior a R\$ 158.000.000,00 (cento e cinquenta e oito milhões de reais). A atualização monetária elevou esse valor para algo em torno de R\$ 327.000.000,00 (trezentos e vinte e sete milhões de reais). A Tabela 7 descreve a totalidade dos danos e prejuízos decorrentes da inundação de 2015.

Tabela 7 - Danos e prejuízos – Inundação em Rio Branco-Ac (até 01 mar 2015)

Ordem	Danos/Prejuízos	Total R\$
01	Danos Materiais - Edificações	52.600.000,00
02	Danos ambientais – Recursos Naturais	7.230.000,00
03	Prejuízos Econômicos – Serviços essenciais	58.930.000,00
04	Prejuízos Econômicos – Setores da economia	158.626.000,00
Total		277.386.000,00
Atualização monetária		572.870.814,06

Fonte: Elaborado pelo primeiro autor, a partir de Rio Branco (2015d)

O consolidado dos danos (materiais e ambientais) e os prejuízos econômicos (serviços essenciais e dos setores da economia) estão descritos na Tabela 7. Para os danos materiais relacionados a edificações (danificadas ou destruídas), o montante foi superior a 52.000.000,00 (cinquenta e dois milhões de reais). Com um valor acima de R\$ 7.000.000,00 (sete milhões de reais), os danos ambientais foram os menores dentre os impactos e consequências avaliados. Para os prejuízos econômicos (serviços essenciais e setores da economia) os valores alcançados ficaram acima de 217.000.000,00 (duzentos e dezessete milhões de reais). O total global dos danos e prejuízos, já com a atualização monetária, foi de quase R\$ 573.000.000,00 (quinhentos e setenta e três milhões de reais).

No dia 5 de março de 2015, data em que o nível do Rio Acre alcançou sua cota máxima (18,40m), o cenário do desastre ampliou-se consideravelmente. A Tabela 8 reflete em números alguns aspectos da maior inundação registrada na cidade de Rio Branco. O cenário da inundação no último dia de elevação do nível do Rio Acre, permite verificar as consequências da intensidade daquele evento. Foram 53 bairros afetados (Rio Branco possuía, à época, um total de 212), o sistema de georreferenciamento da Prefeitura de Rio Branco contabilizou mais de 700 ruas, perfazendo um total de 154 km em situação de submersão parcial ou total, impedindo o tráfego de veículos e dificultando as ações de socorro e assistência nas áreas afetadas. Uma parte dos atingidos permaneceu nas residências, temendo saques e furtos ao seu patrimônio, pois, no período da noite, com a suspensão do fornecimento de energia elétrica, os bairros afetados ficavam às escuras. Esse sistema quantificou, ainda, 29.300 edificações afetadas, com mais de 102.000 pessoas atingidas. Na área rural, 32 comunidades sofreram danos e prejuízos decorrentes dessa inundação.

Tabela 8 - Situação da inundação em números (05 de março de 2015) em Rio Branco-AC

CENÁRIO DA INUNDAÇÃO (em 5 de março de 2015)	
Bairros	53
Edificações	29.300
Ruas (KM)	700 (154)
Afetados (pessoas)	102.000
Áreas rurais (comunidades)	32
Área urbana afetada (Ha)	4.500
Pontes interditadas	3
Abrigos públicos	29
Desabrigados (pessoas)	10.600

Fonte: Elaborado pelo primeiro autor, a partir de Rio Branco (2015e)

Ainda na Tabela 8, o número de desabrigados alcançou a quantidade de 10.600 pessoas, obrigando a instalação de 29 abrigos públicos (Parque de Exposição, SEST/SENAT, SESC, ginásio do SESI, SESINHO, COMARA, sede da Regional da Baixada [uma das sedes das regionais administrativas de Rio Branco] e mais 22 escolas das redes estadual e municipal de ensino). Para efeito comparativo, o total de pessoas desabrigadas (10.600) pela inundação de 2015, na cidade de Rio Branco, foi superior à população de quatro municípios acreanos, conforme o IBGE (2022): Assis Brasil (8.100) da regional do Alto Acre, Capixaba (10.392) da regional do Baixo Acre e Santa Rosa do Purus (6.723), todos da regional do Purus, além de Jordão (9.222), da regional do Tarauacá/Envira. A Figura 2 mostra a mancha de inundação do ano de 2015.

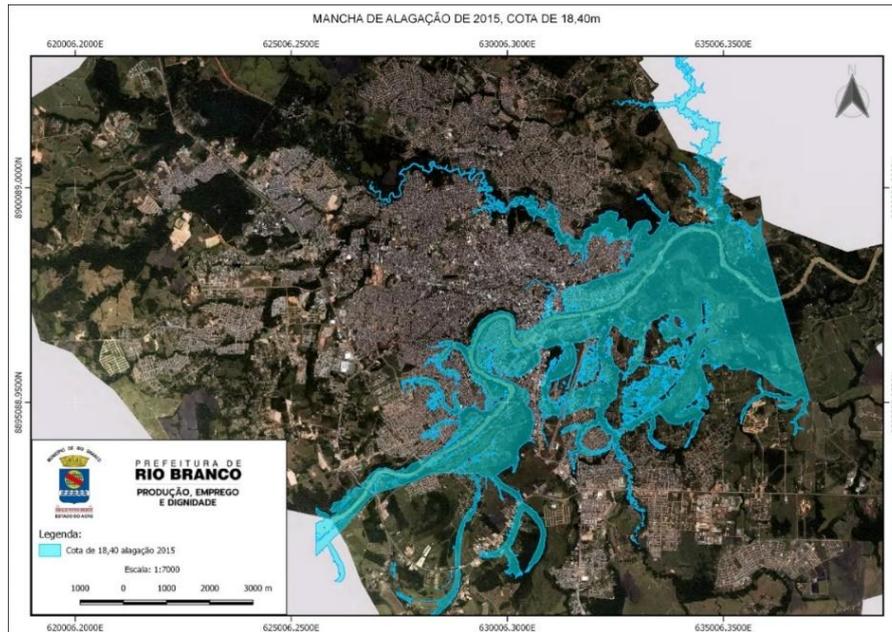


Figura 2 - Mancha de inundação na cidade de Rio Branco no evento de 2015 (cota de 18,40m do Rio Acre)

A Figura 2 mostra o cenário da inundação de 2015 na cidade de Rio Branco, com o Rio Acre ao nível de 18,40m (alcançado em 5 de março daquele ano). Toda a área preenchida pela cor azul evidencia o avanço da água. Conforme cálculos realizados pelo Núcleo de Geotecnologia da Prefeitura Municipal de Rio Branco (RIO BRANCO, 2023), uma área de 4.500 hectares na parte urbana do município ficou em situação de submersão. Uma parte considerável da área urbana de Rio Branco foi afetada pelas águas do Rio Acre e seus tributários. Como já informado anteriormente, desde 23 de fevereiro, data em que o Rio Acre ultrapassou a cota de transbordamento (14,00m), até o seu retorno para um patamar abaixo dessa cota, foram 32 dias, com consequências negativas de grande magnitude para a população afetada.

Eventos extremos de inundações têm ocorrido de forma frequente e com intensidade severa no Estado do Acre, em especial e sua capital Rio Branco. O episódio de 2015 foi considerado, conforme registros, o maior da história, ocasionando danos e prejuízos severos à ordem econômica e social. A literatura científica, referenciada neste trabalho, indica que a ampliação da **percepção de riscos** (enquanto atributo subjetivo), da **resiliência** (mecanismo fortalecedor da recuperação frente a esses elementos estressores) e da **governança** (envolvimento das instituições por meio das políticas públicas de Proteção e Defesa Civil) podem conduzir a uma agenda positiva e integrada de condutas que permitam reduzir os riscos e minimizar os seus impactos. As lições aprendidas com eventos anteriores sugerem um maior protagonismo social, fortalecimento institucional, estratégias de comunicação de riscos e de capacidade adaptativa. O sucesso ou o fracasso da preparação dependem do esforço integrado desses três elementos, como estratégia de ação. A segurança global da população, em circunstância de desastre, deve estar associada às demais políticas públicas direcionadas à sustentabilidade de cidades e comunidades, em especial, as mais vulneráveis e expostas aos riscos desses eventos estressores, pois são estes os cenários mais desafiadores.

Comentários finais

Em um contexto socioambiental, inundações são elementos perturbadores, impactam negativamente a população exposta, quando estabelecida em um ambiente suscetível, onde ameaças físico-naturais associam-se às vulnerabilidades sociais, gerando riscos e concretizando desastres. A cidade de Rio Branco, capital do Estado do Acre e município mais populoso, no ano de 2015 foi atingida pela maior inundação já registrada, na qual o nível do Rio Acre alcançou a marca dos 18,40m e, por trinta e dois dias, deixou em situação de submersão uma área superior a quatro mil e quinhentos hectares. Os danos (humanos e materiais) e prejuízos (econômicos sociais) consolidados ultrapassaram os quinhentos e cinquenta milhões de reais. As pessoas afetadas superaram as cem mil e mais de dez mil pessoas foram obrigadas a deixarem suas casas e ficarem em abrigos públicos. Como descrito, eventos de inundação ocorreram anteriormente à 2015 e, nos anos de 2023 e 2024 novos episódios de inundações atingiram a capital do Estado. Percepção de riscos, resiliência e governança são alguns dos elementos que podem contribuir para a redução de riscos de desastres e minimização de seus impactos e consequências. Sob essa ótica desafiadora, participação da comunidade, capacidade adaptativa, estratégias de comunicação de riscos e desenvolvimento das instituições na direção da governança dos riscos são instrumentos norteadores de políticas públicas necessárias e adequadas para alcançar o êxito necessário frente aos desastres por inundação. Pesquisas direcionadas, no contexto desses três pilares (Percepção de riscos, resiliência e governança), baseadas nos mecanismos apontados e, de forma pontual, realizados em comunidades vulneráveis, podem somar esforços nessa intensa batalha que segue em direção ao estabelecimento de comunidades mais seguras e cidades mais sustentáveis, à luz dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS 11 – Cidades e comunidades sustentáveis).



Agradecimento

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (Capes) - Código de Financiamento 001”.

Referências Bibliográficas

- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH)**. Disponível em <http://www.snirh.gov.br/hidrotelemetria/Mapa.aspx>. Acesso em 11 abr. 2022.
- ASADZADEH, Asad; KÖTTER, Theo; ZEBARDAST, Esfandiar. An augmented approach for measurement of disaster resilience using connective factor analysis and analytic network process (F'ANP) model. **International Journal of Disaster Risk Reduction**. v. 14. p. 504-518. 2015.
- BACHRACH, Kenneth M.; ZAUTRA, Alex J; 1985. Coping with a community stressor: the threat of a hazardous waste facility. **Journal of Health and Social Behavior**, Vol. 26 (June):127-141
- BIRKMANN, Joern; GARSCHAGEN, Matthias, SETIADI, Neysa. New challenges for adaptive urban governance in highly dynamic environments: Revisiting, planning systems and tools for adaptive and strategic planning. **Urban Climate** 7 (2014) 115–133. <http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2014.01.006>
- BUSCHBACHER, R; 2014. **A Teoria Da Resiliência E Os Sistemas Socioecológicos: Como Se Preparar Para Um Futuro Imprevisível?** Boletim regional, urbano e ambiental. 09 jan. - jun. 2014. **IPEA** Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/5561/1/BRU_n09_teorias.pdf. Acesso em: 12 de setembro de 2022.
- CURTIS, Scott; MUKHERJI, Anuradha; Kruse, Jamie; Helgeson, Jennifer; Ghosh Ausmita; 2022. Perceptions of risk to compound coastal water events: A case study in eastern North Carolina, USA. **Progress in Disaster Science** 16. 100266. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2022.100266>
- CALGARO, Emma; VILLENEUVE, Michelle; Roberts, Genevieve; 2020. Inclusion: Moving beyond resilience in the pursuit of transformative and just DRR practices for persons with disabilities (Cap. 17). (In) A. Lukasiewicz, C. Baldwin (eds.) **Natural Hazard and Disaster Justice**. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0466-2_17
- DOLMAN, D. I.; BROWN, I. F.; ANDERSON, L. O.; WARNER, J. F.; MARCHEZINI, V.; SANTOS, G. L. P. Re-thinking socio-economic impact assessments of disasters: the 2015 flood in Rio Branco, Brazilian Amazon. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 31. 2018. p. 212-219.
- EM-DAT Public. The International Disaster Database. Centre for the Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). Disponível em <https://public.emdat.be/>. Acesso em 10 jan. 2022.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **CENSO 2022**. Disponível em: www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ac.html. Acesso em: 12 jul 2023.
- IOCCA, L. S. S., & FIDÉLIS, T. (2018). Climate change, risks and adaptation strategies in the Brazilian context. **Veredas do Direito: Direito Ambiental e Desenvolvimento Sustentável**, 15(33), 131–161. <https://doi.org/10.18623/rvd.v15i33.1381>
- IOCCA, Luciana & FIDÉLIS, T. (2021): Traditional communities, territories and climate change in the literature – case studies and the role of law, **Climate and Development**, DOI: 10.1080/17565529.2021.1949573
- KAMMERBAUER, Mark; MINNERY, John. Risk communication and risk perception: lessons from the 2011 floods in Brisbane, Australia. **Disasters**, 2019, 43(1): 110–134. doi:10.1111/disa.12311
- KELLENS, Win; Terpstra, Teun; De Maeyer, Philippe; 2013. Perception and Communication of Flood Risks: A Systematic Review of Empirical Research. **Risk Analysis**, Vol. 33, No. 1.
- LECHOWSKA, Ewa; 2018. What determines flood risk perception? A review of factors of flood risk perception and relations between its basic elements. **Natural Hazards**. v. 94. p. 1341–1366.
- LIM, Jung Kyu Rhys; LIU, Brooke Fisher; Seate; Anita Atwell; 2022. Are you prepared for the next storm? Developing social norms messages to motivate community members to perform disaster risk mitigation behaviors. **Risk Analysis**. 42:2550–2568. DOI: 10.1111/risa.13957



LOPEZ-MARRERO, Tania; 2010. An integrative approach to study and promote natural hazards adaptive capacity: a case study of two flood-prone communities in Puerto Rico. **The Geographical Journal**, Vol. **176**, nº. 2. pp. 150–163, doi: 10.1111/j.1475-4959.2010. 00353.x

MARENCO, José A.; SCHAEFFER, Roberto. PINTO, Hilton Silveira.; ZEE, D. M.W; 2009. Mudanças Climáticas e Eventos Extremos no Brasil. **Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em <www.fdb.org.br/fdb/pdf/doc-504.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2022.

MENDONÇA, Francisco; BUFFON, Elaiz Aparecida Mensch; 2021. Riscos Híbridos (Cap I). In. MENDONÇA, Francisco. (Org). **Riscos Híbridos: concepções e perspectivas socioambientais**. 1. ed. São Paulo. Oficina de Textos. 162p.

MOTOKI. Usuzawa; Elizabeth. O. Telan; Razel. Kawano; Carmela S. Dizon; Bacti. Alisjahbana; Yugo. Ashino; Shinichi. Egawa; Manabu. Fukumoto; Takako Izumi; Yuichi Ono; Toshio Hattori; 2014. Awareness of Disaster Reduction Frameworks and Risk Perception of Natural Disaster: A Questionnaire Survey among Philippine and Indonesian Health Care Personnel and Public Health Students. **Tohoku J. Exp. Med.**, 2014, **233**, 43-48

PINOS, Juan; QUESADA-ROMÁN, Adolfo. Flood Risk-Related Research Trends in Latin America and the Caribbean. *Water* 2022, 14, 10. <https://doi.org/10.3390/w14010010>

RIO BRANCO (Município); 2015a. Decreto de Situação de Emergência nº 193. Diário Oficial do Estado do Acre (D. O. E) nº 11.503, de 25 de fevereiro de 2015. Disponível em: <http://www.diario.ac.gov.br/>. Acesso em: 10 fev de 2023

RIO BRANCO (Município); 2015b. Decreto de Situação de Emergência nº 201. Diário Oficial do Estado do Acre (D. O. E) nº 11.505, de 27 de fevereiro de 2015. Disponível em: <http://www.diario.ac.gov.br/>. Acesso em: 10 fev de 2023

RIO BRANCO (Município); 2015c. Estado de Calamidade Pública (ECP) nº 214. Diário Oficial do Estado do Acre (D. O. E) nº 11.507, de 04 de março de 2015. Disponível em: <http://www.diario.ac.gov.br/>. Acesso em: 10 fev de 2023

RIO BRANCO (Município); 2015d. Formulário de Informações sobre Desastres (FIDE) Coordenadoria Municipal de Proteção e Defesa Civil de Rio Branco. 2015.

RIO BRANCO (Município); 2015e. Relatório Situacional da Inundação de 2015 para a Presidência da República. Gabinete do Prefeito/Coordenadoria Municipal de Proteção e Defesa Civil de Rio Branco. 2015e.

RIO BRANCO (Município); 2019. **Plano de contingência operacional de enchente**. Coordenadoria Municipal de Defesa Civil, 2019. Disponível em: <http://portalcgm.riobranco.ac.gov.br/portal/wp-content/uploads/2015/02/PLANO-DE-CONTING%3%8ANCIA-OPERACIONAL-DE-ENCHENTE-2019.pdf> Acesso em: 15 abr. 2022.

RIO BRANCO (Município). Mancha de Inundação do Rio Acre – Inundação de 2015 (18,40m). Núcleo de Geotecnologia. Prefeitura Municipal de Rio Branco. 2023.

SANTORO, Stefania; Totaro, Vincenzo; Lovreglio, Ruggiero; Camarda, Domenico; Iacobellis, Vito; Fratino, Umberto; 2022. Risk perception and knowledge of protective measures for flood risk planning. The case study of Brindisi (Puglia region). **Safety Science**. n. 153. 105791. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105791>

S. BIRKHOLZ, M. Muro, P. Jeffrey, H.M. Smith; 2014. Rethinking the relationship between flood risk perception and flood management. *Science of the Total Environment* 478. p. 12–20

SOUZA, Carlos Alberto Alves de. **História do Acre**. Rio Branco: M.M. Paim, 1995. 103p.

SOUZA, Lucas Barbosa; Zanella, Maria Elisa; 2010. **Percepção de riscos ambientais: teoria e aplicações**. Fortaleza. Edições UFC. 240p.

VEYRET, Yvette (organizadora); 2007. **Os Riscos: o homem como agressor e vítima do meio ambiente**. 1. Ed. São Paulo: Contexto.

ZANGALLI JUNIOR, P. C. (Des) articulações entre crise climática e riscos urbanos-ambientais. **Revista Brasileira de Climatologia**, Dourados, MS, v. 34, Jan/ jun. 2024, ISSN 2237-8642

ZEVENBERGER, Chris; Gersonius, Berry; Radhakrishan, Mohan; 2020. Flood resilience. **The Royal Society Publishing**. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2019.0212>.



PERCEPÇÕES SOCIAIS SOBRE A CHEIA DE MAIO DE 2024 EM PORTO ALEGRE

1Milene Telles Cerqueira, 1Milena Krauhteman Pedreira, 1Leonardo Niger Walter Guichard de Paiva
1 Faculdade Dom Bosco, e-mail: milenakrauhteman@gmail.com, milenemeyer57@gmail.com, leonardo.niger@gmail.com

Palavras-chave: Desastre ambiental; Infraestrutura urbana; Desigualdade socioeconômica

Resumo

A cidade de Porto Alegre, no Rio Grande do Sul, tem sido afetada por desastres ambientais, agravados por uma infraestrutura urbana inadequada e desafios no planejamento urbano. Em maio de 2024, a cidade enfrentou uma grave enchente, evidenciando a falta de preparação e planejamento, resultando em impactos significativos, especialmente nas áreas mais vulneráveis. A ausência de atenção às necessidades da população e a sobrecarga da infraestrutura urbana agravam os efeitos dos eventos climáticos extremos, causando prejuízos materiais e sociais. Este artigo analisa a enchente de 2024 em Porto Alegre, focando na relação entre desigualdade socioeconômica e problemas na drenagem urbana. A pesquisa utiliza revisão de literatura sobre desastres ambientais na região, entrevistas com moradores locais, análise de políticas públicas e imagens geoprocessadas. Os resultados mostram como a infraestrutura de drenagem insuficiente e a negligência institucional agravam os efeitos das enchentes, perpetuando um ciclo de vulnerabilidade e reconstrução. Além de investigar as deficiências na manutenção de drenagem, o estudo examina como a desigualdade socioeconômica amplifica os impactos ambientais. As áreas mais pobres, frequentemente situadas em zonas de risco, sofrem desproporcionalmente com os danos das enchentes, enfrentando dificuldades maiores na recuperação. A falta de investimento em medidas preventivas e de adaptação deixa as comunidades vulneráveis a desastres recorrentes. A ausência de políticas eficazes de gestão de riscos e de planejamento urbano sustentável contribui para a perpetuação da vulnerabilidade. A análise revela que essas comunidades carecem de recursos e apoio adequados, perpetuando um ciclo de vulnerabilidade.

Introdução

O crescimento urbano acontece de maneira rápida e sem planejamento adequado, resultando em diversas consequências negativas para o meio ambiente e para a urbanização. Especialistas em urbanismo, como a professora Raquel Rolnik da USP, têm enfatizado a necessidade de políticas públicas que abordem as desigualdades estruturais nas cidades. Segundo Rolnik (2023), é crucial que as intervenções urbanas não apenas melhorem a infraestrutura física, mas também assegurem a participação ativa das comunidades afetadas nos processos de planejamento e execução dos projetos. Isso pode garantir que as soluções adotadas sejam adequadas às realidades locais e sustentáveis a longo prazo. Na área de engenharia hidráulica, o professor Ivanildo Hespagnol, também da USP, destaca a importância de sistemas de drenagem modernos e bem mantidos para prevenir enchentes. Hespagnol argumenta que a tecnologia deve ser aliada à gestão eficiente dos recursos hídricos e à manutenção regular das infraestruturas existentes.

As inundações frequentemente atingem as comunidades de baixa renda ROSATTO (2021); PIMENTEL (2023), que muitas vezes residem em áreas de maior risco devido à falta de opções habitacionais seguras. A destruição de infraestrutura, a perda de bens pessoais e a interrupção de serviços básicos como água potável e eletricidade agravam ainda mais a situação. Além disso, os impactos psicológicos e de saúde pública são significativos, com aumentos na incidência de doenças e estresse pós-traumático PENNIG-ROWSELLI; THORNE; PARDOE (2014). Essas comunidades são frequentemente localizadas em áreas, como margens de rios e encostas instáveis, que são naturalmente suscetíveis a desastres ambientais. Além disso, a ocupação humana dessas áreas aumenta o risco de danos materiais e perdas de vidas durante eventos de enchentes TUCCI (1997).

A respeito da gravidade dos impactos, a infraestrutura urbana é frequentemente negligenciada, levando a uma situação de crise ambiental e social. A falta de planejamento e a ineficiência das autoridades em lidar com os impactos ambientais negativos resultam em desastres naturais que afetam de forma desproporcional as comunidades mais vulneráveis e de baixa renda THORNE; PARDOE (2014). Um estudo realizado por AUGUSTIN (2024), do Observatório das Metrôpoles, do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT), revela uma correlação preocupante entre as áreas mais afetadas pelas enchentes e a concentração de pessoas de baixa renda. De acordo com os dados levantados, essas regiões costumam ser as mais vulneráveis a eventos extremos, como inundações, devido à precariedade das condições habitacionais, à falta de infraestrutura adequada e à localização em áreas de risco. A Figura 1, baseada no estudo realizado, ilustra claramente a distribuição geográfica das áreas mais atingidas em relação à densidade populacional de baixa renda em Porto Alegre e regiões.

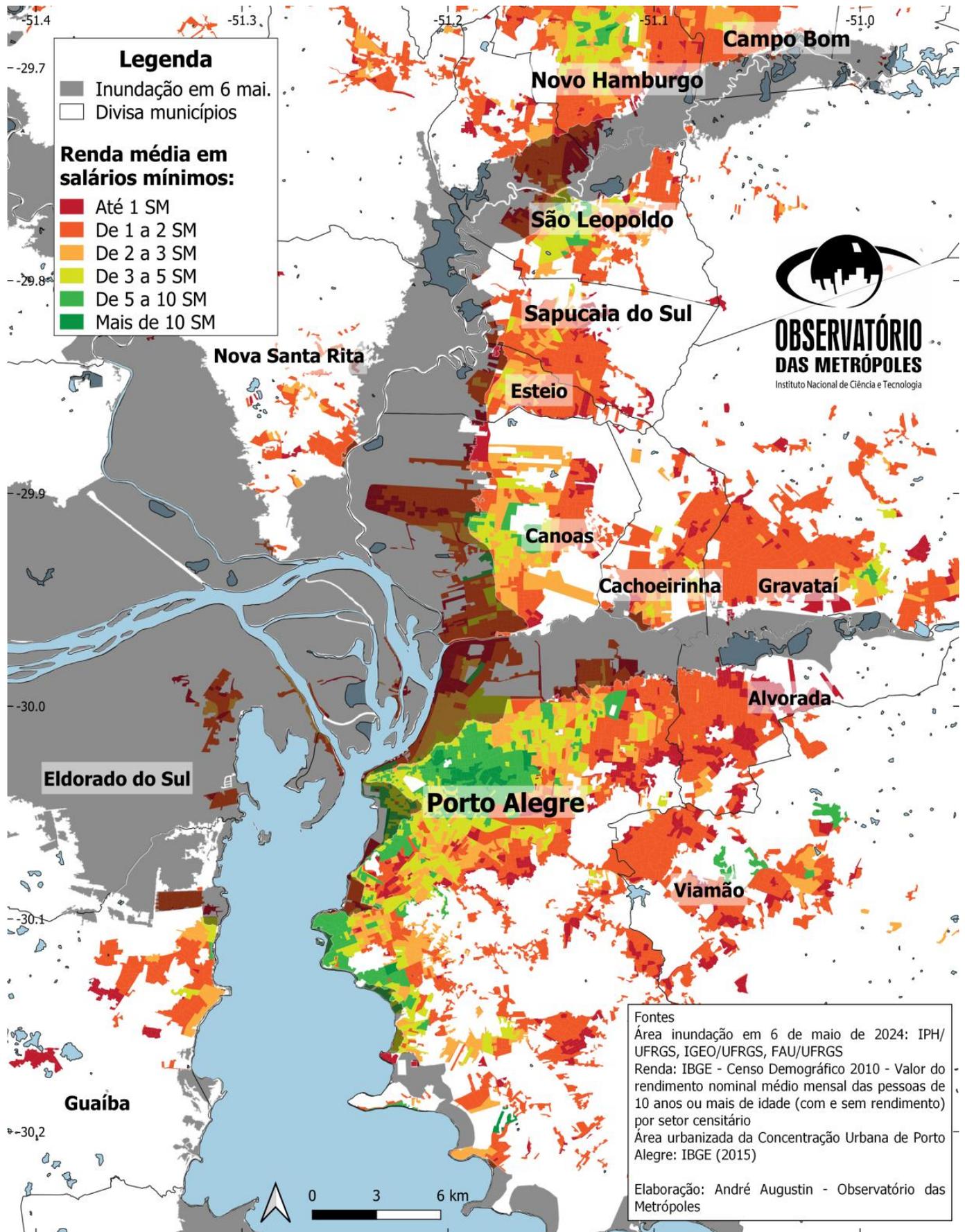


Figura 1: Mapa do Observatório das Metrôpoles (INCT), Porto Alegre e regiões (2024).



Nos últimos anos, o Rio Grande do Sul tem enfrentado uma série de desastres ambientais devastadores, que afetaram tanto as áreas urbanas quanto rurais do estado. Estes eventos, cada vez mais frequentes e intensos, têm causado sérios impactos em diversas comunidades, evidenciando a vulnerabilidade da infraestrutura local e as desigualdades socioeconômicas persistentes. Entre os desastres mais recorrentes, destacam-se as enchentes, que ocorreram no mês de maio de 2024 que resultaram no colapso de sistemas de drenagem LING;INGLÊS; ANDERSEN (2024).

As enchentes no Rio Grande do Sul são um fenômeno comum, particularmente em períodos de chuvas intensas e prolongadas. Esses eventos resultam na sobrecarga dos sistemas de drenagem urbana, que ficam incapazes de manejar o volume excessivo de água.

Consequentemente, os sistemas de drenagem existentes muitas vezes não conseguem lidar com o aumento do fluxo de água, resultando nas enchentes severas TUCCI (1997). Sem um planejamento urbano adequado, muitas construções são realizadas em áreas propensas a inundações, como margens de rios e encostas instáveis. Essas áreas são naturalmente vulneráveis a desastres ambientais, e a ocupação humana aumenta o risco de danos materiais e perdas de vidas durante evento de enchentes.

A cidade de Porto Alegre, enfrenta desafios significativos relacionados à gestão de águas pluviais, especialmente após eventos de cheias históricas, como a ocorrida em 1941 e recentemente neste ano. A manutenção adequada dos sistemas de drenagem desempenha um papel vital na mitigação do impacto dessas enchentes, LOUCKS; VAN BEEK (2005). Desde a devastadora inundação de 1941, é evidente que a cidade precisa priorizar a manutenção contínua e o aprimoramento de seus sistemas de drenagem para proteger suas comunidades e infraestrutura contra eventos extremos. A importância de seguir o plano diretor com as diretrizes técnicas e ambientais para a solução dos problemas de drenagem é ainda mais destacada pelas recentes cheias históricas. A falta de manutenção adequada pode levar à obstrução de canais, bueiros e sistemas de esgoto, resultando em acúmulo de água e inundações generalizadas, LOUCKS; VAN BEEK (2005). Nesse cenário, destaca-se a necessidade de planejar ou gerenciar sistemas de drenagem urbana, que envolve, principalmente, o problema de alocação de espaço SHEAFFER; WRIGHT (1982).

Consequentemente, o colapso desses sistemas provoca alagamentos que danificam infraestrutura, propriedades e ameaçam a vida dos residentes. Estes desastres não apenas causam destruição física, mas também deslocam populações e agravam as condições socioeconômicas já frágeis de muitas comunidades MACHADO; SILVA (2023).

O impacto socioeconômico é particularmente severo para as comunidades mais vulneráveis, que frequentemente carecem de recursos e suporte adequados e acessíveis para se recuperar de tais eventos. A desigualdade socioeconômica no Estado significa que os efeitos dos desastres são desproporcionalmente sentidos por aqueles com menos recursos, resultando em um ciclo de pobreza e vulnerabilidade que é difícil de quebrar PAHO; BANCO MUNDIAL (2024).

Com base no exposto até então, este artigo apresentará uma análise do desastre ambiental que ocorreu em Porto Alegre em 2024, com um foco na desigualdade socioeconômica e a deficiência da infraestrutura urbana. Será abordado como estes fatores agravam os efeitos desses desastres, proporcionando um contexto necessário para entender as dinâmicas complexas entre fatores naturais e sociais. Ressaltamos que o método de avaliação preliminar deste estudo se baseia em entrevistas, visando captar a percepção direta das comunidades afetadas pelos desastres.

Material e Métodos

Para o presente estudo, serão utilizadas imagens geoprocessadas provenientes de fontes confiáveis e autorizadas, permitindo verificar a extensão da devastação causada pela enchente que ocorreu no mês de maio de 2024, cuja magnitude foi consideravelmente maior que a ocorrida em 1941.

A análise dessas imagens será conduzida para identificar as áreas mais afetadas e compreender as desigualdades socioeconômicas entre os bairros de Porto Alegre. Além disso, serão investigados os fatores que influenciaram a ampliação dos danos causados pela enchente mais recente, com foco nas falhas da infraestrutura urbana do estado do Rio Grande do Sul, incluindo as legislação ambiental e práticas inadequadas de desenvolvimento urbano. Uma parte da análise irá se concentrar na urbanização em áreas de risco de desastres ambientais, com especial atenção para as comunidades de baixa renda que ocupam essas regiões vulneráveis, será realizada uma análise dos padrões de ocupação nessas áreas e suas implicações para a segurança e o bem-estar das populações locais. Será utilizada imagens de geoprocessadas para extrair informações relevantes.

Para quantificar padrões de inundação e a extensão dos danos em diferentes áreas afetadas será investigada a manutenção dos sistemas de drenagem para avaliar se foram adequadamente mantidos e se contribuíram para a severidade das inundações. Essa abordagem permitirá identificar tendências importantes relacionadas ao aumento da gravidade das enchentes.

Resultados e Discussão

A enchente de 2024 em Porto Alegre causou impactos significativos, especialmente na região das ilhas, caracterizada por construções em áreas de alto risco. As consequências foram agravadas pela desigualdade socioeconômica, uma vez que as comunidades mais pobres tendem a estar concentradas em áreas vulneráveis, como margens de rios e encostas instáveis. As ilhas emergiram como uma das áreas mais afetadas pela enchente de 2024. As condições socioeconômicas das comunidades dessas áreas exacerbam sua vulnerabilidade aos desastres naturais. Estes bairros, situados na periferia da cidade, são caracterizados por uma população socialmente vulnerável.

Com intuito de aprofundar a compreensão dos desafios enfrentados, foi realizada uma entrevista com Leonardo, colaborador da ONG "Abraço", que atua na região afetada. A seguir, são apresentadas as principais preocupações e desafios relatados pelos moradores, conforme descrito por Leonardo: Ele destacou a falta de suporte e a sensação de abandono que a



comunidade tem enfrentado desde o início do desastre. Segundo ele, os moradores reclamam da falta de acesso à internet e água potável desde o início de maio, forçando muitas pessoas a caminharem longas distâncias até a parte central de Porto Alegre em busca de recursos básicos. Também comentou "Eles estão esquecidos pelas autoridades locais desde o início da enchente. Sem água, sem internet. Muitos deles relataram que antes de chegarmos aqui, foi preciso andar 3 horas até a cidade para conseguir água potável."

A falta de acesso à internet trouxe consequências sérias, especialmente durante a época das chuvas intensas. Sem internet, os moradores não conseguem receber alertas climáticos, o que compromete a capacidade de evacuar as suas casas em tempo hábil. Ele explicou "Não é possível que os moradores recebam alertas climáticos. Não sabem quando será necessário evacuar as suas casas novamente. E o pior é que, durante as últimas enchentes ocorridas em maio, muitos não conseguiram sair porque não tinham sinal nem luz para se manter informados."

Os relatos do entrevistado evidenciam a precariedade das infraestruturas e a insuficiência de apoio governamental. A falta de acesso a recursos básicos como água potável e internet não apenas dificulta a recuperação imediata após o desastre, mas também compromete a resiliência das comunidades para enfrentar futuros eventos climáticos adversos. Esses problemas são exacerbados pela localização geográfica e pelas condições socioeconômicas dos moradores das ilhas. Esses dados e relatos sublinham a necessidade urgente de políticas públicas que melhorem a infraestrutura nas áreas vulneráveis e garantam suporte contínuo às comunidades afetadas. É essencial a implementação de sistemas de alerta eficazes, acesso a recursos básicos, e planos de evacuação claros e acessíveis a todos os moradores. Além disso, a inclusão das comunidades locais na formulação e execução dessas políticas pode aumentar a eficácia e a aceitação das medidas adotadas. Os desafios enfrentados pelas comunidades das ilhas de Porto Alegre após a enchente de 2024 são um reflexo das desigualdades estruturais e da falta de planejamento urbano adequado. A resposta inadequada ao desastre sublinha a necessidade de um enfoque mais integrado e participativo na gestão de riscos e na recuperação pós-desastre.

Além disso, conforme a figura 2, disponibilizadas pela UFRGS (2024) podemos observar que na região norte de Porto Alegre, os bairros mais impactados pelas cheias são Sarandi com 4.968 famílias afetadas e Farrapos com 4.106. Esses bairros, situados na periferia da cidade, são caracterizados por uma população socialmente vulnerável.

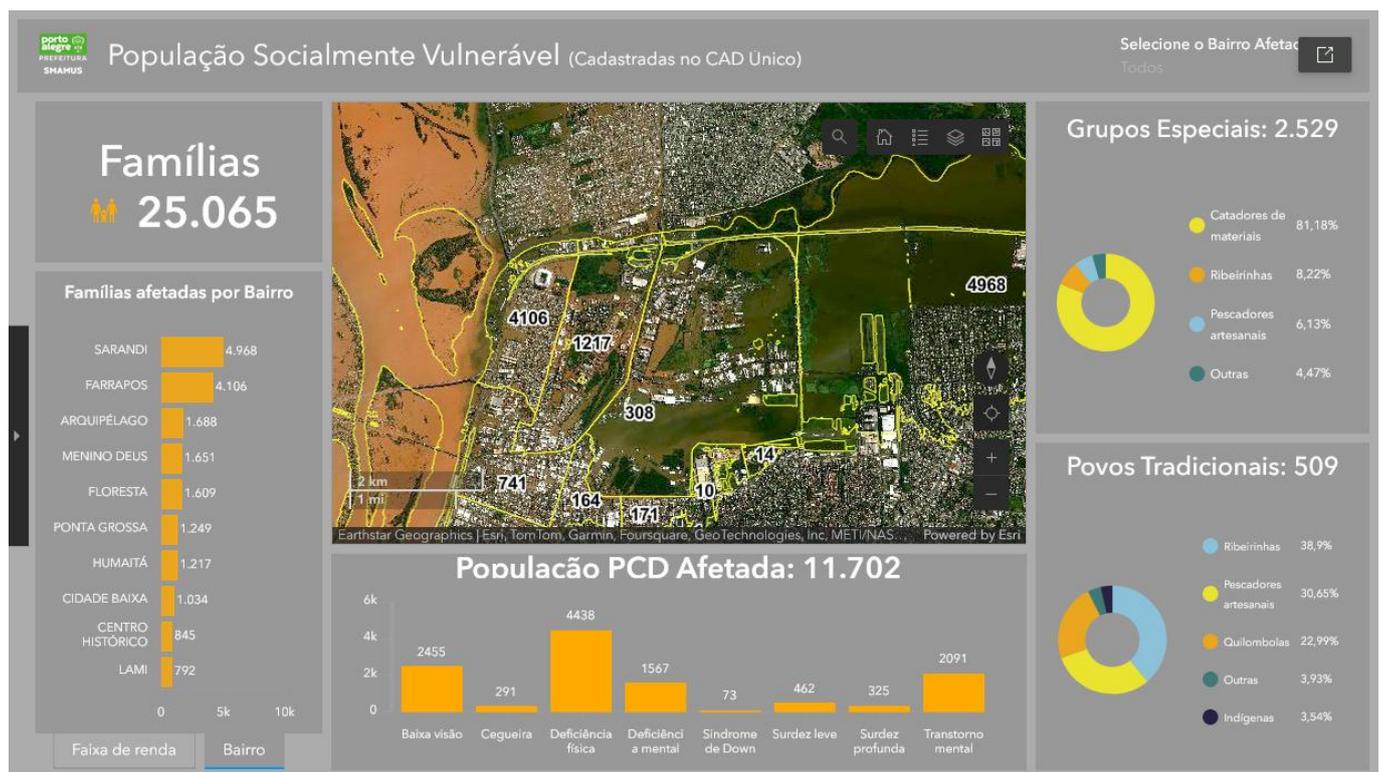


Figura 2: Famílias Afetadas por Bairro e Vulnerabilidade Social, IPH-UFRGS (2024).

A falta de infraestrutura adequada acaba se manifestando através da ausência de sistemas de proteção contra as enchentes, a falta de manutenção adequada dos diques e das comportas, e a desproteção da saúde e da vida das populações mais pobres. Como destaca LOUCKS; VAN BEEK (2005, p.03), "a gestão sustentável dos recursos hídricos e seus sistemas de drenagem e saneamento é um aspecto crucial na preservação do meio ambiente e no desenvolvimento socioeconômico das comunidades locais".

Em áreas de baixa renda, a infraestrutura de saneamento é frequentemente inadequada, com sistemas de drenagem ainda mais comprometidos do que em outras partes da cidade. A incapacidade hidráulica instalada e as precárias condições operacionais das casas de bombas tiveram um impacto direto, resultando em alagamentos mais intensos e prolongados nessas



regiões BANCO MUNDIAL (2022). Muitas dessas comunidades estão localizadas em áreas de risco, com moradias construídas em terrenos de baixa elevação ou próximos a corpos d'água, aumentando a susceptibilidade às inundações.

A enchente de 2024 trouxe à tona a fragilidade das habitações nas comunidades de baixa renda. Casas construídas em áreas não regulamentadas sofreram danos severos, com muitas sendo completamente destruídas BANCO MUNDIAL (2019). A falta de infraestrutura adequada para as águas pluviais resultou em perdas materiais significativas, com móveis, eletrodomésticos e outros bens pessoais sendo destruídos pela água.

Na figura 3 é apresentada a imagem da região do Sarandi, Farrapos e Ilhas, destacando os sistemas de proteção, que durante a enchente, acabaram falhando.

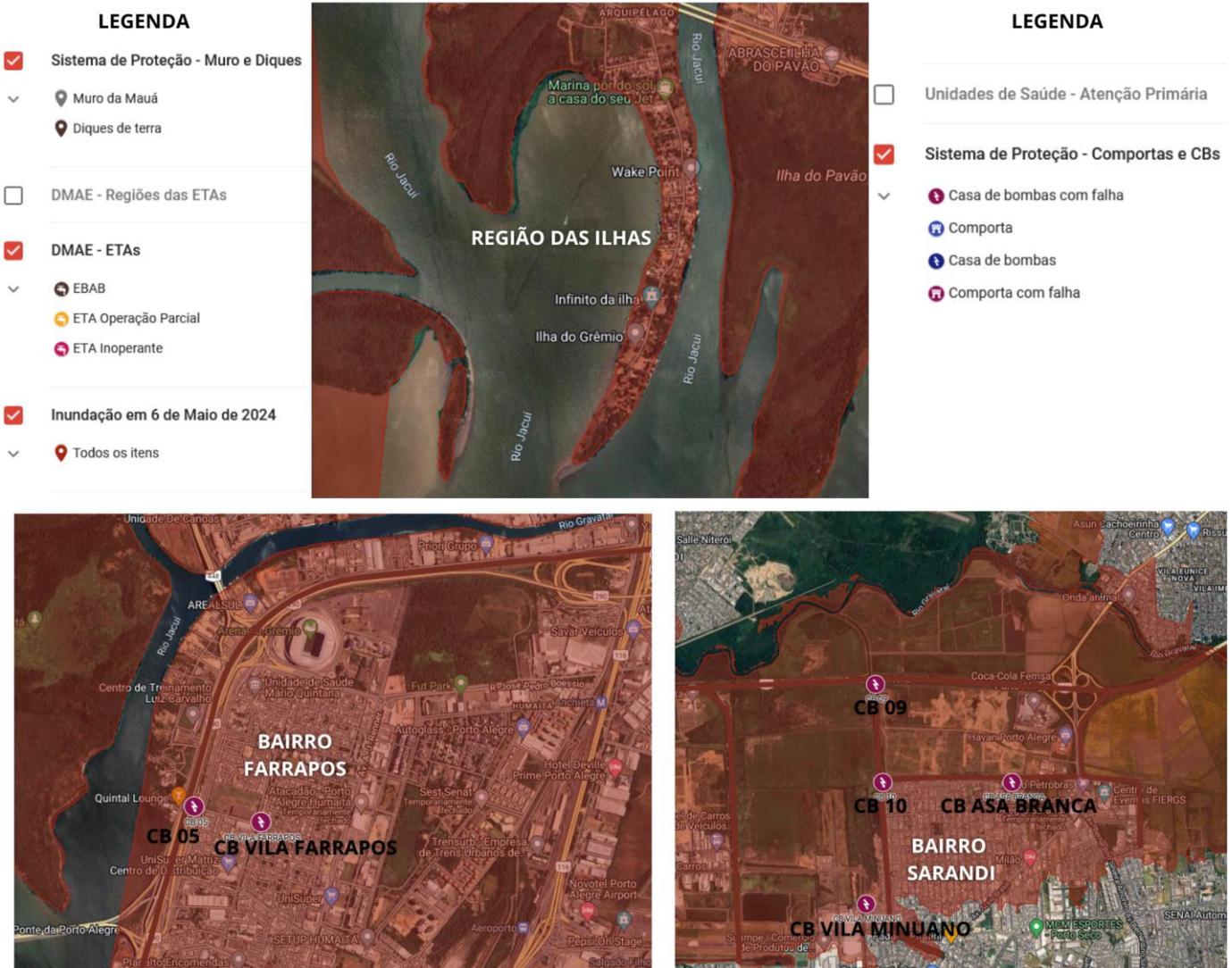


Figura 3: Distribuição dos sistemas de proteção nos bairros de Porto Alegre, IPH -UFRGS, 2024.

Essa situação pode ser atribuída a diversos fatores, como a falta de investimento em infraestrutura e a possível negligência das autoridades em relação a essas áreas. A ausência de sistemas de proteção adequados aumenta a exposição desses bairros a riscos, como inundações, deslizamentos de terra e outros desastres naturais SILVA (2023). A falta de tais sistemas é frequentemente resultado de uma combinação de negligência das autoridades e ausência de planejamento urbano eficaz. Como observado por OLIVEIRA (2020), a gestão urbana inadequada e a priorização de outras áreas de investimento contribuem para a perpetuação da vulnerabilidade em bairros de baixa renda. A análise da figura 3 nos bairros de Porto Alegre nas regiões das ilhas grande parte das áreas afetadas estavam protegidas por sistemas que falharam. Além disso, é notável que esses bairros se encontram em áreas de alta vulnerabilidade. Entre os bairros com maior devastação estão, Sarandi, Farrapos, regiões das Ilhas, entre outros.

A Figura 4, a seguir, apresenta a extensão da devastação nas regiões das Ilhas e no bairro Farrapos durante a enchente. As imagens evidenciam claramente os danos severos causados pela falta de infraestrutura.



Figura 4: Imagem satelital Região das Ilhas e Bairro Farrapos durante a enchente, autoria própria, 2024.

Para complementar a análise visual, foi realizada uma entrevista com Antonia Barbosa, uma moradora local, que relatou as dificuldades enfrentadas. Segundo Antonia, a água atingiu o nível do teto em sua residência e nas casas de seus familiares. Ela destacou a ineficácia das autoridades locais na gestão do desastre, especificamente mencionando que as bombas de drenagem estavam desligadas durante toda a enchente ocorrida em maio e foram ativadas somente na primeira semana de junho, resultando em quase trinta dias de espera. Antonia também comparou a resposta às enchentes no bairro Sarandí com a zona sul da cidade, que recebeu socorro com maior rapidez e priorizou a limpeza das ruas, algo que não ocorreu no Sarandí. Ela mencionou que o bairro está atualmente repleto de entulho, obstruindo as ruas e dificultando as atividades de limpeza das residências.

Os relatos de Antonia Barbosa sublinham várias questões críticas na gestão de desastres hidrológicos em Porto Alegre, como a desigualdade na resposta ao desastre, o impacto na infraestrutura e na saúde pública, e a necessidade de medidas preventivas. Essa entrevista evidencia a necessidade de uma revisão nas políticas de gestão de desastres em Porto Alegre, garantindo uma resposta mais equitativa e eficiente em futuras ocorrências.

Além disso, também se destaca que o Plano Diretor, dentro do plano de Saneamento Básico de Porto Alegre, elaborado em 2015, que deveria ter influenciado na prevenção de desastres urbanos relacionados a enchentes. Segundo o Plano Diretor (2015), foram identificadas deficiências nos sistemas de drenagem, que apontaram para a necessidade de melhorias nos sistemas de drenagem. Mesmo com a substituição de alguns motores em 2020 DAMIANI et al. (2024), as melhorias não foram suficientes para lidar com as cheias de 2023, comprovando a inadequação do sistema de drenagem para eventos extremos.

Em maio de 2024, a vulnerabilidade da infraestrutura urbana de Porto Alegre tornou-se alarmantemente visível. O sistema de drenagem colapsou durante uma catástrofe climática, revelando a fragilidade das medidas sistemáticas adotadas. Este cenário destacou a necessidade urgente de uma revisão e atualização do Plano Diretor, com uma abordagem mais rigorosa na implementação das medidas propostas. A falta de manutenção contínua e de investimentos em infraestrutura, aliada à insuficiência das intervenções realizadas, expôs a população a riscos elevados, agravando os impactos das inundações e colocando vidas e bens em perigo.

Considerações Finais

As cheias de maio de 2024 destacaram importantes falhas no atual planejamento urbano e nas estratégias de controle de inundações da cidade. Apesar das medidas propostas pelo Plano Diretor, a magnitude do evento de precipitação ocorrido expuseram a insuficiência dessas ações diante de eventos climáticos extremos. Este estudo investigou as percepções sociais sobre as cheias em Porto Alegre e região, analisando as medidas que foram tomadas, a necessidade de estratégias de gestão de risco mais robustas e adaptativas às mudanças climáticas, bem como entender como a população local percebeu e reagiu ao evento. Avaliando a falta de manutenção apropriada, combinada com o crescimento urbano desordenado, que resultou em um sistema



incapaz de manejar volumes extremos de água, exacerbando as inundações e colocando a população, animais e patrimônios em risco. Além disso, a análise revelou uma correlação significativa entre as áreas mais afetadas pelas enchentes e a concentração de pessoas de baixa renda, evidenciando a desigualdade socioeconômica como um fator crítico nessas comunidades devido à vulnerabilidade aos desastres naturais. Buscando identificar os principais problemas enfrentados nos locais afetados.

Os resultados indicam que as estratégias de prevenção e proteção atuais não foram suficientes para prevenir os danos significativos causados pelas cheias, ressaltando a necessidade urgente de revisão e aprimoramento das políticas de drenagem e gestão de águas pluviais. Conclui-se ainda que a adaptação das infraestruturas urbanas às novas realidades climáticas é essencial para proteger a população e minimizar os impactos de futuras inundações. Juntamente com as políticas de saneamento e infraestrutura urbana que considerem as necessidades específicas das comunidades de baixa renda, como: investimentos direcionados para a melhoria das condições de moradia, o fortalecimento das infraestruturas de drenagem e a criação de programas de resiliência comunitária. Já que a situação ocorrida é um reflexo direto de uma gestão urbana inadequada, que frequentemente prioriza outras áreas de investimento, deixando as comunidades mais vulneráveis sem a proteção necessária contra desastres naturais.

A implementação eficaz do Plano Diretor de Saneamento Básico, com um enfoque inclusivo e equitativo, pode reduzir significativamente a vulnerabilidade dessas populações, promovendo um desenvolvimento urbano mais justo e sustentável.

Finalmente, a participação da comunidade na tomada de decisões pode resultar em projetos que atendam melhor às necessidades locais e promovam um senso de propriedade e responsabilidade compartilhada. Programas de capacitação e treinamentos, oferecidos em parceria com organizações não governamentais e instituições acadêmicas, podem fortalecer as capacidades locais de gestão de riscos.

Ao seguir essas diretrizes e assegurar que as intervenções sejam orientadas para a equidade social, Porto Alegre pode não apenas mitigar os impactos de futuras catástrofes, mas também promover um desenvolvimento urbano que seja verdadeiramente inclusivo e resiliente. Estudos futuros devem focar na atualização constante dos planos de drenagem e na implementação de modelos hidrodinâmicos avançados para uma gestão mais eficaz dos riscos de enchentes, incluindo a regulamentação do uso do solo, sistemas de alerta e a importância dos Sistemas de Drenagem Urbana Sustentável (SUDS).

Agradecimentos

Expressamos gratidão à instituição acadêmica e ao professor por seu constante apoio e orientação ao longo desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

- Andersen, A.; 2024. Tragédia no RS: entenda por que sistema antienchente de Porto Alegre não funcionou. Revista Fórum.
- Augustin, R.; 2024. Impactos Socioambientais das Enchentes Urbanas, Porto Alegre. Observatório das Metrópoles, Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT).
- Banco Mundial; 2019. Convivendo com as inundações: um estudo para construir resiliência com as comunidades de Porto Alegre. Disponível em: worldbank.org (Acesso em: 31 mai. 2024).
- Banco Mundial; 2022. Falta de investimento em infraestrutura compromete produtividade e competitividade do Brasil.. Disponível em: worldbank.org (Acesso em: 02 jun. 2024).
- Barbosa, A, moradora do bairro Sarandi. Entrevista realizada em 12/06/2024. Entrevista pessoal.
- Canholi, A. P.; 2014. Drenagem Urbana e Controle de Enchentes (2ª edição ampliada e atualizada).
- Damiani, A. et al.; 2024. Manifestação aos portoalegrenses sobre o sistema de proteção contra inundações de Porto Alegre. Disponível em: https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSfmlKNx-uopuxb2jbl_o9U6tOVpRtCN-8UvyPoyG6OG_1Iz9A/viewform. (Acesso em: 10 jun. 2024).
- Drenagem urbana: uma abordagem sustentável; 2019. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental, v.1, n.25, p.1-10.
- Hespanhol, I.; 2023. Gestão e conservação de sistemas de drenagem urbana. FAU-USP.
- Ling, A; Inglês, R.; 2024. Entendendo as enchentes em Porto Alegre. Parte 1. Caos Planejado. Revista Fórum.
- Loucks, D. P.; van Beek, E.; 2005. Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models, and Applications. John Wiley & Sons, p 03.
- Machado, C. A.; Silva, P. R.; 2023. Impactos socioeconômicos de desastres naturais em áreas urbanas. Estudos sobre Desastres e Sustentabilidade, v.31, n.2, 67-85.
- Niger, L, colaborador da ONG Abraço; Entrevista realizada em 10 de junho de 2024. Entrevista pessoal.



- Oliveira, R. S.; 2020. Desastres Ambientais e Desigualdades Sociais: Um Estudo de Caso em Porto Alegre. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Pan American Health Organization (PAHO); 2024. Desastres Naturais e Saúde no Brasil.
- Penning-Rowsell, E. C.; Thorne, C. R.; Pardoe, J.; 2014. Benefits of Flood and Coastal Risk Management: A Handbook of Assessment Techniques. Springer Science & Business Media.
- Pimentel Walker, L. et al.; 2023. Greening Low-Income, Self-Managed Housing Projects in Brazil. Ann Arbor: University of Michigan.
- Plano Municipal de Saneamento Básico de Porto Alegre, Prefeitura Municipal de Porto Alegre, DMLU, DMAE; 2015. v.01, p. 189.
- Possantti, I.; Müller, J.; Ruhoff, A.; 2024. Cheias no Rio Grande do Sul - Base de dados e informações geográficas na Região Hidrográfica do Lago Guaíba e na Lagoa dos Patos em 2024. UFRGS. <https://storymaps.arcgis.com/stories/a81d69f4bccf42989609e3fe64d8ef48>
- Rolnik, R.; 2023. Chaves para pensar a moradia como um direito e não uma mercadoria na era da 'financeirização'. LabCidade, FAU-USP.
- Rossato, S.; 2021. Os impactos socioambientais das enchentes e inundações e sua relação com o processo de ocupação urbana irregular as margens do córrego Urutago no município de Francisco Beltrão - PR. UNINTER.
- Sheaffer, E. L.; Wright, J. A.; 1982. Urban Drainage. John Wiley & Sons.
- Silva, M. R.; 2023. Impactos Socioambientais das Enchentes Urbanas: Estudo de Caso em Porto Alegre. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Sistemas de drenagem urbana: desafios e soluções; 2020. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental, v.2, n.25, p. 143-152.
- Sistemas de drenagem urbana: uma revisão; 2018. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental, v.3, n.23, p. 231-240.
- Thorne, C. R.; Pardoe, J.; 2014. Flood Hazard Assessment: Predictions and Uncertainties. CRC Press.
- Tucci, C. E. M.; 1997. Urban Drainage and Flood Control: Rainstorm Events and Design of Urban Drainage Systems.

ÁREA TEMÁTICA 3

EDUCAÇÃO AMBIENTAL



3º CONGRESSO INTERNACIONAL DE
**ENGENHARIA
AMBIENTAL**



EDUCAÇÃO AMBIENTAL REPRESENTADA NO “DOMINÓ PEIXES AMAZÔNICOS” COMO ESTRATÉGIA METODOLÓGICA NO PROCESSO ENSINO-APRENDIZAGEM NO ENSINO FUNDAMENTAL

1Silvana Heloísa Ferreira Cruz, 2Aurilene Sales de Carvalho

1 Centro de Ciências do Ambiente/Universidade Federal do Amazonas

2 Secretaria Municipal de Educação aurilene.carvalho@semed.manaus.am.gov.br

Palavras-chave: Peixes amazônicos, Lúdico, Educação Ambiental.

Resumo

O presente artigo científico aborda um fragmento da fauna amazônica representado através de um recurso didático enfatizando a educação ambiental via dominó peixes amazônicos na forma de um jogo, articulando, dessa maneira, a relação do conteúdo “peixes” com o conhecimento prévio dos estudantes. A pesquisa em tela foi realizada com uma turma do 5º ano do Ensino Fundamental numa escola municipal de Manaus-Amazonas na qual foi constatada, através de avaliação diagnóstica, que 10 alunos ainda não tinham consolidado as habilidades e competências referentes à leitura. Nesse contexto, o objetivo geral do trabalho consiste em apresentar uma ferramenta metodológica de ensino que contribua para o aprendizado da leitura e escrita dos alunos e que também possa promover a interação entre o meio ambiente e as demais áreas do conhecimento. Assim, a utilização dessa estratégia metodológica pode ser considerada como um meio facilitador da aprendizagem pois, ao despertar a curiosidade na observação dos peixes e na busca de novas informações, motiva o aluno a uma aprendizagem significativa. A metodologia aplicada foi a pesquisa de campo e a bibliográfica com abordagem qualitativa, com a utilização das técnicas de observação e com a entrevista semiestruturada. Baseado nos autores: Macedo (1994), Lakatos e Marconi (2003), Demo (2001), Gil (2008) o estudo possibilitou que, ao trabalhar com material lúdico articulando conhecimentos prévios com o objeto a ser conhecido, possibilitam avanços no processo ensino aprendizagem dos alunos, Assim, o trabalho apresenta a contextualização e delimitação do tema com conceitos de educação ambiental, a importância de utilizar o lúdico no processo de ensino e aprendizagem, e os dez peixes amazônicos mais conhecidos pelos discentes. A pesquisa ancorou-se em documentos oficiais norteadores da educação como a BNCC (Base Nacional Comum Curricular) (2017), Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) (1998), LDB N. 9.394/96 (Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (1996), RCA (Referencial Curricular Amazonense) (2018), Lei N.º 9.795/1999, que institui a Política Nacional de Educação Ambiental, e autores como: Ribeiro (2013), Ausubel (2003), (Vygotsky), 1984) e Solé (1998), Araújo 2014, Santos 2009.

Introdução

Os jogos didáticos fazem parte de metodologias de ensino inovadoras com propósitos de estimular, dinamizar e facilitar o processo ensino-aprendizagem.

O referido artigo científico foi desenvolvido a partir da necessidade de dez alunos que não tinham consolidado as habilidades e competências referentes à leitura e escrita. A constatação foi feita através de avaliação diagnóstica e das observações diretas das aulas em uma turma composta de 35 alunos do 5º ano do Ensino Fundamental.

Assim sendo, pensou-se no tema “Educação Ambiental representada através do “Dominó Peixes Amazônicos,” como estratégia metodológica no processo ensino aprendizagem no Ensino Fundamental. Com o objetivo de apresentar uma ferramenta metodológica de ensino que contribua para o aprendizado da leitura e escrita dos alunos e que também possa promover a interação entre o meio ambiente e as demais áreas do conhecimento. Segundo Soares, “[...]a criança alfabetiza-se, constrói seu conhecimento do sistema alfabético e ortográfico da língua escrita, em situações de letramento, isto é, no contexto de e por meio de interação com material escrito real, e não artificialmente construído [...]” (2001, p.68).

Nesse sentido, procurou-se integrar através da utilização dos peixes amazônicos mais conhecidos pelos alunos, a articulação dos conhecimentos prévios dos mesmos com os conteúdos estudados. Para Ausubel (2003), quando alguém atribui significados a um conhecimento a partir da interação com seus conhecimentos prévios, estabelece a aprendizagem significativa.

Também procurou-se trabalhar um tema sobre o ecossistema amazônico, conforme o que preconiza a Lei 3.222 de Educação Ambiental de modo reflexivo, olhar criteriosamente, a formação do leitor, levando-se em consideração autores como: Ribeiro (2013), Ausubel (2003), Vygotsky(1984) Solé (1998), Araújo (2014), Santos (2009), Soares (2003) e os documentos norteadores do ensino básico como: a BNCC (Base Nacional Comum Curricular) (2017), Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) (1998), LDB N. 9.394/96 (Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (1996), RCA (Referencial Curricular Amazonense) (2018), Lei N.º 9.795/1999, que institui a Política Nacional de Educação Ambiental.

Contextualização e delimitação do tema

Dentre os conceitos de Educação Ambiental pode-se destacar: A Conferência de Tbilisi que foi o ponto culminante da primeira fase do Programa Internacional de Educação Ambiental iniciado em 1975 pela UNESCO, com a cooperação do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) organizando a primeira Conferência Intergovernamental de



Educação Ambiental, realizada no período de 14 a 26 de Outubro de 1977, com a Declaração da Conferência, as Recomendações, os Princípios Básicos, as Categorias de Objetivos, as Finalidades, e as Estratégias de Desenvolvimento da Educação Ambiental. Segundo Ortiz, para os participantes de Tbilisi:

“A educação ambiental foi concebida como o resultado de uma reorientação e articulação de diversas disciplinas e experiências educativas que facilitem uma visão integrada do meio ambiente. Os indivíduos e a coletividade, através dela, deverão compreender a natureza complexa do meio ambiente, e adquirir conhecimentos, valores, comportamentos e habilidades para participar eficazmente na prevenção e solução dos problemas ambientais” (2004, p. 69).

Desta maneira a Conferência de Tbilisi trouxe grandes contribuições e constituiu-se como um grande marco histórico da educação ambiental. A educação ambiental que se quer enfatizar é uma ação educativa permanente para que o aluno adquira consciência de sua realidade global, do tipo de relações que os homens estabelecem entre si e com a natureza e dos problemas derivados dessas relações. Que a mesma seja desenvolvida mediante uma prática que vincule o educando com a comunidade desenvolvendo valores e atitudes com a finalidade de promover um comportamento dirigido à transformação dessa realidade, possibilitando-os visualizar os aspectos naturais e os aspectos sociais.

Cruz comenta na sua Dissertação de Mestrado em Educação que para compreendermos realmente o significado de educação ambiental

“Poderíamos explicar o que NÃO é educação ambiental. Com efeito, a educação ambiental não é um campo de estudo como a biologia, a química, a ecologia ou a física. Para muitas pessoas a educação ambiental é um conceito difícil de compreender, posto que grande parte das pessoas falam ou escrevam sobre ensinar educação ambiental, mas isto não é possível. Aliás, podemos ensinar conceitos de educação ambiental, mas não educação ambiental” (2002, p. 6).

Conceitos reforçados através da Política Nacional de Educação Ambiental. Lei Nº 9795 de 27 de Abril de 1999. Que afirma em seu Art. 1º

“Entendem-se por educação ambiental os processos por meio dos quais o indivíduo e a coletividade constroem valores sociais, conhecimentos, habilidades, atitudes e competências voltadas para a conservação do meio ambiente, bem de uso comum do povo, essencial à sadia qualidade de vida e sua sustentabilidade.”

Dessa forma, fica claro, mediante ao que foi exposto, que não se ensina educação ambiental e sim conceitos os quais poderão contribuir para a construção de novos hábitos, atitudes, valores e conduta ética em relação ao meio ambiente. Esses conceitos podem ser ensinados pela escola que, atualmente, é um dos caminhos possíveis para veiculação dos conteúdos inerentes à temática.

A importância de utilizar o lúdico no processo de ensino e aprendizagem

O processo de ensino-aprendizagem é um desafio constante para os educadores que buscam métodos eficientes e atrativos para envolver os alunos e promover um aprendizado significativo. Nesse contexto, o uso do lúdico se destaca como uma importante ferramenta pedagógica. Ao incorporar elementos lúdicos nas atividades educacionais, é possível estimular a criatividade, motivar os estudantes e facilitar a assimilação dos conteúdos. Para Rodari, “É através do contato com diferentes experiências que se dá o desenvolvimento da atividade criadora, abrindo horizontes que tornam o pensamento divergente mais amplo e completo possível, sujeito a variadas combinações de fatores” (1993, p.30).

O mesmo autor foca na importância da criatividade e da sua fomentação durante toda vida. É possível educar o processo criativo utilizando várias ferramentas pois a imaginação é como uma ferramenta de libertação dos estereótipos criados pela sociedade. “Não para que todos sejam artistas mas para que ninguém seja escravo” (Rodari, 1993, p.17).

O uso de atividades lúdicas no processo de ensino-aprendizagem traz inúmeros benefícios para os estudantes permitindo que eles aprendam de forma mais prazerosa, ativa e participativa. O lúdico proporciona a experimentação, a descoberta e o engajamento dos estudantes, auxiliando na compreensão e na retenção de conteúdo. Além disso, as atividades lúdicas estimulam a criatividade, a socialização e o desenvolvimento de habilidades socioemocionais, contribuindo para uma formação integral dos estudantes.

No dizer de Vygotsky, ao brincar a criança desenvolve muitas atividades vivenciadas no seu dia a dia essas atividades permitem que ela revele o que pensa, e o mundo ao seu redor. O referido autor assinala:

“[...] a brincadeira cria para criança uma zona de desenvolvimento proximal que não é outra coisa senão a distância entre o nível atual de desenvolvimento, determinado pela capacidade de resolver independentemente um problema, e o nível atual de desenvolvimento potencial, determinado através da resolução de um problema sob a orientação de um adulto[...]” (Vygotsky, 1984, p.97).



A brincadeira permite desde cedo que a criança através do faz de conta experimente exercer funções que ainda não estão preparadas para realizar. O lúdico permite que os alunos vivenciem situações concretas e reais, facilitando a assimilação do conteúdo. A utilização do lúdico no processo de ensino-aprendizagem é essencial para tornar a escola um ambiente estimulante e gratificante para os alunos. Ao incorporar atividades lúdicas, os educadores promovem a motivação, a participação ativa, o aprendizado significativo e o desenvolvimento de habilidades socioemocionais nos estudantes.

Para Solé, as crianças constroem conhecimentos relevantes a respeito da leitura e da escrita. Nesse sentido, Solé afirma:

“A importância da leitura feita por outros reside em que contribui para familiarizar a criança com a estrutura do texto escrito e com a linguagem, cujas características de formalidade e descontextualização as distinguem da oral. Por outro lado, a criança pode assistir muito precocemente ao modelo de um especialista lendo e pode participar de diversas formas de tarefa de leitura (olhando gravuras, relacionando-as com o que se lê, formulando e respondendo perguntas etc.) assim constrói-se paulatinamente a ideia de quero escrito diz coisas e que pode ser divertido e agradável conhecê-las, isto é saber ler” (Solé, 1998, p. 55).

Deste modo, a leitura desempenha um papel essencial para o desenvolvimento cognitivo da criança, quando feita por outra pessoa (professor ou pais), ela tem a oportunidade de assimilar o texto de um outro modo, ouvindo o ritmo, a entonação e a estrutura da língua escrita. Ao ouvir textos lidos em voz alta, as crianças desenvolvem a consciência fonológica, tendo a capacidade de compreender e manipular os sons da fala.

Como foi citado no RCA (Referencial Curricular Amazonense (2018), no dizer de Magda Soares (2003) ao tratar de alfabetização e letramento, ao falar que esses conceitos se mesclam e se sobrepõem, na visão da autora, na alfabetização trata-se da aquisição dos códigos linguísticos e das habilidades necessárias para a leitura e a escrita por ser uma técnica deve ser ensinada de forma sistemática considerando-se toda as suas facetas. Assim, compreende-se que o RCA se destaca como norte para que as instituições de ensino municipais, estaduais e privadas se adequem às mudanças presentes na Base Nacional Comum Curricular - BNCC, desenvolvendo assim as especificidades, mudanças de estrutura curricular e novos projetos pedagógicos, sendo um documento norteador que considera a diversidade amazônica.

Peixes amazônicos

No que tange a diversidade biológica amazônica, serão apresentados os peixes mais populares e consumidos, que compõem a fauna amazônica com suas características principais: taxonomia, hábitat, hábitos e migração. Para tanto, tomou-se como base os escritos de Araújo 2014, Santos 2009. Desse modo, tem-se: O jaraqui que é um peixe membro da Ordem: Characiformes pertencente a família dos Prochilodontidae. Na Amazônia, existem apenas duas espécies de jaraqui que são: Jaraqui-escama-grossa e o Jaraqui-escama-fina.



Figura 1: - Jaraqui- escama-grossa (Jardine & Schomburgk), 1841 apud. Araújo, Vivaldo Campbell de p.10

O jaraqui de escama grossa: Nome científico: (Semaprochilodus insignis), que é a espécie mais comum. a nadadeira caudal é anal e apresenta-se com faixas transversais amarelas alaranjadas, as quais quando o peixe é maior de 30 cm ou bem mais adulto, esmaecem ou quase desaparecem. (Jardine & Schomburgk),1841 apud. Araújo, Vivaldo Campbell de p.10



Fígura 2: - Jaraqui-escama- fina (Jardine & Schomburgk), 1841 apud. Araújo, Vivaldo Campbell de p.10

O jaraqui-escama-fina: Nome científico: (Semaprochilodus taeniurus) com menor volume de consumo. No jaraqui de escama fina, a nadadeira caudal também se apresenta com faixas transversais amarelas alaranjadas, mas, em menor número e um pouco diferenciada, porém, não aparecendo essas faixas na nadadeira anal.

As diferenças entre as duas espécies estão nas escamas, que mesmo sendo, em ambas espécies, escamas do tipo ciclóide apresentam-se com tamanhos bem diferentes. E a outra diferença está entre as suas nadadeiras caudais e anal. As duas espécies habitam os rios da Amazônia, principalmente os grandes tributários do médio rio Amazonas. Esse peixe não sobe para o alto do

rio Amazonas/Solimões, como também não sobe para as cabeceiras dos seus caudalosos afluentes, nem desce o rio Amazonas até a sua foz, por isso não são encontrados nas feiras e mercados de Belém do Pará. Esse peixe possui dois habitats o primeiro é ao nascer nos grandes rios de água branca onde vive de 6 a 8 meses durante a seca dos mesmos. O segundo é quando já bastante crescido ou meia idade os rios começam a encher e eles nadam grandes distâncias rio abaixo para os pequenos rios e lago de águas pretas, com seus igapós. O jaraqui alcança o tamanho máximo de 36 cm de comprimento com peso que vai até 800 gramas, alimenta-se basicamente de detritos e fito plânctos (perifiton), conhecido como lodo e de micro crustáceos. (Jardine & Schomburgk),1841 apud. Araújo, Vivaldo Campbell de.



Figura 3: Tambaqui: Nome científico: Colossoma macropomum, (Santos, Geraldo Mendes) 2009, p.57

O tambaqui é onívoro, os adultos consomem basicamente frutos e sementes, tendo zooplâncton como complemento. É o único peixe de grande porte na Amazônia que possui rastros branquiais longos e fortes dentes molariformes, sendo uma característica anatômica singular que lhe permite alimentar-se tanto de zooplâncton quanto de frutos e sementes (Santos, Geraldo Mendes) 2009, p.57.



Figura 4: Pirarucu: Nome científico: Arapaima Gigas (Santos, Geraldo Mendes) 2009, p. 21

O pirarucu é carnívoro, consome basicamente peixes e ocasionalmente camarões, caranguejos e insetos; é territorialista, tem preferência por lagos e não realiza migrações consideráveis; respiração aérea obrigatória, permitindo ao peixe permanecer vivo fora da água por mais de 24 horas, desde que seu corpo seja mantido úmido; a tomada de ar atmosférico é vital e os adultos não toleram permanecer submersos sem vir à tona por mais de 40 minutos. (Santos, Geraldo Mendes) 2009, p. 21.

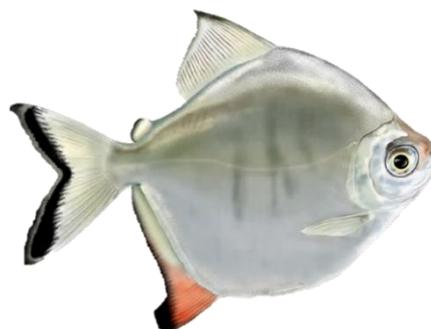


Figura 5: Pacu: Nome científico: (Myleus rubripinnis) (Santos, Geraldo Mendes) 2009, p.43

O pacu é um peixe herbívoro, alimenta-se basicamente de frutos e sementes e o pico da desova se dá no início da enchente; ocorre comumente em rios de água clara. Os pacus têm importância relativa em torno de 5% da produção total, representando o sexto lugar entre os peixes mais comercializados no mercado de Manaus. (Santos, Geraldo Mendes) 2009, p.43



Figura 6: Tucunaré: Nome científico: (Cichla monoculus) (Santos, Geraldo Mendes) 2009, p.126

O tucunaré é carnívoro, consome peixes e em menor escala, camarões, e eventualmente insetos; é sedentária e normalmente se refugia nas pausadas e galhadas submersas. O início da época reprodutiva coincide com o início da temporada de chuvas, ainda no período de águas baixas dos rios, estendendo-se pelo período de enchente; a fecundidade média é de aproximadamente 7.400 ovócitos por postura. (Santos, Geraldo Mendes) 2009, p.126



Figura 7: Branquinha: Nome científico:(curimata inornata) (Santos, Geraldo Mendes) 2009, p.61

A branquinha é um peixe detritívoro, consome matéria orgânica floculada, algas, detritos e microorganismos associados; sua distribuição está confinada à porção média e baixa da bacia amazônica, ocorrendo normalmente em lagos ou margens dos rios. (Santos, Geraldo Mendes) 2009, p.61



Figura 8: Surubim: Nome científico: Pseudoplatystoma punctifer, (Santos, Geraldo Mendes) 2009, p.103

O Surubim é um dos maiores peixes de água doce dos Brasil podendo pesar mais de cinquenta quilos e atingir mais de um metro de comprimento total. Outros nomes comuns: Pintado, cachara; pintadillo rayado (Colômbia); doncella (Peru); surubi (Bolívia) É um peixe Carnívoro, consome principalmente peixes; exemplares juvenis também consomem invertebrados, especialmente camarões; hábito noturno; É um peixe Carnívoro, consome principalmente peixes; exemplares juvenis também consomem invertebrados, especialmente camarões; hábito noturno (Santos, Geraldo Mendes) 2009, p.103



Figura 9: O curimatã (Prochilodus scrofa) (Santos, Geraldo Mendes) 2009, p.72

O curimatã é detritívoro, alimenta-se de algas perifíticas, microorganismos animais e matéria orgânica em decomposição geralmente depositada no fundo dos rios forma cardumes e empreende longas migrações; desova na enchente, em rios de água branca ou clara; os alevinos e jovens são criados nas áreas de várzea; comprimento padrão médio da primeira maturação sexual em torno de 26cm, quando os machos atingem cerca de 1,7 e as fêmeas, 2,1 anos de idade (Santos, Geraldo Mendes) 2009, p.72



Figura 10: Matrinxã: Nome científico: Brycon amazonicus (Santos, Geraldo Mendes) 2009, p.42

Matrinxã é um peixe de água doce chamado Matrinxã é onívoro, consome basicamente frutos, sementes, insetos e outros invertebrados; os jovens e pré-adultos têm maior preferência por peixes e artrópodes, enquanto os adultos preferem frutos e sementes. Outros nomes comuns: Rabo-de-fogo; sardina colimorada (Colômbia). (Santos, Geraldo Mendes) 2009, p.42



Figura 11: Mapará: Nome científico: *Hypophthalmus edentatus* (Santos, Geraldo Mendes) 2009, p.95

Mapará: Planctívoro, consome microcrustáceos, algas, larvas de insetos e outros itens diminutos filtrados na coluna d'água; desova parcelada durante o final da seca e início da enchente, produzindo cerca de 80.000 ovócitos, por desova; primeira maturação sexual aos 22cm de comprimento (Santos, Geraldo Mendes) 2009, p.95

Material e Métodos

A pesquisa foi desenvolvida em uma escola do Ensino Fundamental I, localizada na cidade de Manaus-AM, com uma turma de 5º ano, composta por 35 alunos, dos quais 10 (dez) alunos ainda não tinham consolidado as habilidades e competências referentes à leitura, fato constatado após a realização do teste diagnóstico inicial com a turma. A partir desse levantamento, surgiu a necessidade de buscar metodologias que pudessem contribuir com a aprendizagem desses alunos.

A metodologia aplicada foi a pesquisa de campo e a bibliográfica com abordagem qualitativa com a utilização das técnicas de observação e com a entrevista semiestruturada.

A pesquisa de campo ocorreu nos dias 15 e 16 de fevereiro de 2024, com o levantamento sobre os peixes amazônicos mais conhecidos pelos alunos através de entrevistas. Em seguida deu-se início a pesquisa bibliográfica para a caracterização dos peixes. A pesquisa de campo tem como objetivo de acordo com Lakatos e Marconi (2003, p.183), “obter informações e conhecimentos para o problema que procuramos respostas” e as pesquisas bibliográficas. Segundo Macedo (1994), consistem no primeiro passo para a elaboração de qualquer pesquisa científica, com o fim de revisar a literatura disponível e não redundar o tema de estudo.

Para Demo (2001, p.148) “A pesquisa qualitativa impõe-se sempre que se trate de temas que se interessem mais pela intensidade do que pela extensão dos fenômenos, como é o caso de participação, comunicação, aprendizagem e felicidade”.

A entrevista semiestruturada, que também é uma das formas mais utilizada quando se trata de pesquisa social, segundo Gil (2008, p.109) “pode-se definir entrevista como a técnica em que o investigador se apresenta frente ao investigado e lhe formula perguntas, com o objetivo de obtenção dos dados que interessam à investigação”. E a observação que segundo Marconi e Lakatos definem observação como “uma técnica de coleta de dados para conseguir informações e utiliza os sentidos na obtenção de determinados aspectos da realidade” (2003, p.190).

A aplicação do jogo aconteceu no período de 04 à 08 de Março de 2024, com os dez alunos com dificuldade na leitura e escrita.

Para a coleta de dados foi realizada a entrevista, assim como a observação verificando o interesse dos alunos ao realizar o jogo dominó dos peixes.

Resultados e Discussão

Através da aplicação do jogo didático constatou-se que os estudantes tiveram um interesse maior em relação à leitura e à escrita, fator que contribuiu positivamente com a aprendizagem dos mesmos.

Dessa forma, pode-se observar o lúdico como uma metodologia eficiente para o estímulo da leitura e escrita que deve ser orientado para a formação de leitores favorecendo a compreensão e interpretação dos textos. Segundo Rodari, “Ao incorporar elementos lúdicos nas atividades educacionais, é possível estimular a criatividade, motivar os estudantes e facilitar a assimilação dos conteúdos” (1993, p.30). Assim, foi aplicado um questionário e as respostas dadas atendem as categorias: conhecimento sobre os peixes amazônicos, leitura e escrita dos peixes, a importância de preservar o meio ambiente. Dos dez alunos observados que responderam ao questionário, 90% dos alunos, o que corresponde a nove alunos, relataram que já conheciam os peixes e foi mais fácil ler e escrever com o jogo dominó dos peixes. Registrou-se que 10% dos alunos, apenas um aluno, não conheciam todos os peixes e ainda precisa de uma intervenção pedagógica para consolidar as habilidades e competências referentes aos níveis de alfabetização. Porém, todos acham importante preservar o meio ambiente, conforme as respostas elencadas a seguir:

“Gostei muito do jogo dominó, eu não sabia o nome de alguns peixes, e o que mais gosto é o tambaqui, e é preciso cuidar do rio” (estudante M.F.S, 10 anos de idade).

“Eu ainda não sabia escrever o nome dos peixes, com o jogo foi mais fácil formar as palavras, e o que mais gosto é o tambaqui”. (estudante J.M.P, 10 anos de idade).

“Achei muito legal esse jogo de alfabetização, gostei de aprender a escrever e ler o nome dos peixes ” (estudante S.L. 10 anos de idade).

“É mais fácil aprender a ler assim usando um jogo do que só estudando no livro, eu gosto muito de jaraqui, mas não sabia que comer os peixes era importante para nós” (estudante R.M.S 10 anos de idade).

“É bem legal quando já conhecemos as coisas que a senhora fala, eu gosto de tambaqui, e não é bom jogar o lixo no rio, o peixe pode morrer” (estudante H.D.G, 10 anos de idade).



“É bem melhor aprender a ler usando um jogo, gostei muito. Eu gosto muito de jaraqui, mas não sabia que tem o de escama grossa e o de escama fina” (estudante M.A.R, 10 anos de idade).

“Gostei muito desse jogo e de conhecer o nome dos peixes também e fiquei pensando que não devo jogar lixo no rio, a água vai ficar suja e é muito ruim para o peixe” (estudante D.L.M, 10 anos de idade).

“Gostei muito desse jogo, com a imagen dos peixes para escrever o nome deles, alguns não conhecia” (estudante L.A.F., 10 anos de idade).

“Achei muito legal esse jogo, gostei de conhecer mais peixes e escrever assim vendo a imagen procurando as sílabas para escrever o nome deles, quando vou no supermercado com minha mãe vejo mais tambaqui” (estudante L.A.F., 10 anos de idade).

“Achei muito legal estudar com o joguinho, vou continuar fazendo para aprender ainda estou querendo aprender a ler e escrever e devemos falar para as pessoas não jogarem lixo no rio” (estudante R.D.S, 10 anos de idade).“

“Gostei muito desse jogo, com a imagen dos peixes para escrever o nome deles, eu gosto muito do tambaqui e para o peixe não morrer não é bom jogar lixo no rio” (estudante L.A.F. 10 anos de idade).

“Achei muito legal esse jogo, gostei de conhecer mais peixes e escrever assim vendo a imagen procurando as sílabas para escrever o nome deles, quando vou no supermercado com minha mãe vejo mais tambaqui” (estudante L.A.F., 10 anos de idade).



Figura 12: Dominó Peixes Amazônicos. (Carvalho & Cruz (2024))

Diante das respostas dos estudantes, é importante ressaltar que as mesmas foram positivas em relação à contribuição do jogo didático na construção da aprendizagem, mesmo já conhecendo os peixes, eles ainda não tinham percebidos que, aprender a escrever e a ler através de um jogo, seria mais fácil e a importância de cada um deles na alimentação e na sustentabilidade, assim como fonte de renda para várias famílias.

Considerações Finais

Uma metodologia de ensino inovadora como “Dominó dos Peixes”, possibilita a construção do conhecimento do estudante no qual, notou-se que os jogos estão sendo utilizados como estratégia educacional, pois, ensinar não é somente transferir o conhecimento, mas possibilitar ações criativas para um aprendizado mais significativo. Fazendo-se necessário uso de práticas criativas em que o professor incentive o aluno a sentir o prazer pela leitura, buscando assim seu crescimento intelectual.

Portanto, a educação ambiental representada nos peixes amazônicos pode ser um recurso didático muito rico e eficiente no processo de ensino aprendizagem dos alunos relacionar os conteúdos escolares com a realidade local, pode despertar a consciência ambiental dos alunos desde cedo com uma abordagem interdisciplinar é possível proporcionar uma aprendizagem significativa e contextualizada contribuindo para a formação de cidadãos mais conscientes e responsáveis em relação ao meio ambiente. Constatou-se que o lúdico possibilita o desenvolvimento da criança em toda as dimensões educacionais representando uma forma alternativa de aprender uma vez que, brincar não é um aspecto primordial da infância, mas é um fator essencial no desenvolvimento. Assim, as informações resultantes dessa pesquisa nos possibilitaram entender que o jogo como recurso didático enfatizando os conhecimentos prévios dos estudantes é eficiente no processo ensino-aprendizagem.

Referências

ARAÚJO, Vivaldo Campell. **Peixes amazônicos: o jaraqui**. Manaus: Ltda, 2024.

AUSUBEL, David Paul. **Aquisição e retenção de conhecimentos**. Lisboa: Plátano Edições Técnicas, 2003.

BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília: MEC, 2018.

_____. Ministério da Educação e do Desporto. **Parâmetros Curriculares Nacionais : 3º e 4º ciclos do Ensino Fundamental: introdução aos Parâmetros Curriculares Nacionais**. Secretaria da Educação Fundamental. Brasília:MEC/SEFE,1998.



_____. Lei n.9795 de 27 de abril de 1999. Presidência da República. Dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências. Disponível <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19795.htm> Acesso em: 10 out.2023.

_____. Lei n.3.222 de 02 de Fevereiro de 2008. Presidência da República. Dispõe sobre a Política de Educação Ambiental, do Estado do Amazonas e dá outras providências. Disponível <<https://sapl.al.am.leg.br>> Acesso em: 20 de fev. 2024.

CRUZ, Silvana Heloísa Ferreira. **A Educação Ambiental no Município de Parintins em relação às Atividades Antrópicas e sua Problemática Ambiental.** Dissertação (Mestrado em Educação), Faculdade de Educação, Universidade Federal do Amazonas, 2002.

DEMO, Pedro. **Pesquisa e informação qualitativa: aportes metodológicos.** Campinas, SP: Papirus, 2001.

GIL, A.C. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

IBRAHIN, Francini Imene Dias. **Educação ambiental: estudos dos problemas, ações e instrumentos para o desenvolvimento da sociedade.** São Paulo: Érica, 2014.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica.** 5. ed. - São Paulo: Atlas 2003.

LUDKE, Menga; ANDRE, Marli, E. D. A. **Pesquisa em educação. Abordagens Qualitativas.** São Paulo. EPU, 1986.

MACEDO, Neusa Dias de. **Iniciação à pesquisa bibliográfica: guia do estudante para a fundamentação do trabalho de pesquisa.** 2. ed. São Paulo: Loyola, 1994.

ORTIZ SARABIA, Raul Hernan. **Educação ambiental nas escolas rurais do município de Manaus** In: MIRANDA, Alair dos Santos Silva et al. Educação Ambiental: estudos numa perspectiva para uma sociedade sustentável no município de Manaus. Manaus: EDUA, 2004.:

RIBEIRO, Suely de Souza. **A Importância do lúdico no processo de ensino- aprendizagem no desenvolvimento da infância,** 2013.< Disponível em <https://psicologado.com/atuacao/psicologia-escolar/a-importancia-do-ludico-no-processo-de-ensino-aprendizagem-no-desenvolvimento-da-infancia>> Acesso em 08 de set. de 2023.

RODARI, Gianni. **Gramática da Fantasia.** Lisboa: Editorial Caminho, 1993.

SANTOS, Geraldo Mendes dos; FERREIRA, Efreim Jorge Gondim.; ZUANON, Jansen Alfredo Sampaio. Peixes comerciais de Manaus. Disponível em < <https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/4700>> Acesso: 15 de jan. de 2024.

SOARES, Magda. **Alfabetização e letramento.** In: Referencial Curricular Amazonense. Disponível em < <http://www.cee.am.gov.br>> Acesso: 20 de jan. de 2024.

_____. _____. 7. ed. São Paulo: Contexto, 2021.

SOLÉ, Isabel. **Estratégias de Leitura.** 6. ed. Traduzido por Cláudia Schilling. Porto Alegre: Artmed, 1998

YGOTSKY, Lev. **A formação social da mente.** São Paulo: Martins Fontes, 1984.



ECOTURISMO BASEADO NO MAPEAMENTO GEOGRÁFICO DO PARQUE NACIONAL DO ITATIAIA NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

**1Marco Aurélio Kondracki de Alcântara, 2Gabriel da Silva Albuquerque,
3Marcia Christini Chagas Rodrigues, 4Rafael Venâncio Pereira**

1 Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de Lorena, marko@usp.br; 2 Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de Lorena, gabriel702@usp.br; 3 Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de Lorena, marciachristinichagasrodrigues@usp.br; 4 Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de Lorena, rvpereira@usp.br

Palavras-chave: Parque Nacional do Itatiaia; Educação Ambiental; Turismo ecológico.

Resumo

O ecoturismo é uma vertente do turismo convencional, onde se utiliza da prática da sustentabilidade, da proteção e da responsabilidade com Áreas de Preservação Ambiental ou Unidades de Conservação (UCs). Sendo assim, se caracteriza como uma atividade turística sustentável, onde o foco principal é a conservação do meio ambiente e o enriquecimento cultural dos visitantes, sem prejudicar os seres ou o meio ambiente; uma vez que, a sustentabilidade busca o desenvolvimento em equilíbrio entre o mundo ecológico, econômico e social. O Parque Nacional do Itatiaia (PNI), localizado no sul do estado do Rio de Janeiro, é o primeiro parque nacional do Brasil. Atualmente o parque é dividido em duas grandes áreas com características geográficas diferentes, denominadas de Parte Alta e de Parte Baixa. O projeto foi desenvolvido junto a alunos do Curso de Engenharia Ambiental, da Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Brasil. O projeto ofereceu a oportunidade da visita e estudo de áreas de conservação da Parte Baixa do PNI. Dessa forma, o ecoturismo desempenha um papel fundamental na formação de estudantes conscientes e engajados, preparando-os para enfrentar os desafios ambientais do mundo atual e do futuro. Essas experiências oferecem oportunidades únicas para as pessoas aprenderem sobre a importância da preservação dos ecossistemas, a biodiversidade e os impactos das atividades humanas no meio ambiente. Ao conectar as pessoas com a natureza de maneira respeitosa e sustentável, o ecoturismo inspira ações individuais e coletivas em prol da conservação, contribuindo assim para a formação de uma sociedade mais consciente e engajada na proteção do planeta.

Introdução

Os parques nacionais são de extrema importância para o incentivo à proteção de áreas naturais e com uma vasta biodiversidade. Os parques nacionais foram definidos, pela União Internacional para Conservação da Natureza (IUCN), como áreas protegidas da Categoria II, sendo caracterizadas como: “área natural extensa de terra ou mar de grande relevância para a conservação da natureza e da biodiversidade, destinada a: (1) proteger a integridade ecológica de um ou mais ecossistemas para as gerações presentes e futuras; (2) excluir a exploração ou ocupação não ligadas à proteção da área; e (3) prover as bases para que os visitantes possam fazer uso educacional, lúdico, ou científico de forma compatível com a conservação da natureza e dos bens culturais existentes”.

O Parque Nacional do Itatiaia (PNI), localizado no sul do estado do Rio de Janeiro, é o primeiro parque nacional do Brasil. Criado como uma unidade de conservação brasileira de proteção integral ambiental através do Decreto nº 1713, de 14 de junho de 1937, emitido por Getúlio Vargas, a partir da Estação Biológica de Itatiaia. Atualmente o parque é dividido em duas grandes áreas com características geográficas diferentes, denominadas de Parte Alta e de Parte Baixa. A Parte Alta do Parque está situada no maciço das Agulhas Negras que é a principal elevação no planalto, seu pico atinge 2.791,55 m, o ponto mais alto do Parque e quinto mais alto do país segundo dados do IBGE de dezembro de 2004 (IBGE, 2004). A Parte Baixa do Parque caracteriza-se principalmente por sua vegetação exuberante e rica área hidrológica, com diversas áreas apropriadas para banho.

Durante a execução do projeto, a parte baixa foi analisada principalmente quanto a sua biologia, buscando apresentar aos alunos a grande diversidade encontrada nesta região, uma vez que, esta área de proteção ambiental nacional se localiza dentro da Mata Atlântica, enquanto a Parte Alta foi analisada quanto a formação geológica presente na região.

A Parte Baixa do parque apresenta uma diversidade de ecossistemas, incluindo florestas tropicais e cachoeiras deslumbrantes, proporcionando oportunidades para a observação da fauna e atividades recreativas ao ar livre. Por outro lado, a Parte Alta do parque abriga picos imponentes, como o Pico das Agulhas Negras, e ecossistemas de alta montanha, oferecendo habitats únicos para uma variedade de espécies vegetais e animais. Essa área serve como um refúgio vital para a fauna e flora endêmicas, além de contribuir para a preservação de importantes mananciais hídricos regionais.

Ambas as partes do parque desempenham um papel complementar na educação ambiental, permitindo que visitantes e pesquisadores compreendam a interconexão entre os diferentes habitats e os impactos das atividades humanas na conservação da natureza. Além disso, a presença de trilhas e programas de educação ambiental em ambas as áreas oferece oportunidades para sensibilizar e engajar o público na proteção e preservação desses ecossistemas preciosos. Portanto, a importância da parte alta e baixa do Parque Nacional do Itatiaia reside não apenas em sua riqueza natural, mas também em seu potencial para inspirar a conservação e o respeito pela natureza em todas as suas formas.



O desenvolvimento do projeto envolveu o planejamento de um cronograma e produção de materiais didáticos para uma aula expositiva e a organização de uma visita a Parte Baixa do Parque Nacional do Itatiaia, realizada para os alunos da disciplina de Ecologia Básica (LOB 1205) do Campus Escola de Engenharia de Lorena, assim como a elaboração de certificado que atesta a presença na visita ao PNI, e a participação no projeto.

O projeto teve por objetivo trazer aos alunos, da graduação em Engenharia Ambiental da Escola de Engenharia de Lorena (EEL-USP), uma experiência imersiva em áreas de proteção ambiental, que são de extrema importância para a conservação da nossa biodiversidade, evidenciando a educação ambiental. Como parte desse objetivo, foi realizado um seminário expositivo que ocorreu no Campus em questão (EEL-USP) e um ecoturismo panfletado, que foi oferecido aos alunos interessados de Engenharia Ambiental da Escola de Engenharia de Lorena, por meio de uma excursão presencial à Parte Baixa do Parque, focando na importância do parque para o país e no estudo geográfico no Parque Nacional do Itatiaia.

Material e Métodos

Este trabalho é decorrente de um projeto do Programa Unificado de Bolsas (PUB), da Universidade de São Paulo, intitulado “Ecoturismo Baseado no Mapeamento Geográfico da Parte alta e Baixa do Parque Nacional do Itatiaia no Estado do Rio de Janeiro. Os alunos alvo do Projeto na sua maioria eram matriculados na Disciplina de Ecologia Básica (do primeiro semestre do Curso) e do Centro Acadêmico da Engenharia Ambiental.

Neste projeto, executamos uma visita à Parte Baixa do Parque Nacional do Itatiaia (PNI), que visou promover, além de um maior aproveitamento durante a disciplina de Ecologia Básica, uma experiência imersiva na primeira unidade de conservação (UC) do Brasil, além de um processo andragógico em relação a importância dessas UCs e a prática do ecoturismo.

A andragogia foi uma das principais bases teóricas para a realização do projeto, sendo uma abordagem educacional centrada no aprendizado adulto. Diferente da pedagogia, que se concentra na educação de crianças, a andragogia reconhece as características e necessidades específicas dos adultos em seu processo de aprendizagem. Ela parte do pressuposto de que os adultos são autodirigidos e têm uma vasta experiência acumulada que pode ser aproveitada no processo educativo. Portanto, as estratégias andragógicas enfatizam a participação ativa dos adultos na definição de seus objetivos de aprendizagem, na aplicação de conhecimentos em situações práticas e na resolução de problemas relevantes para sua vida pessoal e profissional. O papel do educador na andragogia é o de facilitador do processo de aprendizagem, proporcionando um ambiente que incentive a reflexão, o diálogo e a colaboração entre os alunos adultos. Essa abordagem tem sido amplamente adotada em programas de educação continuada, treinamento profissional e educação de adultos, reconhecendo a importância de uma abordagem adaptada às características e necessidades específicas desse público.

O desenvolvimento deste projeto foi realizado em diferentes etapas com atividades para dois bolsistas que trabalharam em conjunto e individualmente. O trabalho se iniciou com a revisão bibliográfica e levantamento de dados pelos bolsistas por meio da busca de materiais bibliográficos referente às especificidades das áreas em estudo, bem como pesquisa de campo no parque em questão. Seguido do estudo da história do Parque Nacional do Itatiaia por meio de pesquisas bibliográficas e busca de informações sobre a criação e o desenvolvimento do parque ao longo dos anos, contando com a dedicação para estudar a geografia do Parque. Em seguida foi realizado a preparação do conteúdo expositivo e do material a ser exposto antes e durante a excursão.

Para a logística da excursão, cada bolsistas ficou responsável por uma parte da organização da excursão, desde o transporte até conseguir o acompanhamento de um guia para acompanhar o ecoturismo.

Para o desenvolvimento deste projeto foi necessário a participação de dois bolsistas. O plano de atividades desenvolvido pelos bolsistas está no Quadro 1.

Quadro 1: Atividades desenvolvidas pelos bolsistas

Revisão bibliográfica e levantamento de dados para o projeto	
Estudo da história e da geografia do Parque Nacional	
Elaboração de um seminário sobre as informações recolhidas (apresentado antes da visitação)	Elaboração de um panfleto sobre as informações recolhidas (entregue durante a visitação)
Seleção dos estudantes que irão à excursão	
Procura de empresas de ônibus e trabalho na logística de transporte	Conversas com a Secretaria do parque sobre a excursão e definição de um guia para acompanhar o ecoturismo
Construção de um artigo sobre o Parque Nacional do Itatiaia	
Elaboração do relatório sobre o projeto	



Para o início do desenvolvimento do projeto, foram realizadas reuniões entre os bolsistas que efetuaram um levantamento de dados e revisões bibliográficas para auxiliar os estudos sobre o PNI. Para melhor organização dos bolsistas, foi criada uma pasta compartilhada no Drive para a junção de todos os materiais de pesquisa encontrados, além da criação de pastas e documentos. Em seguimento, os bolsistas entraram em contato com a secretaria do parque para proceder com os requisitos para a realização da visita. Por se tratar de uma visita didática em um local de conservação federal, foi necessário um requerimento pelo Sistema de Autorização e Informação em Biodiversidade (SISBIO). Após a autorização concedida pelo SISBIO, também nos foi dada uma isenção da taxa de entrada, e então foi definida a data da visita (que ocorreu no dia 2 de Junho de 2023). Os participantes, para as primeiras vagas foram selecionados os alunos da disciplina de Ecologia Básica. A escolha dessa disciplina se deveu não somente devido à área de conhecimento, mas também por ser oferecida para alunos ingressantes no Curso de Engenharia Ambiental. Para as vagas remanescentes, foi enviado um formulário nos grupos do WhatsApp dos alunos da graduação em Engenharia Ambiental e dos participantes do Centro Acadêmico de Engenharia Ambiental.

Ao longo da realização do projeto, os bolsistas obtiveram informações sobre a história do Parque, sua geografia e sua biodiversidade, no acervo presente no *site* do Parque. Esse conteúdo foi utilizado para uma apresentação pelos alunos bolsistas em aula. Além disso, foi elaborado um formulário buscando avaliar os conhecimentos prévios dos participantes em relação ao que abordamos durante o projeto.

Uma das propostas dos bolsistas foi a elaboração de um questionário avaliativo sobre a satisfação dos participantes da primeira edição do projeto. Essa pesquisa visou saber o grau de conhecimento adquirido como: qualidade dos materiais utilizados, métodos utilizados pelos bolsistas etc. Além disso, foi feita uma pesquisa sobre o interesse na participação de edições futuras.

A organização de um ecoturismo no Parque Nacional do Itatiaia (PNI) requer uma abordagem cuidadosa e sustentável para garantir a preservação dos recursos naturais e proporcionar experiências enriquecedoras para os visitantes. Aqui estão algumas etapas trabalhadas e desenvolvidas durante o planejamento das atividades.

Iniciou-se por realizar uma pesquisa detalhada sobre os recursos naturais do parque, suas trilhas, atrativos e limitações. Desenvolvendo um plano de ecoturismo que levaria em consideração a conservação ambiental, os impactos socioeconômicos e a segurança dos visitantes. Depois de identificadas as rotas de trilhas e os principais atrativos naturais do parque, como montanhas, cachoeiras, mirantes e áreas de observação da fauna e flora, os bolsistas entraram em contato com o Parque para a realização da visita gratuita e com empresas de ônibus para concluir a melhor possibilidade de transporte.

Além dos pontos citados anteriormente, foi importante durante a realização do projeto, a implementação de programas de educação ambiental para os visitantes, destacando a importância da conservação e práticas de mínimo impacto. Processo realizado como aula expositiva, as quais todos os visitantes precisariam assistir.

Resultados e Discussão

O projeto iniciou-se com o Planejamento e aquisição de informações, portanto foi criado um drive para facilitar a disposição das informações coletadas durante as pesquisas sobre o PNI (Figura 1).

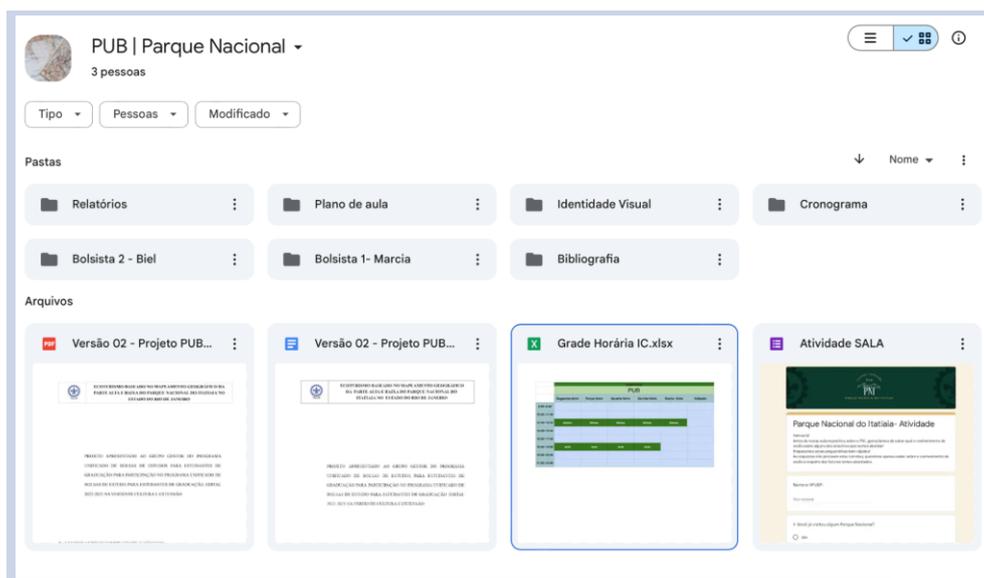


Figura 1: Drive do projeto para organização

Em seguida, o contato com o parque foi realizado via e-mail, onde foi possível tirar dúvidas sobre a possibilidade da visita e os requisitos necessários para a mesma, criando também a estrutura da visita. Os alunos selecionados para a visita responderam um formulário de inscrição e os dados foram passados, em formato PDF, para a secretaria do Departamento de Ciências Básicas e Ambientais do Campus da Universidade de São Paulo em Lorena, com o pedido e a solicitação do ônibus.



Após a coleta de dados, foi elaborado o material para a aula expositiva e o questionário, para isso foram utilizados o CANVA e o Google Formulário. A aula foi ministrada pelos bolsistas no dia antecedente a visita e foi aberta a todo o público da EEL-USP, sendo ministrada sobre a Parte Alta pelo bolsista Gabriel da Silva Albuquerque, e sobre a Parte Baixa pela bolsista Marcia Christini Chagas Rodrigues. Durante a aula foram passadas informações sobre o que iria acontecer no dia seguinte e foram tiradas dúvidas dos participantes.



Figura 2: Bolsista do projeto ministrando aula sobre o ecoturismo e o Parque Nacional do Itatiaia. Parte da apresentação realizada sobre o projeto, ecoturismo e educação ambiental

Foi elaborado um questionário com objetivo avaliar o conhecimento prévio dos alunos, podendo explicar o impacto que o projeto teve na vida dos envolvidos, neste formulário foram abordados conhecimentos específicos que futuramente seriam falados. Um questionário avaliativo desempenha um papel fundamental na coleta de informações e *feedback* dos participantes de um evento, programa, serviço ou produto, podendo evidenciar se os resultados esperados foram alcançados durante a realização do projeto ou da pesquisa abordada. Sua importância reside em várias áreas, permitindo avaliar o desempenho de um evento, programa ou serviço em relação aos objetivos estabelecidos, fornecendo dados concretos sobre o que funcionou bem e o que precisa ser melhorado. Além de oferecerem uma maneira de os clientes ou usuários expressarem suas opiniões, sugestões e preocupações, através da análise dos dados do questionário, é possível identificar áreas de melhoria e implementar mudanças para aprimorar a qualidade e eficácia do que está sendo avaliado. Isso contribui para uma cultura de melhoria contínua e inovação.

Os questionários foram ofertados antes e depois da visita, com o objetivo de coletar as expectativas e conhecimentos prévios e, posteriormente, receber um feedback para melhorias de próximos anos, portanto esse método foi útil para avaliar o impacto de intervenções ou iniciativas específicas. Eles permitiram medir o progresso em relação aos objetivos estabelecidos e determinar o valor agregado de determinadas ações.

Em resumo, um questionário avaliativo é uma ferramenta poderosa para coletar dados e feedbacks valiosos que podem informar a tomada de decisões, promover melhorias contínuas e garantir a satisfação do público-alvo, sendo um dos principais indicadores de sucesso para o projeto “ECOTURISMO BASEADO NO MAPEAMENTO GEOGRÁFICO DA PARTE ALTA E BAIXA DO PARQUE NACIONAL DO ITATIAIA NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO”.

Nas Figuras 4 a 8 são apresentadas as respostas a algumas perguntas do questionário realizado antes da viagem.

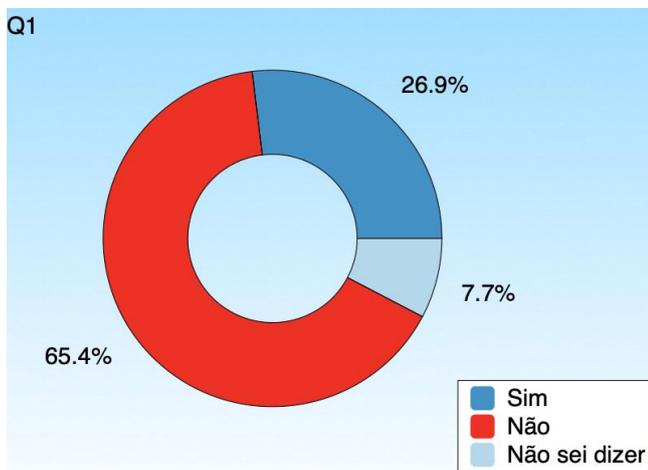


Figura 4: Pergunta do questionário avaliativo: “Você já visitou algum Parque Nacional?” (n = 26).

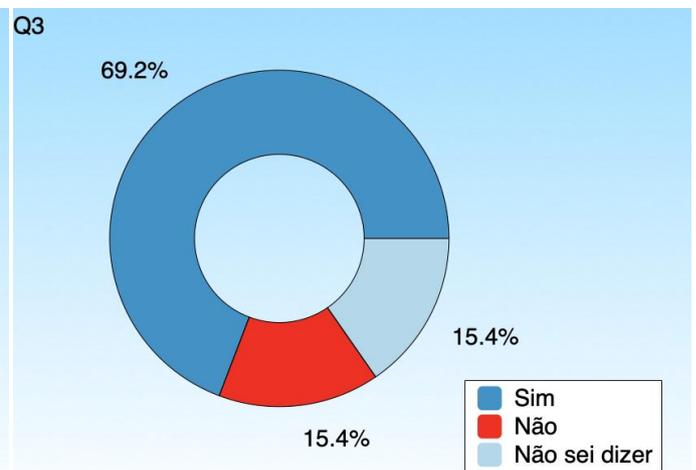


Figura 5: Pergunta do questionário avaliativo: “Você sabe a importância de um Parque Nacional?” (n = 26).

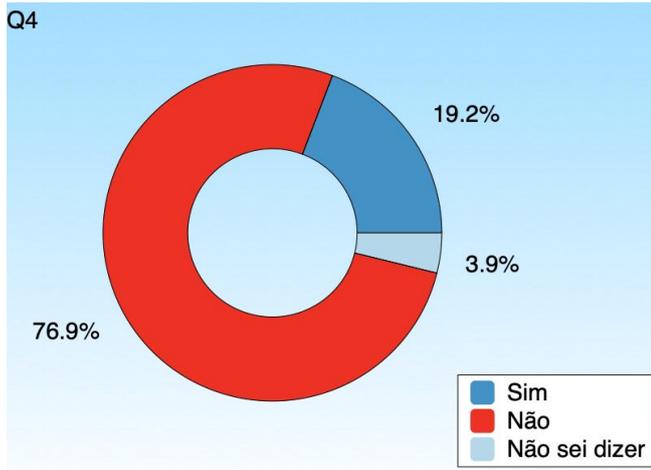


Figura 6: Pergunta do questionário avaliativo: “Você sabe o que é o Sapo Flamenguinho?” (n = 26).

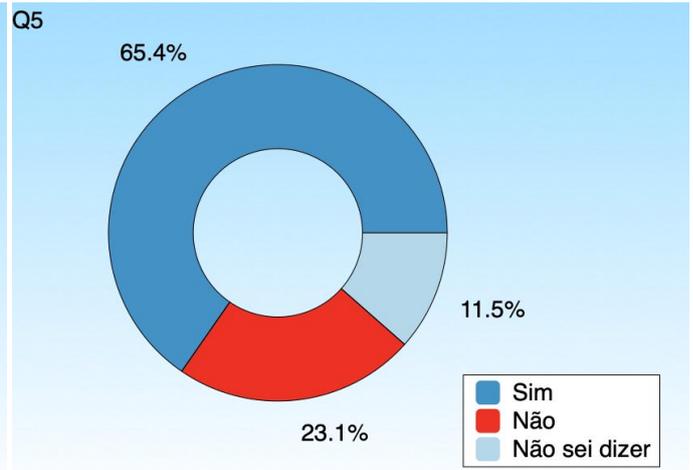


Figura 7: Pergunta do questionário avaliativo: “Você já ouviu falar de Hotspots Ambientais?” (n = 26).

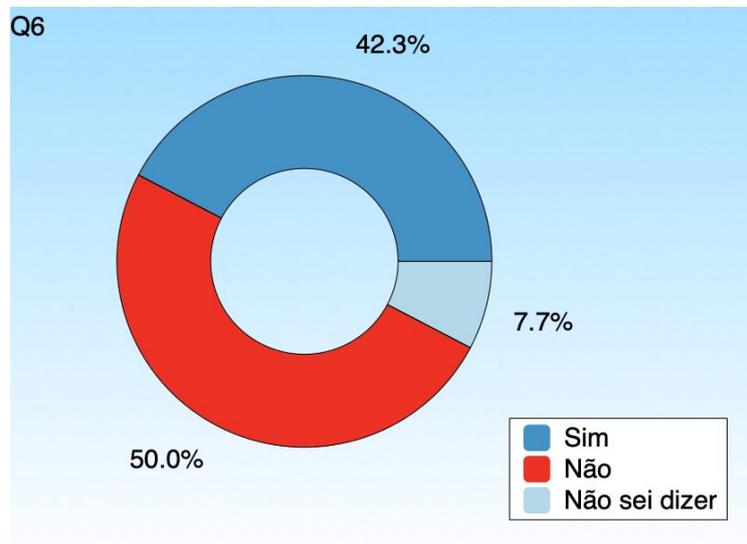


Figura 8: Pergunta do questionário avaliativo: "Você sabia que o PNI foi o primeiro parque nacional do Brasil?" (n = 26).

Durante a análise das respostas do questionário atribuído para o projeto, o grupo identificou uma lacuna significativa em relação às informações ambientais essenciais que os participantes deveriam possuir. Essas informações são cruciais para promover a conscientização e o engajamento dos participantes em questões ambientais pertinentes, neste caso a educação ambiental, e o turismo ecológico, como também características geográficas da região, uma vez que o tema se liga diretamente com a formação do Engenheiro Ambiental. Portanto, reconhecemos a necessidade urgente de integrar essas informações de forma mais abrangente e acessível no projeto e no questionário, a fim de garantir que os participantes estejam bem informados e capacitados após a participação.

Após a realização da aula e a ida ao Parque Nacional do Itatiaia, foi pedido aos participantes responderem um questionário de feedback, dando suas opiniões sobre a experiência. Nas Figuras 9 e 10, são apresentadas as respostas a algumas perguntas do questionário realizado depois da viagem:



Próxima edição?

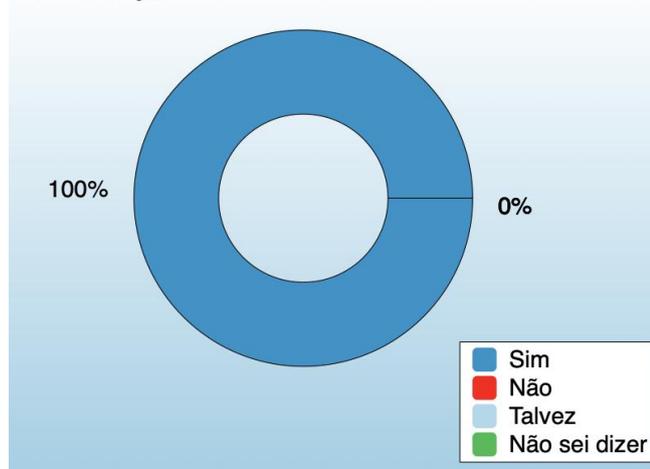


Figura 9 – Pergunta do questionário de feedback: "Você participaria de uma próxima edição do projeto?" (n = 19).

Formação e vivência?

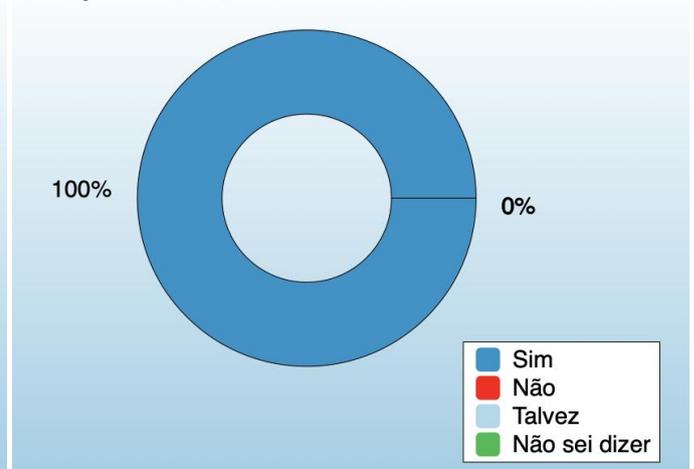


Figura 10 – Pergunta do questionário de feedback: Você acha que visitas, como a do PNI, são interessantes para sua formação e vivência?" (n = 19).

Interpretamos que este trabalho teve grande contribuição para a formação acadêmica dos bolsistas e dos estudantes visitantes, possibilitando uma andragogia, onde os alunos puderam adquirir e aprimorar sua visão em relação às atividades de educação ambiental, recreação em contato com a natureza e ao turismo ecológico, além de vivenciarem uma experiência imersiva. Portanto o projeto teve um impacto positivo considerável na vida dos participantes.

Considerações Finais

O projeto de Ecoturismo cumpriu com seus objetivos, no que diz respeito ao oferecimento de uma experiência imersiva em uma área de conservação e extrema importância ambiental, conforme evidenciado pelos resultados finais presentes neste artigo, e em relação ao aprendizado dos bolsistas responsáveis, os quais tiveram a oportunidade de se aprofundarem nos assuntos em questão. Como indicativo de resultado, a visita à áreas de preservação ambiental pelos estudantes da EEL-USP está sendo gradualmente inserido na universidade, sendo que o projeto de Ecoturismo Baseado no Mapeamento Geográfico da Parte Alta e Baixa do Parque Nacional do Itatiaia no Estado do Rio de Janeiro contribuiu de forma relevante nesse aspecto, impactando positivamente o Campus de Lorena. Por fim, o projeto possibilitou um contato direto entre os alunos da graduação em Engenharia Ambiental com o primeiro Parque Nacional do Brasil.

Agradecimentos

Os Autores agradecem ao Programa Unificado de Bolsas da USP, pelas Bolsas concedidas aos Bolsistas (Projeto 3327 na modalidade Cultura e Extensão: "Ecoturismo Baseado no Mapeamento Geográfico da Parte Alta e Baixa do Parque Nacional do Itatiaia no Estado do Rio de Janeiro").

Referências Bibliográficas

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Anuário Estatístico do Brasil. 2004.

ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Parque Nacional de Itatiaia - Home. 2022. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/parnaitatiaia/> . Acesso em: 9 jun. 2022.

Monteiro, D.; Guimarães, E.F. Flora do Parque Nacional do Itatiaia - Brasil: Peperomia (Piperaceae). Rodriguésia, v. 59, n. 1, p. 161–195, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rod/a/3KbH9T9Pr3nYFjTCXgGx7wc/?format=pdf&lang=pt> . Acessado em 8 jun 2023.



CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ÁREA DE INFLUÊNCIA DO “CEMITÉRIO VICENTINO” EM PONTA GROSSA/PR

1Édipo Rafael dos Santos; 2Maria Lígia Cassol Pinto

Universidade Estadual de Ponta Grossa, e-mail: 24040100006@uepg.br; 2 Universidade Estadual de Ponta Grossa, e-mail: ligialhc@gmail.com.

Palavras-chave: Cemitério; Contaminação; Solo.

Resumo

Qualidade ambiental é um dos temas que deve ser tratado com urgência, seja para garantir que o solo, a água e o ar não sejam comprometidos pelas ações antrópicas, seja para garantir a sanidade à vida humana. As atividades cemiteriais se enquadram dentro das atividades antrópicas que podem comprometer a qualidade do solo, de seu entorno, e das águas subterrâneas, na dimensão de bacias hidrográficas, caso não seja dada a devida atenção às questões ambientais no local. Ao longo da história muitos países sofreram com problemas sanitários e ambientais ligados com esse tipo de atividade. O Brasil passou a regulamentar as atividades cemiteriais a partir da Resolução CONAMA nº 335, de 03 de abril de 2003, definindo os “cemitérios como fonte de contaminação que devem estar sujeitos a etapas de licenciamento ambiental para a sua instalação a partir desta data”. No entanto, ainda neste primeiro quartel do século XXI, no Brasil muitos dos cemitérios urbanos ou rurais não se adequaram as condições exigidas na resolução federal e nas demais leis estaduais e municipais que visam regulamentar este tipo de atividade. No município de Ponta Grossa existem vinte e um (21) cemitérios, sendo sete (7) em perímetros urbanos e quatorze (14) no meio rural. Dentre todos os cemitérios existentes em Ponta Grossa destaca-se o “São Vicente de Paula”, conhecido como “Cemitério Vicentino”, por ser um dos mais ativos do município, recebendo, aproximadamente, 1.400 sepultamentos anuais, em tempos normais, de acordo com o Serviço Funerário Municipal. Com mais de quarenta e oito (48) anos de implantação, o “cemitério Vicentino” é um dos mais antigos do município, tendo sido implantado numa porção do perímetro urbano que não tinha uma ocupação expressiva de moradias e indústrias. Com o crescimento da população urbana e da área da cidade, a necessidade de espaços para novas residências, estas hoje chegam muito próximo ao muro que as separam das quadras de sepultamento. No momento de sua implantação o município de Ponta Grossa passava por uma fase crescimento populacional devido ao avanço industrial que o município vivenciava na década de 1970. A oportunidade de emprego na indústria fez com que aumentasse a população que vinha em busca de trabalho e melhores condições de vida, o que levou o poder público a buscar meios para sanar os problemas de serviços básicos a população. Um dos problemas enfrentados era a falta de espaço para sepultar pessoas que não tinham condições de adquirir uma sepultura nos cemitérios particulares. Com isso, foi criado o Cemitério São Vicente de Paula, conhecido como “Cemitério Vicentino”. O cemitério em questão é do tipo parque ou jardim e realiza sepultamentos direto no solo para diminuir os custos e poder atender a população que não tem onde sepultar os seus mortos. Localizado na sub-bacia do rio Cará-cará, que é afluente da bacia do rio Tibagi. Ao consultar o estado da arte da produção acadêmica sobre cemitérios do município e da região, poucos estudos são encontrados com uma abordagem ambiental sobre cemitérios e seus riscos ao meio ambiente e a população. O presente trabalho apresenta uma caracterização do solo na área do *Cemitério Vicentino* visando identificar a presença ou não de condições naturais favoráveis para este tipo de atividade. Para a realização desta pesquisa foi realizado coletas de solos em quatro pontos do cemitério em três profundidades, sendo 0-40, 60-80 e 100-120 cm. As amostras foram coletadas respeitando as condições da vertente onde o cemitério se encontra. Após a coleta as amostras foram levadas ao LAGEF-UEPG (Laboratório de Geografia Física - Universidade Estadual de Ponta Grossa) e submetidas a análise granulométrica de acordo com o Manual de Análises de Solo da Embrapa (2017). Em busca na literatura sobre os solos do município, o solo da área de estudo é identificado como uma Associação de Latossolo Vermelho Distrófico típico e Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico típico, ambos de textura argilosa: classificado como A proeminente álicos, fase campo subtropical, em relevo suave ondulado. Após as análises granulométricas, foi utilizado o Triângulo Textural de solos, de acordo com o Manual de Descrição de Coletas de solo no campo - Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, para identificar qual a classe de solos pertence. Os solos do cemitério pertencem, predominantemente à classe muito argilosa, com apenas uma amostra na classe argila. Os latossolos possuem um certo grau de restrições para este tipo de atividades pela alta capacidade de retenção de água, erodibilidade e profundidade até o embasamento rochoso. Devido a essas restrições podem ocorrer um alto risco de impacto no aquífero e subsidências na superfície. Os argissolos **possuem muita restrição** pela alta capacidade de retenção de água, permeabilidade e erodibilidade. Por essas condições do solo os problemas podem afetar na decomposição dos cadáveres com retardamento excessivo do processo de decomposição, saponificação, impedimento da depuração de gases fúnebres e riscos de subsidência. Por estar em solos com alta CTC (Capacidade de Troca Catiônica), que serve como um filtro natural para reter contaminantes, pode ter sido a condição natural, na época da implantação que levou a escolha do local. No entanto, devido a forma de sepultamentos e pela quantidade anual, deve-se analisar melhor as condições do solo para amenizar os riscos ao meio ambiente e a saúde da população. Por fim, este estudo evidencia a importância de buscar meios que possam acabar ou amenizar os riscos ao meio ambiente e aos munícipes de Ponta Grossa, sugerindo medidas mitigadoras de impactos ambientais, que possa ser acessível ao poder público municipal para continuar atendendo a população que não possui condições para adquirir sepulturas particulares em outros cemitérios do município e da região.



Introdução

O sepultamento não é uma prática recente, pois desde muito tempo os seres humanos se preocuparam onde deixar os seus falecidos: a inumação associada ao rito fúnebre vem desde o tempo do homem pré-histórico (Pacheco, 2000).

De acordo com V. S. Carneiro (2008), a prática de sepultamento, como conhecemos atualmente, foi adotada com o surgimento do cristianismo. Primeiramente, as pessoas eram sepultadas dentro das igrejas, por se acreditar que ali era o melhor lugar para os mortos ficarem mais próximos a Deus. Essa prática perdurou por um certo tempo. E eram aqueles que tinham poder aquisitivo que podia desfrutar do privilégio que, aos olhos de muitos, era um método de garantir a sua salvação e permanecer em paz. No entanto, por questões sanitárias e de higiene, o odor que vinha dos cadáveres despertou nas pessoas, que frequentavam igrejas, um receio em ser contaminada pelas mesmas doenças que as pessoas haviam falecido. E essa prática foi proibida (V. S. Carneiro, 2008).

Após cessar essa prática, dos sepultamentos dentro de igrejas, os falecidos passaram a ser enterrados em Campos no entorno das cidades, povoados ou em qualquer outro lugar com a intenção de evitar problemas aos cidadãos (Pacheco, 2000).

Mesmos distantes das áreas mais povoadas, os sepultamentos podem causar uma série de outros problemas ambientais, fato que se agrava, em especial, quando instalados em qualquer perímetro urbano. Os problemas decorrem do fato dos cemitérios representarem um potencial de contaminação do solo e da água, podendo desencadear sérios problemas sanitários em meio à população (Pacheco, 2000). Os cemitérios em áreas urbanas ou rurais possuem características que os diferenciam na sua nomenclatura, sendo do tipo cemitério horizontal, cemitério parque ou jardim, cemitério vertical e cemitério de animais.

O corpo humano após o sepultamento passa por uma série de transformações até desaparecer: a autólise, putrefação e saponificação. A autólise acontece no primeiro estágio após o sepultamento quando as células perdem o contato com o oxigênio da superfície e as enzimas do próprio corpo atuam dissolvendo a matéria orgânica; a putrefação, que consiste na destruição dos tecidos e órgãos por bactérias e microrganismos, libera gases como o metano (CH₄), que provoca pequenas explosões lançando esses gases ao ar livre e em seguida o corpo passa por um processo gasoso que produz e libera necrochorume que pode chegar de 7 a 12 litros por um período de tempo que varia de 1 a 4 semanas; a saponificação ocorre em lugares úmidos ou quando as sepulturas ficam cheias de água e os restos mortais ficam inundados, nesse processo o corpo libera ácidos graxos, fazendo com que os corpos levem mais tempo para se decompor (Hino, 2015; Alcantara, et al 2010).

Os solos de cemitérios em geral podem ser impactados também por resíduos sólidos provenientes de caixões, tecidos, vestimentas e demais adereços utilizados no sepultamento. Também podem passar por contaminações provenientes de metais pesados presentes em tintas, vernizes, alças metálicas e demais materiais utilizados no sepultamento. Concentrações elevadas de Pb, Zn, Cu, Ni e Fe são alguns demonstrativos de contaminação dos solos em cemitérios (Barros et al., 2013).

Os solos que são recursos naturais imprescindível à sobrevivência dos seres vivos, em especial dos humanos precisa ter determinadas características físico-químicas e biológicas garantidas. Essa camada que se sobrepõe como a pele do planeta é resultante da interação de fatores climáticos, organismos vivos, tempo e relevo, que estão submetidos a processos de remoção, adição, transporte e transformação, em conjunto atuando sobre matérias de origem como rochas, solos e sedimentos; fortemente influenciados pelos depósitos orgânicos provenientes do ambiente, possibilitam a grande variedade de solos que encontramos no planeta Terra. (Peron et al. 2004; Andreoli; Andreoli e Justi Junior, 2014).

De acordo com Mulder (1954 apud Pacheco; Mendes e Hassuda, 1988), em uma busca histórica de contaminação através da presença de cemitérios, em especial em áreas urbanas, destacam os casos de febre tifoide ocorrida em Berlim, no período de 1863 a 1867 e, sem data exata, apontam os casos de contaminação de águas subterrâneas malcheirosas de sabor adocicado na cidade de Paris.

Ao colocar os caixões diretamente no solo podem ser podem desencadear sérios riscos ambientais e à saúde pública. No entanto, nas Resoluções do CONAMA que regulamentam os serviços cemiteriais no Brasil e nas legislações estaduais e municipais não são encontradas grandes referências sobre as condições dos solos, que estão diretamente ligados com o processo de putrefação dos cadáveres. Os solos podem atuar como filtros, em determinados locais, se suas condições forem favoráveis para esse tipo de atividade.

De acordo com Andreoli, Andreoli e Justi Junior (2014), os solos em ambientes urbanos tem também como função atuar como um filtro na retenção de contaminações antes de atingir o lençol freático ou um corpo hídrico. No entanto para que exerça essa função necessita que seja um solo com elevada carga (CTC - Capacidade de Troca de Cátions). Com isso a utilização de áreas com baixa carga de CTC, para alocar materiais contaminantes pode ser um risco para os elementos abióticos dos ecossistemas. E a contaminação, decorrente das atividade cemiteriais, pode assumir grandes áreas caso os efluentes alcancem o lençol freático ou os canais de rios e arroios mais próximos. Para reduzir os problemas ambientais gerados pelos cemitérios, os países passaram a estabelecer legislações que regulamentam as etapas de ocupação dos solos para inserir quadras de sepultamento.

No caso do Brasil, somente no Século XXI foi apresentada a Resolução nº 335, de 03 de abril de 2003, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), definindo os “cemitérios como fonte de contaminação que devem estar sujeitos a etapas de licenciamento ambiental para a sua instalação a partir desta data” como cita no Art. 1º da Resolução.

Muitos cemitérios existentes no Brasil não atendem às recomendações previstas para funcionamento, pelo fato de terem sido implantados antes da referida Resolução do CONAMA e cuja adaptação a ela exige certos cuidados por lidar com o sentimento dos parentes e dos custos implicados. Alguns conseguiram se adequar às exigências estabelecidas, porém outros não, e outros ainda apresentam dificuldades de adequar-se a todas as exigências legais devido às condicionantes, como por exemplo, a proximidade mínima de áreas urbanas, de cursos hídricos e porque eles são necessários e importantes para o funcionamento das cidades, em geral.



Este trabalho tem por objetivo realizar uma caracterização do solo na área do “Cemitério Vicentino” visando identificar a presença ou não de condições naturais favoráveis para este tipo de atividade.

De acordo Figueiredo Filho, Pacheco e Manfredini (2011), independente das condições de implantação dos cemitérios os solos podem acelerar ou retardar os processos de decomposição que destroem os restos mortais.

Além disso, de acordo com Pacheco, Mendes e Hassuda (1988) outra questão que se deve observar a “causa mortis” se foi algum tipo de contaminação, epidemia ou se foram pacientes que passaram por tratamentos radioterápicos. Alguns elementos presentes nos cadáveres podem ter uma vida média relativamente longa nos solos, o que podem ser ainda mais prejudiciais quando se trata de contaminação.

Material e Métodos

A localização de Ponta Grossa pode ser feita a partir da sua relação com a região fitogeográfica dos Campos Gerais (Maack, 1981), ou conforme IBGE na Mesorregião Centro Oriental Paranaense e microrregião de Ponta Grossa (2021), incluindo os municípios de Palmeira, Castro e Carambeí. Constitui um dos principais entroncamentos rodoferroviários do sul do país (Figura 01)

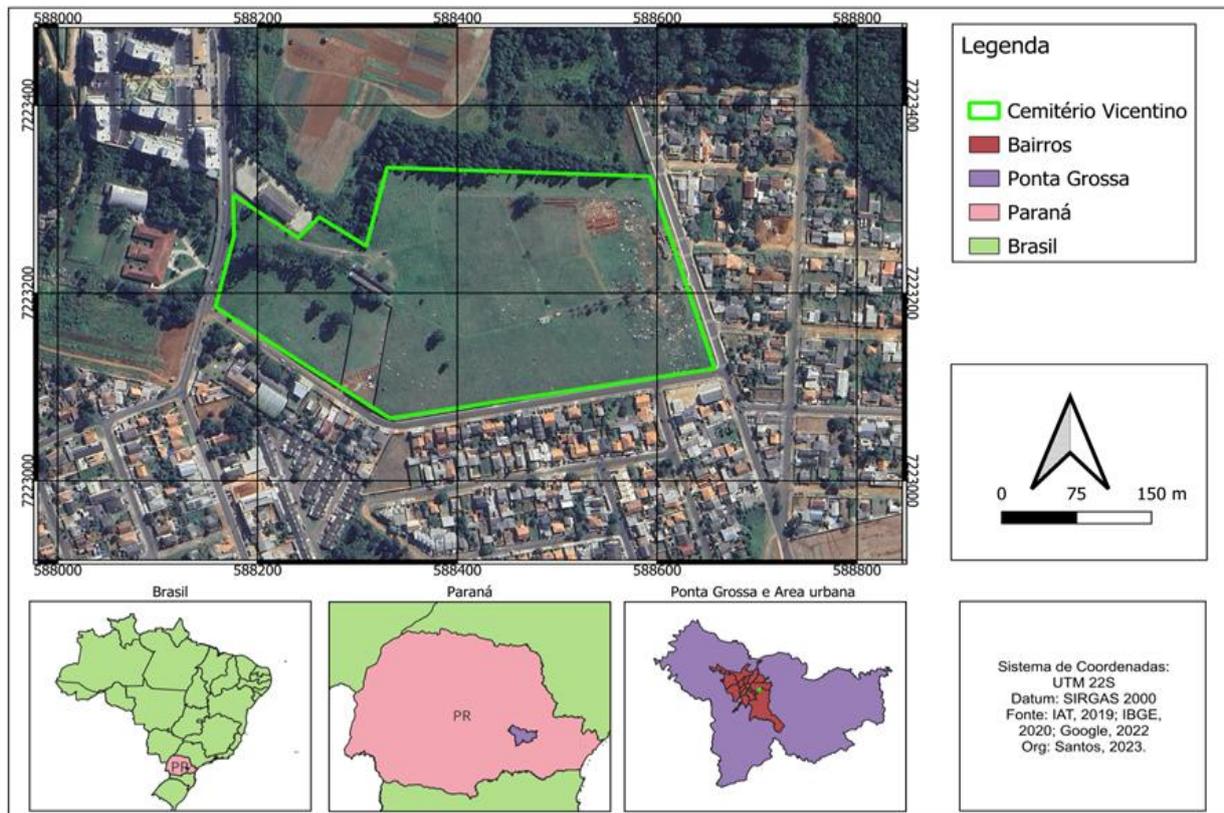


Figura 01: Mapa de Localização da Área de Estudo

Do ponto de vista das suas características físico-naturais, o município de Ponta Grossa situa-se sobre os terrenos da Unidade Morfoestrutural da Bacia Paraná, unidade morfoescultural do Segundo Planalto do Paraná; subunidade morfoescultural do Planalto de Ponta Grossa (Mineropar, 2006). Já em relação à geologia, o sítio urbano se estende sobre os terrenos da Bacia do Paraná, cujas formações pertencem: 1) na base ao Grupo Paraná: *formações Furnas e Ponta Grossa*, de idade Siluro-Devoniano; sobrepostos estão as formações do Grupo Itararé: *Formações Lagoa Azul, Campo Mourão e Taciba* (Mineropar, 2007), formado entre os períodos Carbonífero Superior e Permiano Inferior (Guimarães; Melo; Giannini e Melek, 2007).

A área de interesse do presente trabalho está área da bacia do rio Cará-Cará que, segundo Miara e Oka-Fiori (2007), possui uma área de 102,18 km² sendo afluente da margem esquerda do Rio Tibagi. Esta bacia se localiza na parte E - SE do perímetro urbano do município, incluindo uma porção de área periurbana e rural. Ela está sobre o substrato geológico on do Grupo Paraná, em transição do material da Formação Furnas – *porções de menores altitudes* e Ponta Grossa nas *porções mais elevadas*.

A Formação Ponta Grossa domina a porção W da bacia, onde está se encontra o terrenos do cemitério Vicentino. De acordo com Mineropar (2007), esta formação é constituída por rochas de granulação fina, folhelhos e siltitos, com coloração variada. A sua sedimentação é característica da plataforma marinha do início ao final do período Devoniano com uma grande variedade de micro e macro fósseis. Sobre essas formações desenvolveu-se um relevo colinoso de topos convexos e vertentes convexas-retilíneas.



Ainda, conforme Miara (2006 apud Miara; Oka-Fiori, 2009, p. 58), nesta bacia do rio Cará-Cará, desenvolveram-se amplos pacotes de Latossolos que ocupam 72,1% da referida área, sendo que, aproximadamente 74% dos solos da bacia se relacionam-se com o material da Formação Ponta Grossa. Já, os solos que representam a associação do Cambissolos e Podzólico ocupam 25% da referida bacia.

De acordo com Cruz (2009), o clima do município de Ponta Grossa é do tipo Cfb (conforme Köppen), temperado-subtropical, temperatura média do mês mais frio entre -3 e 18 °C; com mais de 5 geadas noturnas por ano, e temperatura média do mês mais quente superior a 10 °C. Numa classificação baseada na circulação das massas de ar, o clima classifica-se como mesotérmico úmido com influência das Massas Polar e Tropical Atlântica. Com um regime de chuvas uniformemente distribuída, tem nos meses de outubro a março o período mais chuvoso. A precipitação média anual com variação de 1.500 a 1.600 mm. Essa condições climáticas têm importância significativa nos processos de escoamento superficial e infiltração de água nos solos cuja textura e mais fina – silt-argila.

Sobre metodologia usada na pesquisa, o trabalho foi realizado em três etapas: gabinete, campo e laboratório. Em gabinete ou escritório foram realizadas as primeiras atividades da pesquisa, como as discussões sobre temática, o local-área de estudo; a proposição dos objetivos; além dos critérios para seleção dos pontos de amostragens.

Em campo foram realizadas definição dos pontos de amostragem respeitando as características do relevo; coletas de amostras deformadas, em triplicata, em quatro pontos da vertente- topo, terço médio- nas profundidades de 0-40, 60-80 e 100-120 cm. As amostras de solo foram coletadas em dias de sol, após 72 horas depois última chuva. Para as coletas foi utilizado trado Holandês, sendo devidamente separadas em embalagens plásticas e identificadas com etiquetas para serem levadas ao laboratório.

Da situação dos pontos de amostragens: ponto 1- se encontra no topo da vertente, tipicamente convexa, próximo ao Cruzeiro do cemitério (Figura 2); os pontos 2, 3 e 4 situados na média vertente, com características retilíneas- cuja topografia não apresentar muitas mudanças.



Figura 01: Cruzeiro do cemitério no topo da vertente

Foi adotado como procedimento básico, após cada perfuração-coleta, lavar o trado holandês com água destilada (H₂O) a fim de remover todo e qualquer resíduo da amostra do ponto anterior.

Após todas as coletas, as amostras foram levadas ao Laboratório de Geografia Física da Universidade Estadual de Ponta Grossa (LAGEF), transferidas para placas de Petri e colocadas em local protegido para secarem ao ar, por mais de 72 horas. Após estarem secas, foram submetidas à análise granulométrica de acordo com o Manual de Análises de Solos da Embrapa (2017).

A primeira etapa da análise de solo foi identificar a Umidade Residual e Fator “f”; para isto, foram utilizadas placas de Petri devidamente identificadas e pesadas. Antes da pesagem das referidas placas elas foram colocadas na estufa a 105 °C, para que não houvesse umidade. Na sequência, foram adicionados, nas placas, 10 g de solo e transferidas para a Mufla, onde permaneceram por 24 horas, a 105 °C, antes de serem pesadas novamente. Depois foram transferidas para o dessecador com sílica gel para esfriar e serem pesadas mais uma vez.

Após identificar a Umidade Residual e Fator “f” realizou-se a análise granulométrica. Foi utilizada Solução de hidróxido de sódio 1 mol L⁻¹. No preparo da solução foram dissolvidas 40 g de hidróxido de sódio (NaOH), em água destilada em um balão volumétrico e adicionado água destilada até completar 1 L (até o menisco). Nas duas análises foram de acordo com o Manual de Análises de Solos da Embrapa (2017).



Após as soluções serem preparadas, foram pesados 20 g de solo de cada amostra em triplicata - seguindo o procedimento de secar as placas de Petri na estufa para retirar a umidades, colocar no dessecador com sílica gel para esfriar - após pesadas as amostras foram transferidas para tubos de PVC, com ajuda de funil, adicionado 25 ml de solução de hidróxido de sódio e 100 ml de água destilada. Os tubos foram lacrados e colocados no agitador por 16 horas a 50 rpm (rotações por minuto).

Após desligar o agitador é realizada a separação da areia. As amostras foram transferidas para uma peneira de 0,053 mm, com o auxílio de um pulverizador de alta pressão com capacidade de 1 l, para não exceder a quantidade de água destilada, com muito cuidado para não respingar para fora do recipiente e perder amostra. Após lavar a peneira com água destilada, transferiu-se a areia para filtros de papel identificados para realizar a secagem na estufa. Antes da utilização dos filtros os mesmos foram secados na estufa a 105 °C para retirar a umidade do papel e foram pesados para a obtenção da massa de areia em cada amostra.

O próximo passo foi preparar a proveta com uma prova controle, onde se adicionou 25 ml da solução de hidróxido de sódio e completada com água destilada até chegar na marca de 1 L, (até o menisco). A amostra prova foi agitada com um bastão por 1 minuto, uma agitação vigorosa em toda a proveta, como recomenda o manual da Embrapa (2017). Após, realiza-se uma pipetagem na profundidade de 5 cm da proveta, transferindo-se a suspensão pipetada para um recipiente limpo, com sua massa identificada com caneta permanente. A temperatura da prova controle deve ser medida com um termômetro.

As amostras foram transferidas para as provetas e completadas com água destilada até chegar na marca de 1 l. Após isso, com ajuda de um bastão as amostras foram agitadas por 1 minuto. Logo em seguida foi realizada a pipetagem de 25 ml, na profundidade de 5 cm, coletando amostra de silte + argila, a amostra foi colocada em um recipiente pesado e identificado. De acordo com equação de *Stokes*, indicado no manual da Embrapa (2017), o tempo de sedimentação do silte para realizar a coleta na pipeta da amostra de argila é de acordo com a temperatura que estava no dia do ensaio. A temperatura estava medindo 21,5° C, utilizando a metodologia indicada com aplicação da correção o tempo de sedimentação foi de 3 horas e 54 minutos.

Durante todo o processo da realização das análises, o Laboratório permaneceu com as portas e janelas fechadas para que não viesse ocorrer nenhum tipo de interferência, seja pela presença de vento ou de quaisquer outros incidentes que pudessem interferir na qualidade das análises. Fez-se necessário que toda a movimentação de pessoas, dentro do recinto, fosse de modo leve para que o processo de sedimentação pudesse ocorrer de maneira correta sem qualquer tipo de influência. Por fim, após as duas coletas as amostras foram colocadas na estufa a 105 °C, para secar e realizar a pesagem.

Os cálculos para determinação dos teores de areia, argila e silte foram realizados de acordo com o manual da Embrapa (2017, p. 104).

Para as análises granulométricas foi utilizado o Triângulo Textural de solos, de acordo com o Manual de Descrição de Coletas de solo no campo - Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, organizado por Santos et al (2015), para identificar qual a classe de solos pertence.

Resultados e Discussão

Particularmente, no caso em estudo, no município de Ponta Grossa existem vinte e um (21) cemitérios, sendo sete (7) em perímetros urbanos e quatorze (14) no meio rural. Dentre todos os cemitérios existentes em Ponta Grossa destaca-se o “São Vicente de Paula”, conhecido como “Cemitério Vicentino”, por ser um dos mais ativos do município, recebendo, aproximadamente, 1.400 sepultamentos anuais, em tempos normais, de acordo com o Serviço Funerário Municipal.

Com mais de quarenta e oito (48) anos de implantação, o “cemitério Vicentino” é um dos mais antigos do município, tendo sido implantado numa porção do perímetro urbano ainda fracamente ocupado por moradias e indústrias. Com o crescimento da população urbana e da área da cidade, a necessidade de espaços para novas residências, estas hoje chegam muito próximo ao muro que as separam das quadras de sepultamento.

Considerando a legislação vigente sobre os cemitérios vê-se que o “Cemitério Vicentino”, por ser anterior a Resolução CONAMA nº 335/2003, apresenta uma série de irregularidades. Entendidas como resultado da complexidade das questões envolvidas, como: o município necessita resolver a questão dos sepultamentos de pessoas; as questões ambientais não têm merecido prioridade e não tem estudo locais que justifiquem a aplicação da lei.

A implantação do cemitério foi em um momento que o município necessitava solucionar o problema de sepultamentos que crescia junto com o crescimento urbano. E isso fez com que as questões ambientais fossem tratadas de modo secundário sem receber a atenção devida.

No município de Ponta Grossa e, mesmo, na região dos Campos Gerais do Paraná, são poucos os cemitérios que têm licenciamento ambiental aprovado para tais atividades. Assim como são poucos os trabalhos realizados sobre esse tema que tenham uma abordagem ambiental.

O atual terreno do Cemitério Vicentino apresenta características físico-naturais bem alteradas, mesmo fora dos pontos de sepultamento onde isso se faz necessário. Em geral, todo o terreno incluso ou destinado ao Cemitério apresenta alterações seja pelas escavações, seja pela deposição de solo que “sobrou” após os sepultamentos; o resultado é a interferência na estrutura do topo do solo. Este fato dificulta a localização de um ponto padrão ou testemunho para realizar comparações entre as amostras: o que somente é possível com amostras fora da área do cemitério, cujos demais usos também produzem alterações diversas.

O solo onde se encontra o cemitério, conforme Bhering et al (2007), é uma Associação de Latossolo Vermelho Distrófico típico + Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico típico, ambos de textura argilosa: classificado como A proeminente álicos, fase campo subtropical, em relevo suave ondulado.

Os resultados das análises granulométricas mostram que não existe muita variação de granulometria nos diferentes pontos do cemitério, como mostra a Tabela 1.



Amostra nº	Profundidade cm	Argila	Silte %	Areia
Ponto 1	00 - 40	71,0%	22,0%	7,0%
Ponto 1	60 - 80	73,0%	21,0%	6,0%
Ponto 1	100 - 20	77,0%	18,0%	5,0%
Ponto 2	00 - 40	62,0%	32,0%	6,0%
Ponto 2	60 - 80	74,0%	21,0%	5,0%
Ponto 2	100 - 120	73,0%	21,0%	6,0%
Ponto 3	00 - 40	63,0%	31,0%	6,0%
Ponto 3	60 - 80	73,0%	22,0%	5,0%
Ponto 3	100 - 120	70,0%	25,0%	5,0%
Ponto 4	00 - 40	63,0%	30,0%	7,0%
Ponto 4	60 - 80	75,0%	19,0%	6,0%
Ponto 4	100 - 120	74,0%	20,0%	6,0%

Tabela 1: Resultado das análises granulométricas do solo do cemitério

De acordo com a metodologia empregada nas análises, os solos do cemitério Vicentino pertencem, predominantemente, à classe muito argilosa, com apenas uma amostra na classe argila.

O cemitério se encontra em um topo de vertente com pouca diferença de declividade em sua planta, ficando em torno de 3 a 8%. O local se caracteriza pelas formas mais colinosas, com o topo alongado (Figura 02), onde não são encontrados processos erosivos lineares, mas, no entanto, são encontradas subsidências sobre as sepulturas e, na parte onde das são colocadas as cruzes de concreto. Isto pode ser explicado pela ruptura do topo do solo de textura argilosa quando da ocorrência de precipitações concentradas, com elevados índices pluviométricos (em alguns casos superiores a 80 mm/dia).

Ainda em relação aos solos argilosos, esse padrão é caracterizado por Barreto (2016), como sendo o topo onde mais ocorrem os processos de infiltração, dessa forma, quando a água encontra algo que obstrui ou está cravado no solo, ela acompanha o caminho já feito aumentando a dimensão das fendas por onde está infiltrando.

Esse processo resulta em ranhuras ou fendas que deixam expostos restos mortais e o mesmo o necrochorume que, tanto podem ser carregados por animais para outras áreas, ou no caso dos fluidos, ser disperso no perfil, ou ir em direção ao lençol freático.

Com isso, pode fazer com que os líquidos produzidos pelos restos mortais e metais pesados provenientes dos materiais utilizados na fabricação do esquife, carregados de contaminantes, possam chegar aos cursos d'água e poço da região. Levando em consideração que o cemitério se encontra em uma área urbana isso pode gerar sérios problemas sanitários à população (Figura 03).



Figura 02: Quadras de sepultamento Cemitério Vicentino



Figura 03: Subsidências de solo

Por outro ângulo, devido ao fato de os locais pertencerem a uma Associação de Latossolo Vermelho Distrófico típico + Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico típico, isto pode ser efetivo na retenção de poluentes devido a CTC (Capacidade de Troca Catiônica) ser uma forte característica dos solos de textura argilosa, no entanto, outros problemas podem tornar a necrópole um risco ambiental e sanitário.

De acordo com os estudos de Figueiredo Filho, Pacheco e Manfredini (2011), os Latossolos possuem um grau de restrição médio para implantação de cemitérios devido à alta capacidade de retenção de água, erodibilidade e profundidade até o embasamento rochoso, com isso, podem ocorrer um alto risco de impacto no aquífero e risco de subsidências na superfície, o que é visível sobre as sepulturas no local.



Os argissolos possuem um grau de restrição alto devido capacidade de retenção de água, permeabilidade e erodibilidade. Devido as condições do solo os problemas que afetam na decomposição dos cadáveres são saponificação, retardamento excessivo do processo, impedimento da depuração de gases fúnebres e risco de subsidência.

A condição do solo, neste setor do perímetro urbano, de possuir uma matriz argilosa, oriunda de rochas da Formação Ponta Grossa, pertencentes ao Grupo Paraná, deve ter sido, à época, considerado como principal motivo da escolha do terreno para implantar o cemitério. No entanto, devido a forma de sepultamentos *in terrae* cabe melhor analisar tais condições de solo para amenizar riscos ambientais e a saúde pública.

Considerações Finais

As atividades cemiteriais realizadas no Cemitério Vicentino pela administração da Prefeitura Municipal de Ponta Grossa, têm sido de grande importância para atender a demanda por direitos básicos da população de baixa renda no município e região. Ao entender o histórico de criação do Vicentino, conseguimos compreender o formato de sepultamentos que ainda persiste depois das resoluções que regulamentam os cemitérios no Brasil.

No entanto, é comprovado que atividades de necrópoles são contaminantes de solos e de águas subterrâneas. E podem se tornar grandes problemas se não forem observadas as normas previstas. Ao entendermos a dimensão da área de influência do “Vicentino”, podemos concluir que os impactos podem ser de proporção muito grande. Recomenda-se que as etapas de Licenciamento Ambiental sejam realizadas e medidas mitigadoras de impactos ambientais sejam buscadas e implantadas no cemitério.

Para o tratamento eficaz do necrochorume, se faz necessário a aplicação de alguns métodos e tecnologias dos dias atuais, como por exemplo, filtros biológicos, pastilhas e mantas absorventes. O método do filtro biológico, deve ser colocado abaixo da linha de sepultamentos, de modo que impermeabilize a infiltração de necrochorume. Essa é uma orientação da Resolução CONAMA 335/03, Artigo 8º. A implantação de filtro biológico levará um certo tempo, contudo pastilhas e manta absorvente podem ser colocadas direto no caixão e tem um efeito satisfatório.

O uso das pastilhas de tratamento de necrochorume se tornam uma saída rápida para mitigar problemas ambientais. As pastilhas são colocadas dentro da urna de sepultamento, por ser composta de um pó enzimático tem o poder de absorção de 175 vezes o seu volume. Ao se misturar com o necrochorume transforma-se em um gel que retém os contaminantes não permitindo sua infiltração no solo (Pinheiro, 2018).

Mantas absorventes são também recursos viáveis de serem utilizados dentro dos caixões. As mantas protetoras têm em sua composição polímero impermeável que suporta temperaturas entre - 30° C e 115° C e pode durar aproximadamente de 150 a 250 anos Invol (2018 apud Longatti et al 2020, p. 18381).

Além de medidas instantâneas outras medidas a longo prazo podem ser estudadas como a substituição da forma de sepultamento, substituir essa prática por algo que ofereça menos riscos, por exemplo a cremação. De acordo com Pinheiro (2018), essa prática consiste em uma das que geram menos impactos, os resíduos restantes após a cremação são inofensivos e devolvidos aos familiares.

Contudo, entende-se que os valores da cremação ainda são elevados e se encontram algumas barreiras culturais e religiosas. No entanto, futuramente, pode vir a ser um método que venha sanar os problemas da administração pública com relação a cemitérios.

Agradecimentos

Agradecemos a comissão organizadora do 3º Congresso Internacional de Engenharia Ambiental, pela oportunidade de publicar o trabalho; à Universidade Estadual de Ponta Grossa, por todo suporte na realização da pesquisa e Prefeitura Municipal de Ponta Grossa-PR, por autorizar a realização da pesquisa.

Referências Bibliográficas

Alcântara, L. A.; Santos, S. A.; Kemerich, P. D. C.; Silva, R. F. da. 2010. Contaminação de Recursos Naturais por Necrópoles. Revista Disciplinarum Scientia, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 17-28.

Andreoli, C. V.; Andreoli, F. D. N.; Justi Junior, J. 2014. Formação e características dos solos para o entendimento de sua importância agrícola e ambiental. Complexidades: redes e conexões do ser sustentável. Curitiba: SENAR/PR, ed. 1, p. 511-530.

Barreto, K. T. 2016. Dinâmica Pedogeomofológica na Formação Furnas - Bacia do Rio Verde/Ponta Grossa - PR. 2016. Dissertação de mestrado em Gestão do Território, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa. p. 107.

Barros, Y. J.; Kummer, L.; Melo, V. DE F.; Romanó, E. N. DE L.; Zanello, S. 2013. Teores de metais pesados e caracterização mineralógica dos solos do cemitério municipal do Boqueirão, Curitiba (PR). Holos, v. 5. p. 69-79.

Bhering, S. B. *Et al.* 2007. Mapa de Solos do Estado do Paraná: escala 1:250.000. Embrapa Solos, Rio de Janeiro.

Carneiro, V. S. 2008. Impactos causados por necrochorume de cemitérios: Meio ambiente e saúde pública. Anais do XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, p. 1-18.



- Conama. 2003. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Resolução nº. 335, de 03 de abril de 2003, Publicada no DOU nº 101, de maio de 2003, Seção 1, páginas 98-99. Prevê como deve ser feita a regularização de acordo com o Licenciamento ambiental de cemitérios, para seu funcionamento. Brasília, DF, p. 98-99.
- Cruz, G. C. F. 2009. Clima Urbano de Ponta Grossa-PR: uma abordagem da dinâmica climática em cidade média subtropical brasileira. Tese (Doutorado em Geografia) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 366.
- Embrapa. 2017. Manual de Métodos de Análise de Solo. Embrapa Brasília, Brasília-DF, ed. 3, p. 95-116.
- Figueiredo Filho, Y. A.; Pacheco, A. Manfredini, S. 2011. Solos tropicais, cemitérios e impactos ambientais. II Congresso Internacional de Meio Ambiente subterrâneos: São Paulo, p 1-5.
- Guimarães, G. B.; Melo, M. S.; Gianini, P. S. F.; Melek, P. R. 2007. Geologia dos Campos Gerais. in: Melo, M. S.; Moro, R. S.; Guimarães, G. B. (org.) Patrimônio Natural dos Campos Gerais. Ponta Grossa: Editora UEPG, p. 230.
- Hino, T. M. 2015. O necrochorume e a gestão ambiental dos cemitérios. Revista Especialize On-line IPOG, Revista Especialize On-line IPOG - Goiânia - Edição nº 10 Vol. 01. p. 1-23.
- Longatti, C. A.; Santos, G. B.; Peron, K. C. 2020. Soluções para a destinação correta do necrochorume. Brazilian Journal of Development Braz. J. of Develop., Curitiba, v. 6, n. 4, p. 18377-18348.
- Maack, R. 1981. Geografia Física do Estado do Paraná. Rio de Janeiro: Livraria José Olympio, p. 442.
- Miara, M. A.; Oka Fiori, C. 2007. Análise por múltiplo critérios para a definição de níveis de fragilidade ambiental – Um estudo de caso: Bacia hidrográfica do rio Cará-cará. Revista RA'EGA, Curitiba, n. 13, p. 85-98, Editora UFPR
- Mineropar. 2006. Atlas geomorfológico do Estado do Paraná. Curitiba. p. 12-13.
- Mineropar. 2007. Mapeamento geológico da Folha de Ponta Grossa. Curitiba, p. 158.
- Pacheco A. 2000. Cemitério e meio ambiente. 2000. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 102.
- Pacheco, A.; Mendes, J. M. B.; Hassuda, S. 1988. O problema geoambiental da localização de cemitérios em meio urbano. Águas Subterrâneas, [s.l] p. 207-215.
- Peron, F. A.; Dalmolin, R. S. D.; Azevedo, A. C.; Kaminski, J. 2004. Solos Urbanos. Ciência Rural, v. 34, n. 5, p. 1647-1653.
- Pinheiro, T. M. 2018. Contaminação ambiental causada pelo necrochorume proveniente de cemitério. Inovae, v. 6 p. 145-171.
- Prefeitura Municipal de Ponta Grossa, 2023. Localização do município, Prefeitura de Ponta Grossa. Ponta Grossa-PR, [s.d.]. Disponível em:< <https://www.pontagrossa.pr.gov.br/localização>>. Acesso em 22 abr. 2023.
- Santos, R. D.; Santos, H. G. Kerr, J. C.; Anjos, L. H. C. Shimizu, S. H. 2015. Manual de descrição e coleta de solo no campo. Viçosa: SBCS, ed. 7, p. 102.

POTENCIAL BIOTECNOLÓGICO DE SEMENTES DE BIRIBÁ (*ROLLINIA MUCOSA* (JACQ.) BAILL) COLETADO NA AMAZÔNIA - BRASIL

**1André Vilhena de Oliveira, 2Maurício Kersting, 3Adilson Ben da Costa,
4Rosana de Cassia de Souza Schneider**

1 Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC, e-mail: andrevilhenanet@hotmail.com;

2 Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC, 3 Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC, e-mail: adilson@unisc.br;

4 Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, e-mail: rosana@unisc.br.

Palavras-chave: Germplasm; Biribá; Biotechnology.

Abstract

Biribá seeds contain several important substances for human health, such as vitamins and antioxidants. These seeds have anti-inflammatory and antimicrobial properties, which can be useful in disease prevention. Biribá seeds can be used in the production of various foods, such as bread, cakes, and biscuits. These seeds, which might otherwise become waste, have potential uses beyond food production, depending on their composition. This work presents a preliminary study evaluating the potential of utilizing residual seeds from fruit processing in biotechnological processes. Infrared spectroscopy showed that the seeds collected in the Amazon contain key biomolecules, such as lipids, proteins, and carbohydrates, which can be used in biotechnological processes.

Keywords: Germplasm; Biribá; Biotechnology.

Introdução

O Biribá (*Rollinia mucosa*) é uma fruta tropical encontrada principalmente na região amazônica do Brasil, Colômbia, Peru, Equador e Venezuela. É uma planta frutífera nativa conhecida por seu sabor doce e aroma agradável, sendo utilizado em diversas receitas culinárias (SANTOS et al., 2005; FERREIRA et al., 2010). É uma planta que pode atingir altura média de 8 m, suas folhas até 15 cm de comprimento, com flores verdes externamente e róseas internamente. De acordo com Da Costa e Müller (1995) a planta tem ampla dispersão geográfica, e o fruto é conhecido como biribá, biribá-do-Pará, fruta-da-condessa, biribá-de-Pernambuco, anona, pinha ou jaca de pobre. Os frutos têm grande aceitação popular para consumo *in natura*, sendo a planta ideal para formação de pomares, possibilitando retorno econômico no máximo cinco anos após sua implantação (Da Costa; Müller, 1995; Teixeira; Macedo, 2011). Esta espécie também é utilizada como porta-enxerto (Dos Santos et al., 2005) e tem moléculas bioativas como (+)-epimembrina, (+)-epieudesmina e (+)-epimagnolina, importantes para a manutenção dos organismos (Estrada-Reyes et al., 2002) e de resposta nutricional de mudas em função da adubação e da correção do solo (Teixeira; Macedo, 2011). De acordo com Nogueira e Medeiros (2007), a produção de sementes de alta qualidade é muito importante para qualquer programa de produção de mudas voltado para plantios comerciais, restauração de áreas degradadas e conservação dos recursos genéticos. (Figura 1). Seu fruto é cônico ou globoso, depende da região onde nasce, mas sempre de casca bem grossa e de cor verde ou amarela quando madura. É bastante rica em proteínas, lipídios, fibras, cálcio, ferro, vitaminas B1, B2, niacina, aminoácidos, lisina, dentre outros.



Figura 1. Exemplar de Biribá.

Frente ao potencial de produção desta fruta e da importância de aproveitamento das sementes que acabam se transformando em resíduo, buscou-se identificar por um método rápido (espectroscopia no infravermelho) o potencial de uso destas sementes em processos biotecnológicos, dando um destino mais nobre para sementes residuais do aproveitamento do fruto.

Materiais e Métodos

Esta pesquisa foi realizada inicialmente nos laboratórios do Instituto Federal de Educação Ciências e Tecnologias do Amazonas-IFAM e posteriormente nos laboratórios da Universidade de Santa Cruz do Sul. As atividades de plantio foram realizadas na Escola Municipal Rilton Leal Filho, onde foi implantado o viveiro florestal experimental. Neste estudo, foram utilizadas sementes de Biriba oriundas de cinco matrizes da cidade de Manaus, com a finalidade de criar um banco de germoplasma vegetal (banco de sementes) e produzir 100 mudas para o plantio na escola municipal envolvida nesta pesquisa.

Coleta, Biometria e Secagem das Sementes

A primeira etapa caracteriza-se pela coleta e secagem das sementes que foram coletadas de cinco matrizes diferentes, em locais distintos de Manaus, sendo a matriz 1: SEMAS IFAM ZONA LESTE, matriz 2: COMUNIDADE NOVA CANAÃ, matriz 3: COMUNIDADE DO JANDIRA, matriz 4: ESTAÇÃO DE FRUTICULTURA INPA, matriz 5: RESERVA ADOLFO DUCK. A escolha de matrizes seguiu critérios que incluem: seleção de árvores saudáveis e vigorosas. As colheitas de frutos maduros foram realizadas em 2022.

Análise fisiológica das sementes

Nesta etapa foi realizado em laboratório todo o processo de pesagem e análise das sementes, com uso de microscópio eletrônico e transiluminador para a seleção das melhores sementes e matrizes para serem conservadas no banco de germoplasma vegetal do IFAM. As sementes secas sofreram cortes transversais (Figura 2) onde foi identificada a região embrionária, radícula, tegumento interno e externo. A análise de pureza foi realizada com relação às sementes puras e bem formadas. Teor de umidade foi calculado com base em secagem em estufa. Esta etapa identificou a qualidade das sementes.

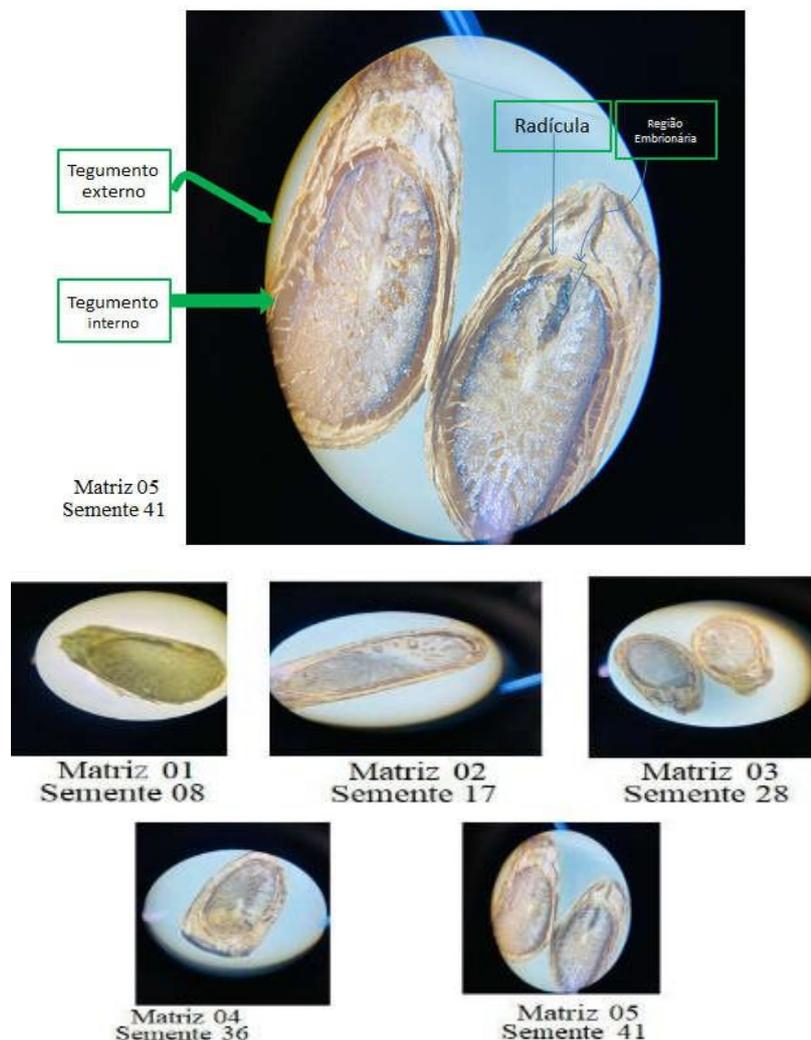


Figura 2. Corte da semente de Biriba

Formação do Banco de Germoplasma

O banco de germoplasma vegetal foi mantido no IFAM em sistemas desenvolvidos para conservação conforme Figura 3.



Figura 3. Câmara seca do banco de germoplasma de Biribá.

Análise das sementes por espectroscopia no infravermelho

As amostras analisadas foram moídas em moinho de facas e secas em estufa. Os espectros ATR-FTIR foram registrados por reflexão única de Reflexão Total Atenuada (ATR) em um espectrômetro Spectrum 400 FT-IR/FT-NIR (Perkin Elmer) equipado com um cristal de diamante/acessório de amostragem universal ATR de ZnSe. A faixa de aquisição foi de 4000 a 650 cm^{-1} , utilizando uma resolução espectral de 4 cm^{-1} , força Gauge 75 e 4 varreduras. O fundo foi obtido lendo o suporte vazio e o cristal limpo. Os espectros médios de cada amostra foram obtidos após correção e normalização de cada triplicado.

Resultados

A Tabela 1 apresenta os resultados de análise das sementes indicando que as sementes não atendem todos os itens de qualidade para plantio, no entanto, a semente pode ter outras propriedades que possam dar a ela aproveitamento.

Tabela 1. Grau de pureza (%), Medidas das sementes (cm), de umidade determinada em secagem natural (%) e de perda de umidade fisiológica (%) das sementes coletadas por matriz.

Matrizes	1	2	3	4	5
Largura (cm)	0,39	0,3	0,3	0,37	0,42
Comprimento (cm)	1,58	1,04	0,98	1,39	1,55
Diâmetro (cm)	2,27	1,81	1,65	2,29	2,42
Grau de pureza (%)	62,69	67,01	68,68	57,96	82,03
Umidade por secagem natural (%)	23,37	32,98	31,31	42,03	17,96
Perda de umidade fisiológica da semente (%)	-23,37	-32,98	-31,31	-42,03	-17,96

Análise do potencial biotecnológico por intermédio da espectroscopia no infravermelho

As sementes analisadas apresentaram diferenças com relação a propriedades intrínsecas como umidade, pureza e tamanho, apesar disso, a semente contém informações biotecnológicas que podem ser visualizadas por uma técnica de resposta rápida como a espectroscopia no infravermelho. A espectroscopia no infravermelho baseia-se na absorção de radiação infravermelha pelas moléculas presentes em uma amostra. Cada tipo de ligação química em grupos funcionais em uma molécula absorve energia em comprimentos de onda específicos do espectro infravermelho, resultando em um espectro característico que pode ser usado como uma "impressão digital" molecular. A análise dos espectros permite a identificação e quantificação de estruturas químicas que estão associadas as macromoléculas presentes nas sementes, fornecendo informações que ajudam na tomada de decisão sobre potenciais usos destas sementes, como a existência de polissacarídeos, proteínas e lipídios. Conforme Figura 4 e Tabela 2 observa-se os grupamentos funcionais que dão

indicativo da presença de biomoléculas como carboidratos, lipídios e proteínas.

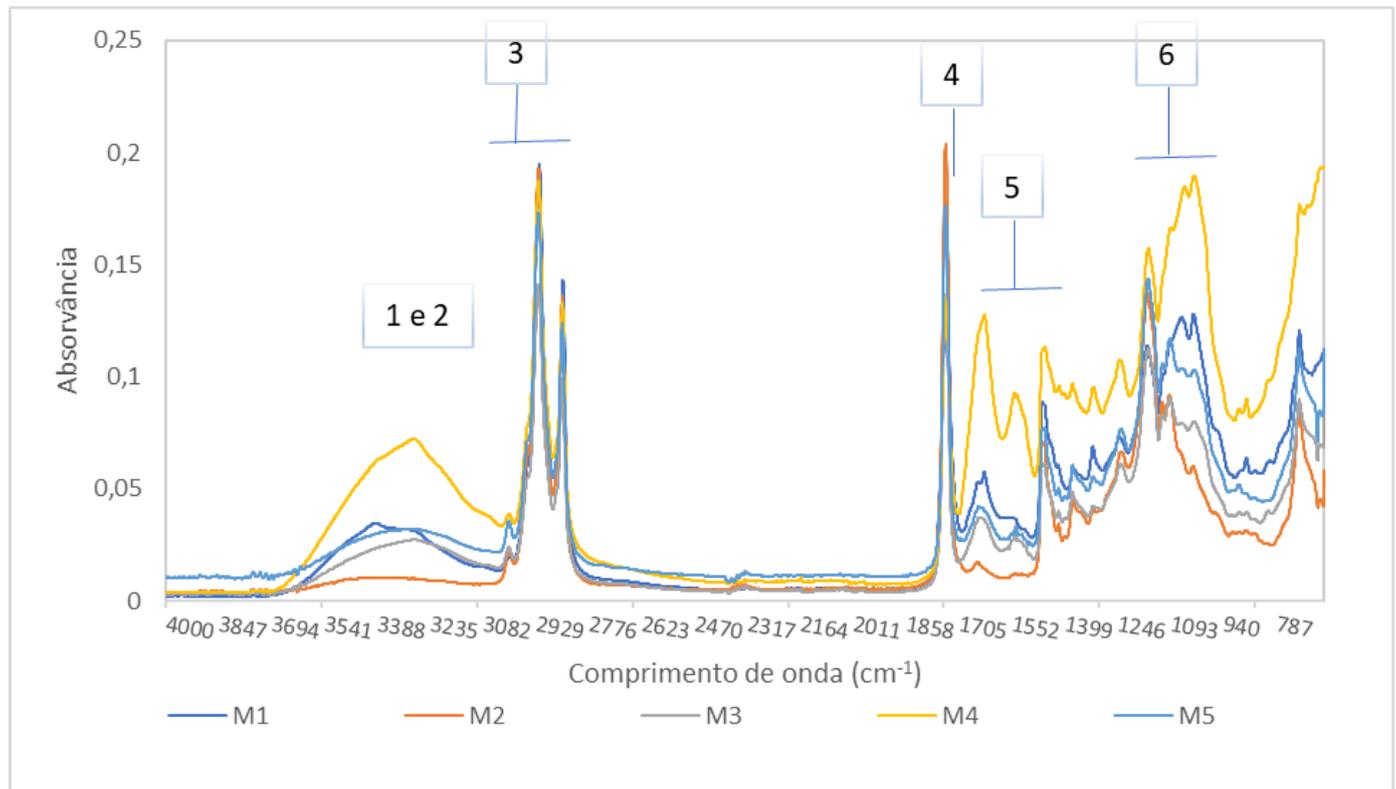


Figura 4. Espectros no infravermelho das amostras de sementes de Biribá moídas e secas.

Tabela 2: Atribuições dos espectros no infravermelho das amostras das sementes das 5 matrizes estudadas de Biribá.

Identificação	Comprimento de onda (cm-1)	Grupamento/ligação*	Atribuição teórica
1	~3400	vO-H	Água
2	~3280	vN-H	Proteína (Amida II)
3	~3070	vC=C-H	Lipídeos
4	~3015		
5	~2960	vasCH3	
6	~2925	vasCH2	
7	~2870	vCH3	Proteína e Lipídeo
8	~2855	vCH2	Lipídeos
9	~1730	vC=O	Lipídeos
10	~1620	vC=O	Proteínas (Amida I)
11	~1540	vC-N and δN-H	Proteínas (Amida II)
12	~1450	δasCH3	Proteínas
13	~1400	vC=O; vCOO-	Proteínas; grupos carboxílicos
14	~1230	vasP=O	Ácidos nucleicos
15	~1075	vP=O; vC-O-C	Ácidos nucleicos; Carboidratos
16	~1035	vC-O	Carboidratos
17	~900		Ligações beta - glicosídicas

Considerações finais

Conforme esperado para amostras de sementes, observa-se a presença de material de reserva energética como carboidratos e lipídios. Pelos espectros observa-se que há lipídios insaturados e a literatura aborda (Berto *et al.*, 2015) que as sementes podem ter 16, 7 e 35% de lipídios, proteínas e carboidratos, respectivamente. Existem boas perspectivas de exploração econômica dos frutos do biribá pela agroindústria, devido às suas características sensoriais atrativas, alto valor nutricional e compostos bioativos, e tem grande potencial de exploração para processos biotecnológicos (Peixoto Araujo *et al.*, 2021). Biotecnologicamente é uma semente que pode ser nutriente para crescimento de microrganismos, assim como é realizado com



resíduos (Steinrücken et al., 2024). Outras aplicações podem ser propostas, um exemplo é na produção de biocombustíveis, a qual fica mais limitada, uma vez que existem outras sementes com alto teor lipídico ou de carboidratos. Apesar de não termos analisado por espectroscopia no infravermelho, na biomassa de sementes de Biribá temos compostos bioativos que corroboram com várias funcionalidades, como produção de enzimas e potencial antioxidante (Faria *et al.*, 2021).

Agradecimentos

Capes edital PDPG consolidação 3 e 4- 88881.710390/2022-1.

Referências

- BERTO, A. *et al.* Proximate compositions, mineral contents and fatty acid compositions of native Amazonian fruits. **Food Research International**, v. 77, p. 441-449, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.08.018>
- DA COSTA, J. P. C.; MÜLLER, C. H. Fruticultura tropical: o biribazeiro *Rollinia mucosa* (Jacq.) Baill. v. 1995.
- DOS SANTOS, C. E. *et al.* Propagação do biribá (*Rollinia mucosa*) e sua utilização como porta-enxerto de pinha (*Annona squamosa*). **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 27, n. 3, p. 433-436, 2005.
- ESTRADA-REYES, R. *et al.* Lignans from leaves of *Rollinia mucosa*. **Zeitschrift für Naturforschung C**, v. 57, n. 1-2, p. 29-32, 2002.
- FARIA, J. V. *et al.* Comparative evaluation of chemical composition and biological activities of tropical fruits consumed in Manaus, central Amazonia, Brazil. **Food Research International**, v. 139, p. 109836, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109836>
- NOGUEIRA, A.; MEDEIROS, A. D. S. Extração e beneficiamento de sementes florestais nativas. v. 2007.
- PEIXOTO ARAUJO, N. M. *et al.* Functional and nutritional properties of selected Amazon fruits: A review. **Food Research International**, v. 147, p. 110520, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110520>
- STEINRÜCKEN, P. *et al.* Insect frass as a fertilizer for the cultivation of protein-rich *Chlorella vulgaris*. **Bioresource Technology Reports**, v. 25, p. 101686, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101686>
- TEIXEIRA, P. C.; MACEDO, S. T. Calagem e fósforo para a formação de mudas de biribazeiro. **Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 54, n. 3, p. 259-266, 2011.



APLICAÇÃO DA EDUCAÇÃO AMBIENTAL PARA O TRATAMENTO E MINIMIZAÇÃO DE RESÍDUOS QUÍMICOS GERADOS EM LABORATÓRIOS DE ENSINO E PESQUISA

1Poliane Patricia Pelisão Locatelli, 2Priscila Soraia da Conceição

1 Instituto Federal de Santa Catarina, e-mail: poliane.locatelli@ifsc.edu.br; 2 Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: priscilas@utfpr.edu.br

Palavras-chave: Tratamento e recuperação de resíduos químicos; Minimização de resíduos; Educação ambiental.

Resumo

Nas últimas décadas percebe-se o crescimento de ações voltadas à educação ambiental com o intuito de reduzir o impacto ambiental ocasionado, entre outros, pelo descarte incorreto de resíduos. Em virtude disso, o presente trabalho teve por objetivo realizar a segregação, o tratamento e a recuperação dos resíduos químicos gerados no Laboratório de Química (LQ) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus de Francisco Beltrão, como alternativa para a redução do volume de resíduos enviados para tratamento e descarte final por empresa especializada, contratada para este fim. Deste modo, a realização deste trabalho ocorreu durante o mês de abril, em 2015 e, após o levantamento de dados em relação às aulas práticas realizadas no ano anterior (2014) no Campus e no LQ, assim como a quantidade de resíduos enviada para tratamento e descarte pela empresa terceirizada, definiu-se a segregação dos resíduos em inorgânicos, orgânicos, ácidos, bases, hexano e éter de petróleo. Posteriormente foi realizado ações de educação ambiental com a comunidade acadêmica, para conscientizar sobre a nova forma de descarte de resíduos, bem como viabilizar o andamento deste projeto, por meio da elaboração e o envio de um documento orientativo sobre o procedimento de descarte, como também foram realizadas conversas informais no laboratório. Para o descarte dos resíduos, foi disponibilizado seis (06) galões com capacidade para 5L, todos identificados, como fichas para registro dos resíduos descartados. Durante o desenvolvimento deste trabalho observou-se a produção de 24L de resíduos no LQ, destes o maior volume coletado foi no recipiente para descarte de resíduos inorgânicos, com 41,67% do total, porém foi o que obteve maior volume de descarte realizado erroneamente pelos usuários. Os resultados obtidos demonstram que do total de resíduos descartados, 57,31% não foram registrados pelos usuários e, 20,75% foi realizado erroneamente, bem como foram recuperados 93,34% dos solventes coletados. Por fim, constatou-se que é possível minimizar o volume de resíduos encaminhados para tratamento e descarte final por empresa terceirizada, por meio de tratamento simples como neutralização ácido-base e destilação de solventes, entretanto é fundamental a participação efetiva da comunidade acadêmica, deste modo ações de educação ambiental e conscientização dos usuários precisam ser realizadas frequentemente.

Introdução

A percepção de que as ações do homem ao longo do tempo contribuíram para a deterioração do meio ambiente e dos recursos naturais disponíveis é um dos motivos pelos quais as nações, em suas mais diversas formas, busquem meios para minimizar estes danos. Neste sentido, motivadas pela necessidade da promoção da consciência ambiental, proteção do meio ambiente, bem como desenvolvimento sustentável, as Instituições de Ensino Superior (IES), públicas e privadas, responsáveis pela disseminação do conhecimento e formação de profissionais capacitados, realizam frequentemente estudos e desenvolvem trabalhos sobre a grande variedade de resíduos sólidos e líquidos gerados no âmbito acadêmico (BARBOSA et al., 2019; PENATTI & GUIMARÃES, 2011; SILVA et al, 2012; SIQUEIRA et al., 2022).

Dentre os resíduos produzidos nas IES, em suas atividades de ensino, pesquisa e extensão, destacam-se os resíduos químicos, os quais são classificados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Norma Brasileira (NBR) 10.004:2004, em relação aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, com o intuito de que sejam manuseados e destinados adequadamente. À vista disso, os resíduos químicos são classificados em Classe I - Perigosos, por serem prejudiciais ao ambiente e à saúde do homem, pois apresentam pelo menos uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, e Classe II - Não Perigosos (ABNT, 2004; ALBERGUINI et al., 2005; GERBASE et al, 2005; MARINHO et al, 2011; SILVA et al., 2012).

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, as instituições geradoras de resíduos não podem, entre outras atividades, armazenar ou dar destinação final a resíduos perigosos de forma diversa da estabelecida em lei ou regulamento (BRASIL, 2010). Portanto, ressalta-se que o descarte incorreto desses resíduos é considerado uma prática ilícita, pois tem potencial de poluir o solo, rios e o ar, ocasionando impactos ambientais, sociais e econômicos (CETESB, 2011; GONÇALVES et al., 2010). Para complementar, a Política Nacional do Meio Ambiente, Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, estabelece ao poluidor a obrigação de recuperar ou indenizar os danos ambientais causados por sua atividade, independentemente da existência da culpa (BRASIL, 1981). Deste modo, o gerador de resíduos torna-se responsável pelos mesmos e pelos possíveis danos causados, quando descartados incorretamente no meio ambiente.

Os resíduos químicos oriundos das IES abrangem uma grande variedade de compostos, os quais são gerados nos laboratórios de ensino e pesquisa. Este tipo de resíduo é mais complexo do que um resíduo industrial, pois diferente deste que é gerado em larga escala, o resíduo oriundo das IES possui uma ampla gama de compostos químicos que variam de acordo com as



aulas práticas e atividades de pesquisa executadas, os quais podem ser metais pesados, solventes orgânicos halogenados e não halogenados, soluções de ácidos ou bases inorgânicas, entre outros (GERBASE et al., 2005; SIQUEIRA et al., 2022). Entretanto, devido aos desafios relacionados à geração desses resíduos, sobre a disposição adequada, bem como o tratamento e recuperação, tem sido amplamente discutido e estudado a respeito da necessidade da criação e implementação de programas para o gerenciamento desses resíduos pelas IES (ALBERGUINI et al., 2005; BARBOSA et al., 2019; GERBASE et al., 2005; SIQUEIRA et al., 2022).

Segundo a PNRS, “na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos” (BRASIL, 2010). Em vista disso, os estudos encontrados que discorrem sobre a implementação de programas de gerenciamento de resíduos químicos, têm aplicabilidade para que os danos ambientais e os riscos à saúde possam ser efetivamente reduzidos, uma vez que contribuem para as ações de conscientização, tratamento, redução, recuperação e posterior reutilização do material (ALECRIM et al., 2007; DE CONTO, 2010; GERBASE et al., 2005; PENATTI et al., 2008; SIQUEIRA et al., 2022; TAVARES & BENDASSOLLI, 2005).

A preocupação com a redução do volume de resíduos gerados, bem como o tratamento desses resíduos, é tema constante em trabalhos científicos (ALBERGUINI et al., 2005; GOMES et al., 2013; HONORIO et al., 2023; MISTURA et al., 2010; SIQUEIRA et al., 2022); Mistura et al. (2010), dissertaram sobre a implementação de um programa que visa a minimização da geração de resíduos em laboratórios de ensino de química da Universidade de Passo Fundo. No estudo, os autores relatam que obtiveram uma redução da geração de 55,55% de resíduos por usuário anualmente, por meio da reavaliação de procedimentos, uso de microescalas, substituição de reagentes tóxicos, segregação diferenciada, recuperação, reutilização e tratamento de resíduos.

Alberguini et al. (2005), citam que o processo de tratamento de resíduos químicos da Universidade de São Paulo, em São Carlos, iniciou com a criação de um laboratório para tratamento dos resíduos gerados na instituição, o Laboratório de Resíduos Químicos (LRQ). Os autores afirmaram que o LRQ atende a 100% dos laboratórios geradores de resíduos químicos da instituição. Além disso, com vasta experiência no assunto, os autores evidenciam metodologias que podem ser executadas nas IES, como um recurso para os problemas relacionados à geração dos resíduos químicos.

Gomes et al. (2013), afirmaram que o Departamento de Química Analítica e Físico-Química da Universidade Federal do Ceará, mediante trabalhos e estudos realizados por docentes e discentes, desenvolveu projetos e metodologias para o tratamento, descarte e recuperação de resíduos químicos, com a finalidade de reduzir o volume e de reutilizar os resíduos gerados nos laboratórios da instituição. Ainda, os autores desenvolveram metodologias para a recuperação dos seguintes metais pesados: prata, mercúrio, cobre, bismuto e arsênio.

Para Couto et al. (2010) e Mistura et al. (2010), os resultados obtidos com a redução e recuperação de resíduos são menor consumo de reagentes e a redução dos custos com tratamento e disposição final dos resíduos, bem como o aumento da segurança da comunidade, uma vez que previne a contaminação ambiental. Corroborando com este diálogo, Siqueira et al. (2022) e Vieira et al. (2022), afirmam que uma das motivações para o tratamento dos resíduos químicos nas IES é a diminuição dos custos com o descarte por intermédio de empresa terceirizada.

No estudo realizado por Barbosa et al. (2019), houve certa resistência na realização do tratamento proposto para a gestão dos resíduos gerados nos laboratórios da instituição. De acordo com Barbosa et al. (2019), Bertolo et al. (2012) e De Conto (2010), torna-se evidente a necessidade de ciclos intensos de treinamentos a respeito da correta segregação e descarte dos resíduos, bem como a implementação de palestras relacionadas à educação ambiental, com o intuito de fomentar o desenvolvimento e implementação de novos conceitos, tais como desenvolvimento sustentável e consciência ambiental, além de gerar maior comprometimento da comunidade acadêmica. Segundo Vieira et al. (2022), a educação ambiental tem por princípio promover atividades teóricas e práticas com a intenção de compartilhar conhecimento e gerar consciência e responsabilidade ecológica e ambiental. Além disso, outro fator positivo é a criação de oportunidades para favorecer o conhecimento dos estudantes, na prática, pela busca e percepção de tratar esses resíduos de forma correta e eficaz (SIQUEIRA et al., 2022).

Para Brito et al. (2018), e Honorio et al. (2023), as instituições de ensino devem não somente se preocupar com o ensino e formação de profissionais, mas também se empenhar em capacitar pessoas conscientes e comprometidas com os valores sociais e ambientais, de modo que possa se criar uma cultura de sustentabilidade que se expanda a partir deles. Sharma et al., 2023, relata ainda, que capacitar os estudantes para resolver problemas sociais e ambientais é, de fato, transformador. Além disso, nos trabalhos apresentados por Honorio et al. (2023) e Sharma et al. (2023), muitos estudos analisados corroboram com o conceito de que a Educação Ambiental gera impactos positivos na sociedade, tais como compartilhamento de conhecimento, motivação e mudanças.

Neste sentido, o presente estudo teve como objetivo realizar um levantamento dos resíduos gerados e orientar a comunidade acadêmica, por meio de conscientização e de ações de educação ambiental, quanto ao descarte correto dos resíduos químicos do Laboratório de Química (LQ) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Francisco Beltrão. Além disso, devido a nova segregação de resíduos proposta por este trabalho, oportunizar o tratamento e recuperação *in loco* de uma parte dos resíduos descartados, com a finalidade de reduzir o volume de resíduos enviados para descarte e tratamento final, diminuindo assim os gastos da instituição.

Material e Métodos

O trabalho foi desenvolvido durante o mês de abril de 2015 no LQ da Coordenação de Estação Experimental (COEXP), do Campus Francisco Beltrão da UTFPR, localizado no sudoeste do estado do Paraná. No ano de 2015, o Campus ofertava os Cursos Superiores de Tecnologia de Alimentos, Engenharia de Alimentos, Engenharia Ambiental e Sanitária, Engenharia Química e Licenciatura em Informática, além de Cursos de Pós-graduação com 644 alunos efetivamente matriculados.



A COEXP coordena os laboratórios de ensino e pesquisa do Campus e, conseqüentemente, é o departamento responsável pelo descarte dos resíduos químicos gerados nos laboratórios. Em 2015 eram quatro (04) os laboratórios que geravam resíduos químicos no Campus e, desde o início de suas atividades, em 2008, a COEXP realiza a coleta de resíduos químicos, segregados em Inorgânicos, Orgânicos e Metais Pesados. A partir de 2013, devido a um novo contrato firmado, uma nova empresa especializada começou a prestar serviços à instituição referente a coleta, tratamento e certificação da destinação adequada de resíduos químicos, de acordo com a demanda da Coordenação de Laboratórios.

Em 2014, a média mensal de resíduos coletados nos laboratórios foi de setenta (70) litros, volume que foi totalmente encaminhado para a empresa prestadora de serviço. No decorrer do ano, foram realizadas trezentas e sessenta e sete (367) aulas práticas nos laboratórios e, destas, 34,33% aconteceram no LQ. Aulas práticas de diferentes disciplinas, tais como: Análise Físico-Química de Alimentos; Bioquímica; Bioquímica de Alimentos; Físico-Química; Introdução à Bioquímica; Métodos Instrumentais; Química Ambiental; Química Analítica; Química Geral; Química Geral e Inorgânica; Química Orgânica e Química Orgânica Experimental. Além disso, foram executadas atividades e ensaios de projetos de pesquisa científica.

As ações para o desenvolvimento do presente trabalho se iniciaram a partir da definição da segregação dos resíduos líquidos oriundos dos reagentes que eram utilizados em maiores volumes, assim portanto foi estabelecida a separação de resíduos em Inorgânicos, Orgânicos, Ácidos, Bases, Hexano e Éter de petróleo.

Deste modo, disponibilizou-se seis (06) galões para descarte de resíduo com capacidade de cinco (05) litros cada, identificados para a segregação proposta. Junto a esses recipientes de descarte, foram disponibilizadas fichas para a descrição do tipo de resíduo descartado, volume depositado e identificação do usuário, assim como curso de origem e/ou grupo de pesquisa científica.

A seguir, elaborou-se um documento com orientações sobre o novo procedimento de descarte de resíduos químicos no LQ, o qual mencionava o motivo pelo qual o trabalho estava sendo realizado com a finalidade de sensibilizar a comunidade acadêmica durante a utilização do laboratório, tanto em aula prática, quanto para trabalhos de pesquisa científica. Posteriormente, encaminhou-se este documento informativo por e-mail aos docentes, discentes usuários dos laboratórios, bem como técnicos de laboratório. Além disso, realizou-se conversas informais com docentes e discentes e, se dispôs o documento orientativo na parede do laboratório, junto aos galões de descarte dos resíduos, em local visível a todos os usuários.

Ao atingir aproximadamente 80% da capacidade total de cada galão, disponibilizou-se um novo com a identificação do mesmo tipo de resíduo. O recipiente retirado do laboratório, foi encaminhado para avaliação dos resíduos gerados, juntamente com a ficha preenchida pelos usuários e, posteriormente, encaminhou-se para tratamento e recuperação.

Os resíduos descartados nos recipientes identificados como ácidos e bases foram avaliados com a aferição do potencial hidrogeniônico (pH), por meio de um pHmetro microprocessado digital de bancada, da marca Del Lab, modelo DLA-PH e posteriormente homogeneizados em um béquer de vidro borossilicato, no interior da capela de exaustão de gases, da marca Amazon Lab, modelo CEA-600. Após a homogeneização, diluiu-se o volume do resíduo com água destilada até verificar que o resíduo se encontrava com pH entre 6,0 e 8,0. Em caso negativo, adicionou-se solução de hidróxido de cálcio, carbonato de cálcio ou hipoclorito de sódio, soluções prontas e disponíveis em estoque, até atingir a neutralização, conforme a metodologia descrita por Alberguini et al. (2005). Após a neutralização desses resíduos ácidos e básicos, realizou-se o descarte na pia do laboratório, com água corrente.

Os recipientes com os solventes éter de petróleo e hexano foram submetidos à destilação, em evaporador rotativo da marca Fisatom, modelo 802. Conforme a metodologia descrita por Dias et al. (2013), utilizou-se o banho-maria em temperatura entre 30°C e 40°C, com rotação de 4 rpm. Os procedimentos foram realizados por três (03) vezes para a obtenção dos solventes purificados, os quais foram colocados em recipientes limpos e identificados como Éter de petróleo e Hexano recuperados, e disponibilizados para utilização.

No entanto, os resíduos inorgânicos, orgânicos e com metais pesados, foram armazenados em recipientes com capacidade para sessenta (60) litros, respeitando o limite de 80% do total da sua capacidade, e alocados em local próprio, para posteriormente serem encaminhados para tratamento e descarte final por empresa terceirizada, contratada para este fim.

Resultados e Discussão

A partir do levantamento de dados em relação às aulas práticas durante o mês de desenvolvimento deste trabalho, observou-se a realização de setenta e três (73) aulas nos laboratórios do Campus Francisco Beltrão da UTFPR e, destas, 26% ocorreram no LQ. Pode-se perceber que a quantidade de aulas práticas no campus no período, foi muito similar à média mensal do ano anterior, isso se deve ao fato de os cursos possuírem uma padronização das aulas práticas das disciplinas ofertadas a cada semestre.

Analisando os dados obtidos, o volume de resíduos coletados no LQ foi de vinte e quatro (24) litros. Contata-se que, desse total, o resíduo gerado em maior volume estava identificado inorgânico, no frasco de coleta, somando 41,67%, conforme mostra a Tabela 1. Entretanto, mediante os dados presentes nas fichas para o registro do descarte dos resíduos, preenchidas pelos usuários, se observou que o recipiente que estava identificado como “descarte inorgânico” foi o que se obteve maior quantidade de descarte incorreto, uma vez que dos 44,8% dos resíduos identificados na ficha, apenas 10,04% foram descartados corretamente. Os demais registros no recipiente foram de descarte de ácidos, 69,42%, e bases, 20,54%.

Quanto ao descarte realizado no recipiente destinado aos resíduos orgânicos, se observa que foram registrados 57,8% dos resíduos descartados, conforme demonstra a Tabela 1, e, verifica-se que 89,62% desses resíduos referiam-se aos compostos orgânicos.



Tabela 1: Quantificação e caracterização dos resíduos coletados conforme a segregação implementada.

Segregação de Resíduos	Volume coletado* (%)	Quantificação dos resíduos coletados				
		total identificado** (%)	Quantidade de resíduos descartados*** (%)			
			Inorgânico	Orgânico	Ácido	Base
Inorgânico	41,67	44,8	10,04	-	69,42	20,54
Orgânico	20,83	57,8	-	89,62	10,38	-
Ácido	20,83	27,6	47,1	-	52,9	
Base	4,17	-	-	-	-	-
Éter de petróleo	4,17	70	-	-	-	-
Hexano	8,33	40	-	-	-	-

*Porcentagem em relação ao volume total coletado, 24L.

**Porcentagem dos resíduos identificados de cada categoria.

***Porcentagens correspondentes aos resíduos descartados do total registrado nas fichas de cada categoria.

Do mesmo modo, o descarte realizado no frasco identificado para resíduos ácidos, conforme descrito na Tabela 1, apenas 52,9% do que foram identificados eram ácidos, o restante dos resíduos que foram registrados era inorgânico.

Observou-se também, que uma grande porcentagem dos resíduos descartados não foi registrada pelos usuários do LQ. A exemplo disso, conforme menciona na Tabela 1, a ficha para identificação dos resíduos descartados no frasco para “bases” não foi preenchida por nenhum usuário, de modo que não se pode confirmar se todo o volume de resíduos descartado naquele frasco era, de fato, bases.

Em relação ao descarte dos solventes, hexano e éter de petróleo, o primeiro foi identificado em 70% do total descartado, enquanto o segundo, apenas 40% do total descartado foi registrado pelos usuários, conforme a Tabela 1.

Considerando os dados da Tabela 2, observa-se que mais da metade (57,31%) dos resíduos descartados não foram registrados e identificados pelos usuários, bem como a quantidade de descarte correto e incorreto foi muito semelhante, sendo 21,94% e 20,75%, respectivamente.

Tabela 2: Quantificação do tipo de descarte realizado.

Tipo de descarte	Quantidade de resíduos descartados (%)
Correto	21,94
Incorreto	20,75
Não identificado	57,31

O descarte incorreto ou não identificado, impossibilita o tratamento *in loco* desses resíduos, resultando no aumento do volume de resíduos encaminhado à empresa terceirizada que presta este serviço à instituição, bem como do valor pago referente a isso.

No entanto, foi possível realizar a recuperação dos solventes descartados. Do total de solvente coletados, recuperou-se 93,34%, volume este que foi disposto no laboratório para a reutilização.

Comentários finais

Os resultados obtidos mostram-se satisfatórios, uma vez que demonstram a existência da possibilidade de reduzir o volume de resíduos gerados, por meio da aplicação de técnicas simples como destilação de solventes ou neutralização de ácidos e bases. Contudo, existe a necessidade da realização de sensibilização dos usuários, por meio de treinamento contínuo acerca da correta segregação e descarte dos resíduos, para gerar maior comprometimento da comunidade acadêmica, bem como possibilitar o tratamento e recuperação na instituição, minimizando os gastos com empresa terceirizada.

Além de ampliar o conhecimento de educação ambiental e gerar mais conscientização da comunidade acadêmica sobre o descarte e tratamento dos resíduos, a recuperação de solventes possibilita a redução dos gastos da instituição com a aquisição de reagentes.

Agradecimentos

Os Autores agradecem a Universidade Tecnológica Federal do Paraná por permitir a realização deste trabalho, bem como aos



colaboradores da Coordenação da Estação Experimental pelo apoio recebido ao longo do processo.

Referências Bibliográficas

- ABNT; 2004. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação. 2.ed. Rio de Janeiro.
- Alberguini, L.B.A.; Silva, L.C.; Rezende, M.A.O; 2005. Tratamento de resíduos químicos: guia prático para a solução dos resíduos químicos em instituições de ensino superior. RiMa Editora, São Carlos, SP.
- Alecrim, G.F.; Magno, K.S.; Mendonça, R.B.S.; Valle, C.M.; 2007. Gerenciamento dos resíduos gerados nas disciplinas química geral e química inorgânica dos cursos da área de química do CEFET-AM. In: II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica, João Pessoa, PB.
- Barbosa, K.C.; Rosendo, E.A.A.; Costa, A.W.S.; Farias, L.G.A.T.; Leitinho, J.L.; 2019. Gestão de resíduos químicos dos laboratórios de ensino de química do município de Crateús: Um caminho rumo a sustentabilidade. In: 30 Congresso da ABES.
- Bertolo, F.O.A.; Martins, A.F.; Link, D.A.; 2012. A educação ambiental da gestão de resíduos dos laboratórios da FIAGRO/SEDE (Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária). Monografias Ambientais, v.5, n.5, p.1137-1144.
- BRASIL; 1981. Lei n. 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente. Brasília, DF.
- BRASIL; 2010. Lei n. 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF.
- Brito, A.L.F.; Muniz, A.C.S.; Lima, F.S.; Jovelino, J.R.; Silva, P.P.; 2018. Classificação de resíduos sólidos de laboratórios de instituição de ensino superior. Anais do VIII ISRMU, Campina Grande, PB, v.2.
- CETESB; 2011. Relatório de emergências químicas atendidas pela CETESB em 2010. São Paulo, SP.
- Couto, H.A.R; Guimarães, R.R.; Pamplona, A.M.S.R.; 2010. Normas para o gerenciamento de resíduos de laboratórios da Embrapa Amazônia Ocidental. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 1.ed. 24p.
- De Conto, S.M. (Organizadora); 2010. Gestão de Resíduos em Universidades. EDUCS, Caxias do Sul, RS.
- Dias, V.R.; Bresolin, J.D.; Soares, V.F.; 2013. Proposta de tratamento e avaliação de resíduos contendo hexano gerados nos laboratórios da Embrapa Instrumental visando sua reutilização. Anais da V Jornada Científica - Embrapa São Carlos. São Carlos, SP.
- Gerbase, A.E.; Coelho, F.S.; Machado, P.F.L.; 2005. Gerenciamento de resíduos químicos em instituições de ensino e pesquisa. Química Nova, v.28, n.1, p.3-3.
- Gomes, M.G.; Borges, S.S.S.; C. Junior, A.E.; Silva, R.S.; Silva, F.J.; Oliveira, S.N.; 2013. Tratamento, recuperação e reaproveitamento de resíduos químicos gerados em laboratórios de ensino da UFC. Revista Universo & Extensão, v.1, p.61-72.
- Gonçalves, M.S.; Kummer, L.; Sejas, M.I.; Rauen, T.G.; Bravo, C.E.C.; 2010. Gerenciamento de resíduos sólidos na Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Francisco Beltrão. Revista Brasileira de Ciências Ambientais, 15.ed. p.79-84.
- Honorio, L.M.C.; Targino, A.P.; Pereira, D.I.S.; Moreira, E.D.T.; Santos, M.B.H.; 2023. Resíduos químicos e gestão: orientação a nível médio sobre a educação ambiental. Anais do IX CONEDU, Realize Editora, Campina Grande, PB.
- Marinho, C.C.; Bozelli, R.L.; Esteves, F.A.; 2011. Gerenciamento de resíduos químicos em um laboratório de ensino e pesquisa: a experiência do laboratório de Limnologia da UFRJ. Eclética Química, v.36, n.2, p.85-104.
- Mistura, C.M.; Vaniel, A.P.H.; Linck, M.R.; 2010. Gerenciamento de resíduos dos laboratórios de ensino de química da Universidade de Passo Fundo, RS. Revista CIATEC - UPF, v.2, n.1, p54-64.
- Penatti, F.E.; Guimarães, S.T.L.; 2011. Avaliação dos riscos e problemas ambientais causados pela disposição incorreta de resíduos de laboratórios. Geografia Ensino & Pesquisa, v.15, n.1.
- Penatti, F.E.; Guimarães, S.T.L.; Silva, P.M.; 2008. Gerenciamento de resíduos químicos em laboratórios de análise e pesquisa: o desenvolvimento do sistema em laboratórios da área química. In: II Workshop Internacional em Indicadores de



Sustentabilidade - WIPIS, São Carlos, SP.

Sharma, N.; Paço, A.; Upadhyay, D.; 2023. Option or Necessity: Role of environmental education as transformative change agente. *Evaluation and Program Planning*, v.97, p.102244.

Silva, R.; Santos, F.S.; Pires, M.; 2012. Uso de materiais recicláveis na determinação gravimétrica de CO₂ no ar ambiente e tratamento dos resíduos de laboratórios gerados. *Química Nova*, v.35, n.10, p.2067-2071.

Siqueira, A.M.O; Cordeiro, R.M.S.; Menezes, G.C.; 2022. Reagents and Chemicals in chemistry laboratory (Orogram of Scientific Initiation Voluntary). *The Journal of Engineering and Exact Sciences - jCEC*, v.8, n.1.

Tavares, G.A.; Bendassolli, J.A.; 2005. Implantação de um programa de gerenciamento de resíduos químicos e águas servidas nos laboratórios de ensino e pesquisa no CENA/USP. *Química Nova*, v.28, n.4, p.732-738.

Vieira, C.L.Z.; Rumenos, N.N.; Gheler-Costa, C.; Toqueti, F.; Spazziani, M.L.; 2022. Environmental education in urban cities: Planet regeneration through ecologically educating children and communities. *International Journal of Educational Research Open*, v.3, p.100208.



“COMPOSTAR PRA QUÊ?”: SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA ENSINAR COMPOSTAGEM NO ENSINO MÉDIO

**1Iane Brito Tavares, 2Aurean de Paula Carvalho, 3Saulo Carvalho de Souza Timoteo,
4Marcus André Ribeiro Correia, 5Fabiana Bassani**

1 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará/Campus Conceição do Araguaia e Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins/Campus Porto Nacional, e-mail: iane.tavares@ifto.edu.br; 2 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins/Campus Porto Nacional, e-mail: aurean@ifto.edu.br; 3 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins/Campus Porto Nacional, e-mail: saulodede@ifto.edu.br; 4 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins/Campus Porto Nacional, e-mail: correia@ifto.edu.br; 5 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará/Campus Conceição do Araguaia, e-mail: fabiana.bassani@ifpa.edu.br

Palavras-chave: Resíduos orgânicos; Interdisciplinaridade; Educação

Resumo

A prática da compostagem é uma atividade recorrente em projetos integradores nos cursos técnicos e superiores. A técnica de reaproveitamento de resíduos sólidos orgânicos minimiza os danos ambientais causados pela disposição de resíduos no solo, além de diminuir o volume de resíduos em aterros sanitários, prolongando sua vida útil. Além disso, por ser prática e multidisciplinar, o tema compostagem ajuda a trabalhar conteúdos de diferentes áreas do conhecimento de forma integrada. Alinhado a essa abordagem integrativa, o objetivo deste trabalho foi desenvolver uma sequência didática voltada para a promoção de um espaço de reflexão e análise crítica das contribuições da compostagem direcionada aos alunos do ensino médio integrado ao Técnico em meio ambiente de uma instituição da rede pública de ensino. Para isso, foi proposta uma ação central: a confecção de mini-composteiras constituídas por resíduos sólidos orgânicos provenientes das residências dos alunos. Depois, foram trabalhados temas intrínsecos à compostagem, desde o consumismo até o uso de produtos da compostagem (composto e biofertilizante) para a nutrição vegetal. Essas ações foram executadas em 03 etapas: i) Na teoria - Encontros educativos para discutir os conteúdos selecionados; ii) Aplicando - Incluiu a fabricação de mini-composteiras, seu monitoramento e ensaio de toxicidade; iii) Ensinando – Envolveu a comunicação e divulgação dos produtos gerados para a comunidade, por meio das mídias sociais e evento científico. A proposta didática adotada permitiu aprender e revisar assuntos sobre gestão, reaproveitamento de resíduos orgânicos e seus benefícios de forma ampla, conectando saberes de diferentes áreas. As atividades realizadas tornaram conteúdos abstratos em experiências visuais, táteis e olfativas, promovendo um processo de ensino-aprendizagem mais envolvente e atrativa. Espera-se que esta proposta amplie a abordagem do tema, conferindo ao ensino um caráter significativo, como também que as competências essenciais para uma educação integral sejam cultivadas.

Introdução

Tradicionalmente, a educação tende a organizar o conhecimento em disciplinas distintas, o que pode levar a uma visão fragmentada e limitada do objeto investigado. Por isso, a interdisciplinaridade visa superar essas limitações, capacitando o aluno a desenvolver uma compreensão mais abrangente de um conteúdo e integrar conhecimentos para enfrentar desafios conectados à sua realidade.

Desde a Idade Média já era possível inferir a presença da interdisciplinaridade na escola. Estudiosos buscavam relações entre diferentes conhecimentos para avançar, mas no século XX, com o desenvolvimento científico e demandas sociais específicas, houve a tendência à especialização disciplinar para atender às necessidades da sociedade (OLIVEIRA et al., 2017). Segundo os mesmos autores, na década de 60, a interdisciplinaridade chegou ao Brasil, influenciando a LDB n. 5.692/71 e ganhando espaço na educação brasileira desde então.

Na atualidade, uma das estratégias para promover a interdisciplinaridade no ensino médio integrado tem sido a execução de projetos integradores. A educação profissional técnica integrada proporciona a formação básica (nível médio) em conjunto com a formação profissional. Essa modalidade educacional visa preparar os alunos para ingressar no mercado de trabalho com habilidades práticas e conhecimentos especializados em uma determinada área profissional.

O Decreto n.º 5.154/2004, que regulamenta o § 2º do art. 36 e os arts. 39 a 41 da Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (Lei n.º 9.394/1996), prevê que a articulação entre a educação profissional técnica de nível médio e o ensino médio dar-se-á de forma: integrada (...) (art. 4º, § 1º, inc. I). Sendo assim, para além da organização curricular de contemplar disciplinas da base geral e da área técnica no mesmo currículo, é primordial que essas disciplinas se unam mediante uma constante busca por elementos integradores (BERNARDES; PEIXOTO, 2020).

O componente curricular Projeto Integrador apresenta-se como “uma prática pedagógica, capaz de operacionalizar o currículo integrado, uma vez que, por meio da estratégia da interdisciplinaridade e da problematização, há possibilidade de potencializar a integração das diversas áreas do conhecimento” (BERNARDES; PEIXOTO, 2020, p. 6).

O Projeto Integrador é uma atividade interdisciplinar que visa integrar o conhecimento adquirido ao longo do curso técnico em um projeto único. Os alunos devem estabelecer objetivos, planejar e executar um projeto que envolva as competências adquiridas em cada disciplina. Isso permite que o estudante vivencie na prática a aplicação do conhecimento e melhore sua capacidade de trabalhar em equipe.



Normalmente, os projetos integradores são realizados em grupos, desenvolvendo a capacidade de trabalhar em conjunto e contribuir para a construção de algo maior. Nesse momento, os alunos devem solucionar problemas reais, estimulando o desenvolvimento do raciocínio crítico e da capacidade de analisar situações complexas. Assim, os estudantes aprendem na prática, aplicando o conhecimento de forma concreta e acompanhando o projeto durante todo o processo.

No caso dos cursos médios integrados ao técnico em Meio Ambiente, entre os vários problemas reais abordados nos projetos integradores, destaca-se a questão dos resíduos sólidos orgânicos domésticos e algumas perspectivas para redução de impactos. Isso devido a elevada geração de resíduos, em decorrência do aumento populacional e o conseqüente aumento no consumo de alimentos.

Uma das alternativas sustentáveis apresentadas pela Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) para lidar com resíduos sólidos orgânicos é a compostagem, uma prática simples que pode ser desenvolvida em qualquer ambiente, com possibilidade de uso do produto resultante como adubo nas produções vegetais (AQUINO et al., 2005; LANA; PROENÇA, 2021).

Ainda em 2017, o Ministério do Meio Ambiente informou que cerca de 50% dos resíduos urbanos gerados no Brasil são orgânicos e poderiam ser reciclados em pequenos espaços, como as residências, ou em escala industrial (BRASIL, 2017). Segundo o mesmo autor, a compostagem contribui para a redução de resíduos enviados aos aterros sanitários ou lixões, aumentando o tempo de vida desses sistemas, produz adubo orgânico rico em nutrientes e capazes de melhorar propriedades físicas e químicas do solo. Por isso, a compostagem é reconhecida como uma prática que gera um impacto positivo no meio ambiente.

A compostagem não apenas mitiga os impactos associados à disposição de resíduos nos lixões, mas também devolve os resíduos orgânicos a seu papel natural de fertilizar os solos (LANA; PROENÇA, 2021). A compostagem também é utilizada como forma de redução do volume de resíduos enviados para aterros sanitários, bem como dos custos envolvidos na sua gestão e prolongamento da vida útil desse sistema (BRASIL, 2022).

Na compostagem, os resíduos orgânicos sofrem transformações metabólicas por microrganismos, caso sejam fornecidas as condições adequadas de umidade, aeração e temperatura. Como resultado da digestão da matéria orgânica por esses organismos, ocorre a liberação de nutrientes mineralizados. Assim, elementos antes imobilizados na forma orgânica tornam-se disponíveis para as plantas num processo conhecido como mineralização (AQUINO et al., 2005).

Algumas vantagens pedagógicas de se trabalhar a compostagem no ambiente escolar são (RICCI, 2023): i) permite aos estudantes aprender de maneira prática, interativa e criativa; ii) incentiva a expressão de opiniões, mas também conscientizam os alunos sobre os impactos dos resíduos sólidos em suas vidas e no meio ambiente além do contexto escolar; iii) e que o conhecimento adquirido por eles na escola tem um potencial imenso de ser aplicado diretamente em suas residências e no convívio familiar.

Manfio et al. (2021) apresentaram uma proposta metodológica para trabalhar a interdisciplinaridade durante a confecção e manutenção de composteira, especialmente do tipo vermicomposteira. Segundo os autores, o professor poderá trabalhar a interdisciplinaridade na disciplina de Ciências, bem como a interdisciplinaridade com outras disciplinas (Artes, Química, Física, Língua Portuguesa e Geografia), tornando o processo de ensino aprendizagem mais produtivo e interessante. Além desse, alguns projetos desenvolvidos nos cursos técnicos e superiores apresentam a compostagem como instrumento de integração de conteúdos de diferentes áreas e/ou estratégia para promoção da educação ambiental no ensino básico e superior (e.g. ALMEIDA et al., 2019; BUENO et al., 2018; SOUZA et al., 2018).

Nota-se que iniciativas de compostagem de resíduos orgânicos têm demonstrado resultados positivos ao promover a aprendizagem significativa dos alunos, estimulando a aplicação prática de conceitos acadêmicos e sensibilização para questões ambientais. Esses tipos de projetos podem estimular práticas sustentáveis além do ambiente escolar, estendendo-se aos familiares dos alunos e demais comunidades.

Com base no exposto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver uma sequência didática voltado para a promoção de um espaço de reflexão e análise crítica, das contribuições da compostagem, entre alunos do ensino médio integrado ao Técnico, buscando um processo de ensino-aprendizagem mais envolvente e significativo.

Material e Métodos

Este trabalho foi no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins/Campus Porto Nacional com estudantes do 2º. Ano do ensino médio integrado ao Técnico em Meio Ambiente. Esse curso tem duração de 06 semestres, em cada um é ofertado um componente curricular chamado Projeto Integrador, buscando integrar os conteúdos trabalhados naquele semestre letivo. As atividades descritas neste trabalho foram desenvolvidas no componente curricular Projeto Integrador 4, durante o segundo semestre de 2023.

A ação prática central deste trabalho foi a confecção de mini-composteiras, sendo uma para cada grupo de 03 a 05 alunos. As mini-composteiras eram constituídas por resíduos sólidos orgânicos provenientes das residências dos alunos. A partir dessa ação integrou-se saberes da Educação Básica (Matemática) com os saberes da Educação Profissional (Resíduos Sólidos e Técnicas de Análise de Água e efluentes), e saberes das Ciências Agrônômicas, no tema central - Reciclagem de resíduos orgânicos domiciliares: da geração à devolução sustentável ao solo.

As atividades propostas foram executadas em 03 etapas (Tabela 1), a saber: i) Na teoria – foram realizados encontros educativos para debater sobre os benefícios da compostagem, a importância da matemática na resolução de problemas relacionados à sustentabilidade ambiental, e o usos dos compostos orgânicos, vantagens e desvantagens; ii) Aplicando – foram confeccionadas mini-composteiras, acompanhado o processo de desintegração e decomposição da matéria orgânica, e avaliando a toxicidade do biofertilizante; iii) Ensinando – os produtos gerados foram divulgação para a comunidade por meio de jogos educativos, conteúdos midiáticos e em evento científico.



Tabela 1: Atividades desenvolvidas no componente curricular Projeto Integrador 4, Porto Nacional-TO, 2023.

ETAPAS	ATIVIDADES REALIZADAS	PERÍODO
Na teoria	03 (três) encontros educativos para revisar conteúdos sobre a compostagem, seus benefícios e os diferentes modelos de composteiras	26/07 a 16/08/2023
	03 (três) encontros educativos sobre composteira retangular, cálculo da área da base, altura, volume, e unidades de medida e volume	30/08 a 22/11/2023
	02 (dois) encontros educativos sobre os usos dos compostos orgânicos e suas implicações	25/10 a 08/11/2023
Aplicando	Confecção de mini-composteiras	23/08 a 29/11/2023
	Monitoramento do processo de desintegração e decomposição da matéria orgânica por meio de análises visuais e sensoriais	
	Ensaio qualitativo de toxicidade do biofertilizante produzido pela composteira no cultivo de coentro	04/10 a 29/11/2023
Ensinando	Produção de jogos educativos online	13/09 a 28/11/2023
	Produção de conteúdos para mídias sociais	
	Exposição do projeto e produtos no stand “Compostar pra quê?” da Feira de Ciências, Arte e Engenharia do <i>Campus</i> Porto Nacional/IFTO	

As metodologias de ensino utilizadas foram: aulas expositivas e dialogadas, aulas práticas e aprendizagem baseada em projeto. Essa última é uma “(...) metodologia ativa que coloca os alunos no centro do processo de ensino e aprendizagem e da busca de soluções para problemas reais, preferencialmente, relacionados à sua vivência” (BERNARDO, 2022, p. 1).

1. Na teoria

Nesta etapa, foram realizados 03 encontros educativos voltados para os benefícios da compostagem (Tabela 1). Os assuntos e atividades foram organizados em estações com três momentos: 1) Compostagem; 2) Reaproveitamento de resíduos; 3) Sintetizando o conteúdo. Aqui trabalhou-se a habilidade de propor iniciativas individuais e coletivas para a solução de problemas ambientais da cidade ou da comunidade, com base na análise de ações de consumo consciente e de sustentabilidade bem-sucedidas. Essa atividade foi adaptada do plano de aula sugerido por Silva (2023).

Em outros 03 encontros educativos, trabalharam-se conceitos de área e volume no contexto da compostagem, desenvolvendo habilidades matemáticas e compreendendo sua importância na resolução de problemas relacionados à sustentabilidade ambiental.

Esta etapa foi finalizada com 02 encontros voltados para analisar e descrever os benefícios físicos, químicos e biológicos proporcionados pelo uso de resíduos orgânicos.

Nesta etapa as seguintes habilidades foram trabalhadas: i) Habilidade de Comunicação Descritiva; ii) Pensamento analítico e crítico acerca dos impactos ambientais; iii) Habilidade de observar atentamente os resultados e efeitos da compostagem, reconhecendo nuances e características que contribuem para os benefícios qualitativos; iv) Capacidade de construir argumentos convincentes e embasados para destacar a importância e os valores dos benefícios qualitativos da compostagem; v) Compreensão de Processos Ecológicos.

1.1. Aplicando

Na etapa “Aplicando”, os alunos confeccionaram mini-composteiras, realizaram análises visuais e sensoriais do composto durante as fases de desintegração e decomposição e realizaram um teste qualitativo de toxicidade do biofertilizante produzido nas composteiras, como descritas a seguir.

1.1.1. Confecção das mini-composteiras

Foram confeccionados 02 formatos de composteiras, um utilizando 02 baldes de tinta, massa corrida ou margarina; e outro 02 garrafas de polietileno tereftalato (PET) de 5 litros. No primeiro formato, um balde permaneceu com a tampa inteira e com furos no fundo, com diâmetro de 4,5 a 6 mm, para o chorume passar. Nesse, foi depositado meia porção de solo, uma porção de resíduo orgânico rico em carbono e duas porções de material seco (folhas secas) rico em nitrogênio. Enquanto o segundo balde funcionou como coletor do chorume, por isso teve apenas a tampa cortada. O mesmo sistema foi confeccionado com garrafas PETs. Foram confeccionadas 09 mini-composteiras no total.

1.1.2. Análises visuais e sensoriais do composto e potencial toxicológico do biofertilizante

Os alunos monitoraram o processo de desintegração e decomposição dos resíduos orgânicos durante os 03 primeiros meses das mini-composteiras. Os processos de decomposição da matéria orgânica e o teor de umidade do solo foram acompanhados por meio de avaliações visuais. Concomitantemente, foi verificada a presença de insetos e odores. Finalizadas as avaliações, o material em decomposição era revolvido para garantir uma boa drenagem e aeração, e hidratado, sempre que necessário.

Nesta etapa, foi realizado também o teste qualitativo de toxicidade do biofertilizante produzido pela composteira no cultivo de coentro (*Coriandrum sativum*). Para isso, sementes de coentro foram previamente cultivadas em bandejas de isopor pelos alunos e, depois de 14 dias do plantio, foram irrigadas com o biofertilizante concentrado. Os alunos monitoraram os efeitos do biofertilizante nos 20 primeiros minutos após a irrigação e depois de 07 dias.



1.2. Ensinando

Os alunos criaram folhetos, conteúdos para mídias sociais e jogos educativos sobre compostagem e sua relevância, utilizando o aplicativo *Canva* e a plataforma *Wordwall*, para divulgar e consolidar os conhecimentos obtidos. Eles também participaram da Feira de Ciência, Arte e Engenharia do IFTO/*Campus* Porto Nacional, realizada no dia 28 de novembro de 2023, como expositores do stand “Compostar pra quê”. Nesse evento, foram apresentadas as atividades realizadas e os produtos gerados no Projeto Integrador 4.

1.3. Avaliação das Atividades

O acompanhamento e avaliação deste projeto foi realizado através da comparação entre as atividades planejadas e as executadas, e adotadas as seguintes estratégias: encontros regulares com os alunos envolvidos no projeto, e conversas com a equipe executora para discutir desafios encontrados, dependendo da complexidade das atividades e fazer ajustes conforme necessário.

Resultados e Discussão

A proposta didática adotada permitiu conhecer e revisar conteúdos relacionados à gestão dos resíduos orgânicos domiciliares, o reaproveitamento de resíduos e seus benefícios. Neste estudo o tema compostagem foi apresentado por meio da conexão dos conteúdos do componente curricular Resíduos Sólidos (processo de mineralização da matéria orgânica), com a geometria espacial (dimensionamento de composteiras) e fertilidade do solo e nutrição de plantas (usos dos resíduos e efluentes estabilizados) em um viés voltado para a educação ambiental.

2. Etapa “Na teoria”

Na primeira etapa (Na teoria), os alunos revisaram conteúdos sobre compostagem estudados do semestre anterior, na disciplina Projeto Integrador 3. Nos primeiros encontros educativos, notou-se que poucos alunos sabiam descrever as fases do processo de compostagem (fase mesofílica, fase termofílica, fase de resfriamento e fase de maturação), desintegração e decomposição dos resíduos. Nesse caso, foram aplicadas atividades descritivas e argumentativas sobre o assunto. Concomitante, os mesmos assuntos foram trabalhados na disciplina Resíduos sólidos, ofertada no mesmo semestre.

Os alunos puderam acompanhar a desintegração e decomposição dos resíduos orgânicos (etapa “Praticando”), conhecer como a geometria espacial se aplica na confecção das composteiras, e as possibilidades de usos e benefícios do composto orgânico no solo e vegetação.

Ver-se que os conteúdos/objetos de conhecimentos associados com a confecção das mini-composteiras (Figura 1) permitiram que assuntos antes abstratos, como desintegração e decomposição dos resíduos, ganhassem forma, cor e cheiro à medida que os resíduos orgânicos foram se transformando em inorgânicos. Assim, os conteúdos abstratos passaram a ser concretos em experiências visuais, palpáveis, perceptíveis ao olfato, que ganharam vida e significado diante dos olhos, tato e narizes dos alunos. Além disso, despertou-se nos alunos a responsabilidade com o reaproveitamento dos resíduos, importância e percepção dos benefícios que essa prática promove ao meio ambiente.



Figura 1: Sistema de composteiras confeccionadas em A) baldes de tinta e B) garrafas de polietileno tereftalato.

A educação ambiental estimula a “formação de cidadãos conscientes, aptos a decidir e atuar na realidade socioambiental de modo comprometido com a vida, com o bem-estar de cada um e da sociedade local e global (OLIVEIRA, 2013, p. 1). Entende-se que no ambiente escolar é possível promover uma formação cidadã consciente, conhecedora dos impactos advindo das atividades humanas, bem como os seus efeitos no destino do Planeta. Para isso, é necessário que, mais do que informações e conceitos, a escola se proponha a trabalhar uma Educação Ambiental efetiva e sensibilizadora, de forma que ocorram mudanças de atitudes e apropriação de posturas que alcancem o equilíbrio entre as ações do homem e a natureza (OLIVEIRA, 2013).

2.1. Etapa “Praticando”

Na etapa “Praticando”, observou-se que 04 composteiras com resíduos orgânicos contendo casca de ovos apresentaram mau cheiro e insetos, enquanto as demais (05) não apresentaram. Isso ocorreu porque esses sistemas receberam muita água e calor, e a mistura fermentou, gerando metano e outros gases (BRASIL, 2017).



Embora a compostagem seja um método simples e de fácil manuseio, necessita ser bem compreendida e operada para evitar problemas com a geração de odores (BRASIL, 2017). Para contornar o problema, periodicamente, as tampas das mini-composteiras foram retiradas e o material revolvido, sem adicionar água. Assim as partes mais antigas foram misturadas as mais novas e oxigênio foi adicionado ao sistema, potencializando a decomposição aeróbica, e aos poucos substâncias mais complexas presentes em cada material foram sendo quebradas e transformadas em substâncias simples e disponíveis a outros organismos (BRASIL, 2017).

Além de odor, estas 04 composteiras também apresentaram insetos e larvas da espécie de *Drosophila*. Possivelmente, o material orgânico em decomposição atraiu moscas-domésticas e moscas-varejeiras, que depositaram seus ovos no local, ou os resíduos que os alunos trouxeram já vieram contaminados. Apesar desse inconveniente, nenhum controle foi aplicado e, depois de 03 semanas, não foi notada a presença de insetos nas composteiras. Os inconvenientes citados reforçam que a compostagem é uma técnica simples, mas dependente de condições adequadas de umidade, aeração e temperatura (AQUINO et al., 2005), para ocorrerem as transformações metabólicas dos resíduos orgânicos pelos microrganismos.

Outro aspecto da compostagem que merece atenção é a qualidade do composto orgânico para uso agrícola. No Brasil, poucas plantas de compostagem têm máquinas que separam os resíduos coletados. Como os resíduos chegam misturados, o resultado é um produto de baixa qualidade e eficiência do ponto de vista agrônomico (presença de materiais indesejáveis e metais pesados) (MASSUKADO; SCHALCH, 2010). Conforme a legislação brasileira, o composto e o biofertilizante derivados de resíduos sólidos devem ser aptos para uso seguro na agricultura, apresentando condutividade elétrica, índice salino, metais pesados e outros parâmetros em limites estabelecidos (BRASIL, 2022).

O biofertilizante é um líquido escuro, proveniente do excesso de umidade do sistema, rico em nutrientes. O uso de biofertilizantes em culturas agrícolas é uma boa opção para proporcionar melhoria nas características do solo e na produtividade das culturas, entretanto, se a dosagem aplicada for inadequada, pode trazer efeitos nocivos tanto à cultura quanto ao solo (OLIVEIRA, 2002; MENEZES; MATOS, 2018).

O uso frequente de biofertilizante tem contribuído sensivelmente para a expansão da área de solos degradados por salinidade e sodicidade (PEDROTTI et al., 2015). No caso das culturas, o seu desenvolvimento é diretamente atingido pela salinização, devido às dificuldades na absorção de água e nutrientes ocasionadas pelo aumento da pressão osmótica da solução do solo (MARSCHNER, 1995).

Atentos a essa questão, neste trabalho realizou-se um ensaio de toxicidade do biofertilizante em coentros (Figura 2). Notou-se que os coentros irrigados com o biofertilizante não sofreram danos após a aplicação, tão pouco, após 02 semanas. Esse resultado pode sugerir que a condutividade elétrica do biofertilizante foi indiferente para a cultura testada.



Figura 2: Ensaio de toxicidade do biofertilizante no cultivo de coentros (*Coriandrum sativum*).

Diferentemente, um teste de ecotoxicidade realizado com um composto orgânico advindo da compostagem doméstica, utilizado minhocas com bioindicadoras, detectou toxicidade correlacionada com a concentração do composto (MASSUKADO; SCHALCH, 2010). Embora os pesquisadores não tenham identificado a causa exata dessa toxicidade, uma avaliação abrangente dos diversos parâmetros de qualidade do composto, como a concentração de metais pesados, levou a inferência de que a alta condutividade elétrica do composto ($CE = 7,48 \text{ mS/cm}$) pode ter contribuído para a mortalidade das minhocas.

Por isso, ensaios de ecotoxicidade têm sido recomendados como uma ferramenta adicional na avaliação da qualidade do composto por serem sensíveis a poluentes em baixas concentrações e a interações não detectadas por análises químicas convencionais (MOREIRA et al., 2008; MASSUKADO; SCHALCH, 2010), e possibilitando avaliar os impactos dos poluentes para organismos do solo e dos corpos receptores (MASSUKADO; SCHALCH, 2010).

Ainda que o uso do composto ou biofertilizante exijam cuidados e moderações, a compostagem gera um produto tecnológico que pode ser utilizado na nutrição vegetal, diminuindo a necessidade de fertilizantes sintéticos e gerando, inclusive renda para o setor público ou privado” (CARDOSO; CARDOSO, 2016). Para os mesmos autores, essa técnica reduz significativamente a emissão de gás metano no ambiente, favorecendo a recuperação de nutrientes desses resíduos e disponibilização ao solo.



2.2. Etapa Ensinando

Na etapa “Ensinando”, os alunos criaram folhetos, conteúdos para mídias sociais e jogos educativos (Figura 3) sobre a importância da compostagem, para divulgar e consolidar os conhecimentos obtidos. Eles também participaram da Feira de Ciência, Arte e Engenharia do IFTO/Campus Porto Nacional como expositores do stand “Compostar pra quê”. Nesse evento, apresentaram as atividades realizadas e os produtos gerados no Projeto Integrador 4.



Figura 3: Alguns dos jogos educativos criados no Projeto integrador 4. A) jogo da forca; B) quis; C) labirinto e; D) jogo gire a roleta.

Estas atividades permitiram também o compartilhamento do conhecimento por meio dos veículos de comunicação adotados, de formas criativas e acessíveis, desde conteúdos para mídias sociais (Figura 4) até exposições tecnológicas (Figura 5). Nesse caso, “(...) além de desenvolver conhecimentos, habilidades e atitudes, o projeto integrador desenvolveu a criatividade, incentivando a prática de soluções que irão ajudar o meio ambiente, oferecendo uma destinação correta dos resíduos gerados pela escola (...)” (SOUZA et al., 2018, p. 1).



Figura 4: Alguns dos conteúdos publicados nas mídias sociais da turma. A) Curiosidades sobre a compostagem; B) conceito de compostagem e sua importância; C) instruções para montar uma composteira.



**Figura 5: Participação dos alunos na Feira de Ciências como expositores do stand “Compostar pra quê?”.
A) Parte da equipe do projeto; B) vista do stand.**

O stand “Compostar pra quê?” foi uma vitrine do processo de transformação dos resíduos, onde não só se exibiram modelos de composteiras e produtos resultantes, mas também se plantou sementes de sensibilização ambiental em cada visitante, inspirando outros a trilharem o caminho da sustentabilidade.

Vale mencionar que o conhecimento adquirido na escola também é transmitido pelos alunos aos amigos e familiares, disseminando a conscientização ambiental para a comunidade, para que também “contribuam na formação de uma consciência crítica, sempre revendo seu papel e suas práticas no contexto de sociedade que se vive (...)” (RAMOS JUNIOR; PROCOPIAK, 2013).

Finalizadas as atividades propostas neste trabalho, alguns alunos levaram para casa um pouco de composto orgânico para cultivar suas hortaliças. Por isso, acredita-se que este projeto não terminou aqui, mas se estendeu para os lares dos alunos. Cada semente ou parte vegetativa cultivada nesse composto será um lembrete das contribuições da educação ambiental e da ciência no gerenciamento correto dos resíduos domiciliares.

Considerações Finais

Neste trabalho, foi observado que a proposta didática adotada conferiu um processo de ensino-aprendizagem mais envolvente e significativo, além de permitir que competências essenciais para uma abordagem interdisciplinar fossem ofertadas.

A escolha da temática “compostagem” permitiu uma compreensão do funcionamento da técnica, suas vantagens e limitações. De fato, trata-se de um método simples e de fácil manuseio, desde que as condições adequadas de umidade, aeração e temperatura sejam fornecidas. No entanto, a falta dessas condições pode resultar em problemas como a geração de odores e incidência de insetos.

Observou-se também a importância de garantir a qualidade e segurança dos produtos da compostagem para o uso agrícola, e que esses produtos podem diminuir a necessidade de fertilizantes sintéticos, gerando economia e renda.

Espera-se que o acesso aos conteúdos relacionados à compostagem tenha conectado os alunos ao conhecimento prévio, ampliando sua compreensão e reforçado a importância da reciclagem de resíduos sólidos, inspirando outros alunos a trilharem o caminho da sustentabilidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins (IFTO) e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA) pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

Almeida, V. R.; Brito, B. C.; Collins, N. P. 2019. Experiências em projetos integradores no curso de Tecnologia em Saneamento Ambiental do IFPA Campus Itaituba. *Revista Exitus*, v. 9, n. 3, pp. 451-475.

Aquino, A. M. et al. 2005. **Integrando Compostagem e Vermicompostagem na Reciclagem de Resíduos Orgânicos Domésticos**. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/596884/1/cit012.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2023.

Bernardes, V. A.; Peixoto, E. M. 2020. **Guia de orientações: projeto integrador no curso técnico em informática integrado ao ensino médio do IFES**. Instituto Federal do Espírito Santo, 29 p.

Bernardo, N. 2022. **O que é a Aprendizagem Baseada em Projetos e como ela pode ser usada na recomposição de aprendizagens**. Disponível em: <https://novaescola.org.br/conteudo/21206/o-que-e-a-aprendizagem-baseada-em-projetos-e-como-ela-pode-ser-usada-na-recomposicao-de-aprendizagens>. Acesso em: 07 mar. 2024.



Brasil. Ministério da Agricultura e Pecuária. 2022a. **Legislação**. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacoes>. Acesso em: 07 abr. 2024.

Brasil. Ministério do Meio Ambiente. 2017. **Compostagem doméstica, comunitária e institucional de resíduos orgânicos**: manual de orientação. MMA, 68 p.

Brasil. Ministério do Meio Ambiente. 2022b. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília: MMA, 209 p.

Bueno, B. et al. 2018. Proposta de Tecnologia para Reutilização de Resíduos Orgânicos – Protótipo Reator de Compostagem. Anais da XVII Semana Unificada de Apresentações dos Projetos Integradores em Engenharia Ambiental e Sanitária, pp. 69-82.

Cardoso, F. C. I.; Cardoso, J. C. 2016. O problema do lixo e algumas perspectivas para redução de impactos. **Ciência e Cultura**, v. 68, n. 4, pp. 25-29.

Lana, M. M.; Proença, L. C. 2021. **Resíduos orgânicos**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/hortalica-nao-e-so-salada/secoes/residuos-organicos#:~:text=Por%C3%A9m%2C%20o%20destino%20ideal%20para,natural%20de%20fertilizar%20os%20solos>. Acesso em: 22 ago. 2023.

Manfio, D. et al. 2021. **Projeto integrador - temática “lixo”**: material didático-instrucional para o ensino de ciências. UTFPR, 99 p.

Marschner, H. 1995. **Mineral nutrition of higher plants**. Academic Press, 889 p.

Massukado, L. M. 2008. **Desenvolvimento do processo de compostagem em unidade descentralizada e proposta de software livre para o gerenciamento municipal dos resíduos sólidos domiciliares**. Escola de Engenharia de São Carlos, 182 p.

Massukado, L. M.; Schalch, V. 2010. Avaliação da qualidade do composto proveniente da compostagem da fração orgânica dos resíduos sólidos domiciliares. **Revista DAE**, v. 58, pp. 9-15.

Menezes, L. A. N.; Matos, A. T. 2018. Condutividade elétrica do solo em função da dose de aplicação de água residuária em áreas de fertirrigação. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 26, n. 04, pp. 383-389.

Moreira, R.; Sousa, J. P.; Canhoto, C. 2008. Biological testing of a digested sewage sludge and derived composts. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 17, pp. 8382-8389.

Oliveira, F. C. et al. 2002. Efeitos de aplicações sucessivas de lodo de esgoto em um latossolo amarelo distrófico cultivado com cana-de-açúcar: carbono orgânico, condutividade elétrica, pH e CTC. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 2, p. 505-519.

Oliveira, L. C. 2013. A importância da educação ambiental na escola. **Revista FT**, v. 127, pp. 1-23.

Oliveira, L. M. S. R.; Moreira, M. B. 2017. Da disciplinaridade para a interdisciplinaridade: um caminho a ser percorrido pela academia. **Revista de educação da Universidade Federal do Vale do São Francisco**, v. 7, n.12, pp. 06-20.

Pedrotti, A. et al. 2015. Causas e consequências do processo de salinização dos solos. **Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas**, v.19, n.2, pp.1308-1324.

Ramos Junior, A. S.; Procopiak, L. K. 2013. Educação ambiental no espaço escolar. **Cadernos PDE**, v. 1. pp. 1-14.

Ricci, M. 2023. **Manual para gestão de resíduos orgânicos nas escolas**. Instituto Pólis/Climate and Clean Air Coalition/Municipal Solid Waste Initiative, 52 p.

Souza, C. C. et al. 2018. **Logística Reversa de resíduos orgânicos em uma escola pública de São José dos Campos-SP**. Anais do XXII Encontro Latino-Americano de Iniciação Científica/ XVII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação/VIII Encontro de Iniciação à Docência. Universidade do Vale do Paraíba, pp. 1-6.



IMPLANTAÇÃO DE VIVEIRO FLORESTAL EXPERIMENTAL E ANÁLISE DO POTENCIAL BIOTECNOLÓGICO DE SEMENTES DE CUPUAÇU (*Theobroma grandiflorum*) ATRAVÉS DE UM BANCO DE GERMOPLASMA VEGETAL COLETADO NA AMAZÔNIA - BRASIL.

1André Vilhena de Oliveira, 2Rosana de Cassia de Souza Schneider, 3Adilson Ben da Costa, 4Nidianne Nascimento Vilhena, 5Ana Célia dos Santos de Azedo, 6Valclecio de Souza Maia.

1 Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC - IFAM, e-mail: andre.vilhena@ifam.edu.br; 2 Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC, e-mail: rosana@unisc.br; 3 Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC, e-mail: adilson@unisc.br; 4 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas - IFAM, e-mail: nidianne.nascimento@ifam.edu.br; 5 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas - IFAM, e-mail: anacelia.santostst@gmail.com; 6 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas - IFAM, e-mail: valcleciomaia93@gmail.com.

Palavras-chave: Germplasm bank; Environmental education; Cupuaçu.

Abstract

The fruits of the cupuaçu, endemic to the Amazon, are used to make a variety of products, including sweets, drinks, ice cream and jams. The cupuaçu is a tree native to the rainforest that, in its natural state, can grow up to 20 meters in height and have a trunk diameter of 45 centimeters. The size of cultivated trees ranges from 6 to 8 m, and the crown diameter can reach 7 m. To create productive cultivars resistant to witches' broom, the cupuaçu breeding program directly supports the use of the plant's active germplasm bank (AGB). The methodology consisted of phases, which range from seed collection, storage, construction of the dry chamber, planting of seedlings, drying of seeds and analysis under the microscope. As a result, the practice of environmental education was applied in the 6th grade class of the Milburgês Bezerra de Araújo State School in Manaus/AM, in order to arouse the interest of students about the importance of cupuaçu, the need to know the germplasm bank, on the seed cultivation and storage process, in addition to being able to recognize the importance of reforestation and the need to recover degraded areas.

Keywords: Germplasm bank; Environmental education; Cupuaçu.

Introdução

A região amazônica vem sofrendo intensa pressão de colonização, com constante desmatamento e exploração madeireira, particularmente no suposto centro de diversidade de cupuaçu [*Theobroma grandiflorum* (Willd. ex Spreng.) Schum.], levando a perdas irreversíveis de recursos genéticos (SERENO et al., 2006). Em 2021, A floresta amazônica viveu o seu pior ano em uma década, de janeiro a dezembro, foram destruídos 10.362 km² de mata nativa, equivalendo a metade de Sergipe. Os dados são obtidos pelo Sistema de Alerta de Desmatamento (SAD) do Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (Imazon), que monitora a região por meio de imagens de satélites. Verificando as áreas desmatadas com o banco de dados do Cadastro Nacional de Florestas Públicas do Serviço Florestal Brasileiro (SFB), os pesquisadores observaram que 4.915 km² foram devastados dentro de territórios federais, correspondendo a 47% de todo o desmatamento registrado na Amazônia no ano passado. Apenas nessas áreas, a destruição aumentou 21% em comparação com 2020, sendo a pior em 10 anos. Com foco em áreas degradadas, pode-se adotar o banco de germoplasma, sendo estes locais que conservam materiais genéticos de uma ou mais espécies de animais, vegetais e microrganismos. Os materiais armazenados são considerados recursos genéticos, assim como existem recursos energéticos (como o petróleo, o sol, o vento), recursos hídricos (rios e lagos) e recursos minerais (calcário, ferro, cobre), as plantas representam os nossos recursos genéticos vegetais. O uso do banco ativo de germoplasma (BAG) de cupuaçuzeiro está atrelado diretamente ao programa de melhoramento de cupuaçuzeiro, com objetivo de desenvolver cultivares produtivas e resistentes a doença vassoura-de-bruxa (PÁDUA; ALBUQUERQUE; MELLO, 2020). O cupuaçu possui BAG em quase todos os Estados da região Norte do Brasil, que representam uma amostra da diversidade natural encontrada nesses estados. O processo de caracterização e análise da diversidade genética do germoplasma de uma espécie é de fundamental importância em um programa de melhoramento. A partir das avaliações realizadas, é possível identificar genótipos portadores de alelos de interesse agrônomo, formar grupos heteróticos direcionando cruzamentos para capitalizar a heterose e orientar coletas ou recoletas de germoplasma, priorizando diferentes origens geográficas, visando ampliar a representatividade do BAG (SANTOS et al., 2022). O cupuaçu é uma espécie arbórea nativa da Amazônia, cujos frutos são utilizados na produção de doces, sucos, sorvetes, geleias, entre outros produtos. O cupuaçu é uma árvore da floresta tropical úmida que, na natureza, pode atingir 20 m de altura e 45 cm de diâmetro do caule à altura do peito. Nas árvores cultivadas, o tamanho varia de 6 a 8 m, podendo a copa atingir 7 m de diâmetro. Cupuaçu é uma palavra composta da língua Tupi, onde cupu significa "semelhante ao cacau" e uaçu significa "grande" (PEREIRA; ABREU; RODRIGUES, 2018; ALVES et al., 2021). Trata-se de uma espécie pré-colombiana que, possivelmente, foi disseminada de seu centro de origem para todos os estados da Região Norte, inicialmente, pela intensa movimentação das nações indígenas no interior da Amazônia, e posteriormente, pelo estabelecimento de pequenos cultivos em



toda a região. Atualmente pode ser encontrada em vários estados brasileiros e também no exterior. Apesar de a Região Amazônica se constituir na única reserva de variabilidade genética do cupuaçuzeiro, as populações naturais encontram-se ameaçadas pela ação antrópica. Acredita-se que mais de 30.000 ha da cultura já tenham sido implantados na região, principalmente no Estado do Pará, maior produtor nacional, com mais de 14.000 ha (ALVES et al., 2003). Dentre as frutas amazônicas, o cupuaçu se destaca em seu potencial econômico. A polpa da fruta possui coloração branco-amarelada e sabor forte, sendo muito apreciada pelas comunidades locais, e também no mercado internacional, como ingrediente em sucos de frutas. Além disso, a polpa é composta por grande proporção de amido, polissacarídeos de pectina e fibra alimentar, principalmente na forma de fibras insolúveis, o que melhora os parâmetros de textura dos produtos lácteos. As sementes também podem ser processadas para produzir um produto semelhante ao chocolate chamado “cupulate”. As sementes de cupuaçu são recalcitrantes, e acredita-se que a dispersão de sementes seja realizada por grandes roedores (como cutias) e primatas, incluindo humanos (ALVES et al., 2007; PEREIRA; ABREU; RODRIGUES, 2018). De acordo com Alves et al. (2013), por funcionar bem em sistemas agroflorestais e ser consorciado com outras culturas, o cupuaçu é considerado uma das culturas mais lucrativas da Amazônia. O cupuaçu ganha importância econômica em todos os estados da federação e começa a despertar interesse internacional no mercado de frutas tropicais exóticas. O objetivo foi estudar as sementes de cupuaçu para construir um banco de germoplasma, através da coleta, identificação, armazenamento e análise, com finalidade de apresentá-los à turma do 6º ano na Escola Estadual Milburgês Bezerra de Araújo de Manaus/AM. O cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) é um dos mais importantes frutos amazônicos, sendo originário do Sudeste e Sul da Amazônia, apreciado por sua polpa ácida e aroma intenso. O cupuaçu é um produto de enorme potencialidade mercadológica. Pode-se inferir que, a médio prazo, é o que se demonstra como mais promissor para a comercialização da polpa e de outros produtos (SOUZA; ANDRADE, 2021). O sabor doce-ácido característico da polpa tem se mostrado amplamente aceitável no Brasil e internacionalmente e o cupuaçu está se expandindo rapidamente no mercado mundial de sabores de frutas exóticas para uso em sucos e sorvetes (DARDENGO et al., 2021). O cupuaçu possui um dos melhores benefícios de aplicação industrial devido a sua variedade de aplicações alimentícias e alto teor nutricional. O fruto é composto por casca (43%), polpa (38%), semente (17%) e placenta (2%). As principais características químicas da polpa, que é o componente da fruta com maior valor econômico são umidade (81,3% 89,0%), sólidos solúveis totais (9,00 10,8 Brix), açúcares redutores (2,8 3,1 g/100 g), pH (3,2 3,6) e acidez (1,50% 2,00%). O teor de proteínas e lipídios é baixo na polpa com 0,48% e 1,92%, respectivamente. O cupuaçu é uma fonte potencial de fibra alimentar (0,50% 2,12%), principalmente fibra solúvel, e contém uma quantidade considerável de amido, bem como polissacarídeos de pectina (PEREIRA; ABREU; RODRIGUES, 2018; SALGADO et al., 2011).

Materiais e Métodos

Esta pesquisa foi realizada inicialmente nos laboratórios de microscopia e Biologia de Produtos Naturais do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Amazonas-IFAM e posteriormente na Central Analítica da Universidade de Santa Cruz do Sul, no Programa Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais – PPGTA - Doutorado, e na Escola Estadual Milburgês Bezerra de Araújo em Manaus/AM., onde foi implantado o viveiro florestal experimental. Nesta pesquisa foram utilizadas sementes de Cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) oriundas de cinco matrizes de locais distintos, com a finalidade de criar um banco de germoplasma vegetal (banco de sementes) para estudo e produção de 100 mudas para plantio na escola estadual envolvida nesta pesquisa.

1.1 - 1ª Etapa: LOCALIZAÇÃO E COLETA DAS MATRIZES.

Os frutos foram coletados em cinco pontos distintos do Estado do Amazonas (Figuras 1, 2, 3, 4 e 5), nos municípios: Careiro Castanho (1ª e 2ª coletas), Manaquiri (3ª coleta), Rio Preto da Eva (4ª coleta) e Manaus (5ª coleta), conforme descrito na Tabela 1 com coordenada geográfica retirada do site *Google Earth*:

Tabela 1 – Localização das matrizes

Matriz	Local	Coord. Geográfica
M1	BR 319, Km 89 - Estrada do Município Careiro Castanho	8°03'26"S 63°32'21"W
M2	BR 319, Km 94 - Estrada do Município Careiro Castanho	8°03'25"S 63°32'18"W
M3	Km 18 - Estrada do Município Manaquiri	3°36'31"S 60°23'40"W
M4	AM-010, Km 23 - Estrada do Rio Preto da Eva	2°55'40"S 58°57'26"W
M5	Av. Torquato Tapajós - Manaus.	2°58'24"S 60°00'59"W

Fonte: Próprio autor, 2024.

Figura 1 - Matriz 1 (M1): BR 319, Km 89; Matriz 2(M2) Km 94 - Município de Careiro Castanho.



Fonte: Próprio autor, 2024.

Figura 3 - Matriz 4: AM-010, Km 23



Fonte: Próprio autor, 2024.

Figura 2 - Matriz 3 (M3): Estrada do Manaquiri, Km 18.



Fonte: Próprio autor, 2024.

Figura 4 - Matriz 5: Av. Torquato Tapajós - Manaus.



Fonte: Próprio autor, 2024.

Figura 5 - Local de coleta dos frutos.



Fonte: Próprio autor, 2024.

1.2 - 2ª Etapa: EXTRAÇÃO, BENEFICIAMENTO, ANÁLISE E ARMAZENAMENTO DE SEMENTES.

A retirada da semente do fruto ocorreu com a quebra da casca do cupuaçu e realizado a remoção manual das sementes, transferindo-as para um recipiente e realizado o despulpamento com auxílio de tesoura (Figuras 6 A-B). Após a retirada da polpa, as sementes foram lavadas e secas com auxílio de uma toalha, em seguida armazenada em câmara fria em temperatura média de 5°C (Figura 6 C).

Figura 6 (A) - Quebra da casca da fruta; (B) - Remoção das sementes; (C) - Sementes lavadas e secas indo para câmara fria.



Fonte: Próprio autor, 2024.

O número de sementes por cada matriz foi respectivamente: M1=35, M2=29, M3=31, M4=38, M5=32. Sendo utilizado uma tesoura para retirada da polpa das sementes, totalizando 165 sementes para o estudo, conforme Figura 7 abaixo.

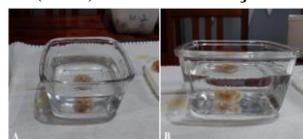
Figura 7 - Visão geral das sementes.



Fonte: Próprio autor, 2024.

Logo após a extração e separação das sementes da polpa, foi utilizado o método de flutuação das sementes (Figuras 8 A-B), conforme Neves et al. (2019) este método consiste na imersão das sementes em um balde com água observando as sementes que flutuam e as que afundam, classificando-as em inviáveis e viáveis, respectivamente.

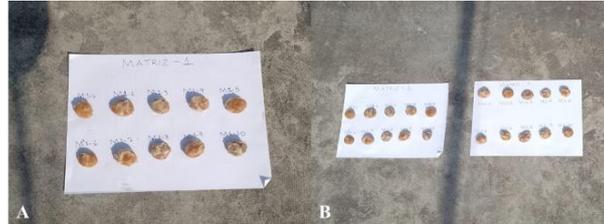
Figuras 8 (A-B) - Demonstração do método



Fonte: Próprio autor, 2024.

Após feito o descarte das sementes inviáveis, as sementes viáveis foram levadas para a (1ª) Primeira pesagem de sementes contendo resíduos de poupa de cupuaçu, com auxílio de uma balança analítica no Laboratório de Biologia de Produtos Naturais do IFAM. Depois da primeira pesagem concluída, as sementes foram levadas para secagem *in natura*, ao ar livre, por 2h durante 3 dias em temperatura média de 40°C. (Figuras 9 A-B). Após o término da secagem natural, as sementes passaram por uma (2ª) Segunda pesagem, chamada pesagem de sementes limpas e perfeitas, com auxílio de uma balança analítica (Figuras 10 A-B). Em seguida, foi realizado também o processo de medição das sementes, com auxílio de um paquímetro onde foram coletados os dados da altura, largura e diâmetro de cada semente (Figuras 10 C-D).

Figuras 9 (A-B) - Secagem *in natura*.



Fonte: Próprio autor, 2024.

Figuras 10 (A-B) - Pesagem das sementes; (C-D) - Medição das sementes



Fonte: Próprio autor, 2024.

Após feito medição e pesagem, foram escolhidas 3 (três) sementes de cada matriz para serem cortadas com auxílio de uma lâmina de bisturi (Figuras 11 A-B), em seguida analisadas no microscópio, o tegumento interno e externo, a radícula e região embrionária das sementes para classificação fisiológica e morfológica (Figuras 11 C-D).

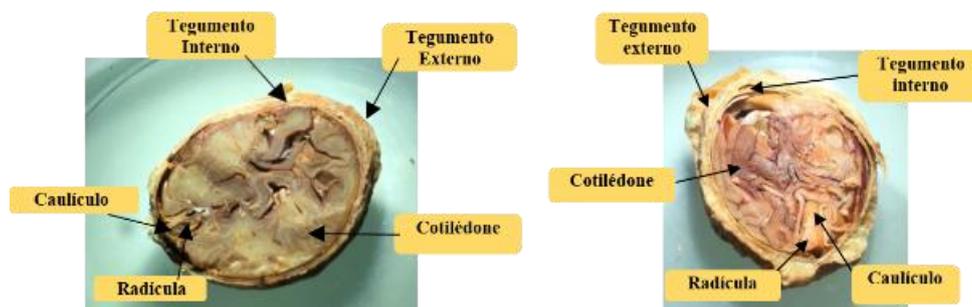
Figuras 11 (A-B) - Pesagem das sementes; (C-D) - Medição das sementes



Fonte: Próprio autor, 2024.

Na análise microscópica foi possível observar os elementos do fruto: tegumento interno, tegumento externo, caulículo, cotilédone e radícula (Figuras 12 A-B).

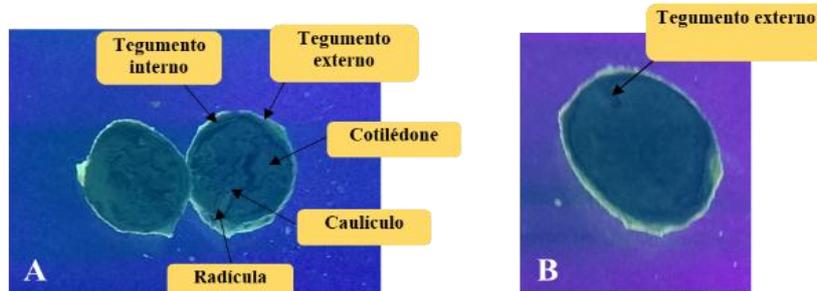
Figuras 12 (A-B) – Análise microscópica das sementes.



Fonte: Próprio autor, 2024.

Após a análise microscópica, foi realizada a análise biomolecular das sementes, com auxílio de um equipamento transiluminador UV (Figuras 13 A-B).

Figuras 13 (A-B) – Análise no transiluminador UV.



Fonte: Próprio autor, 2024.

Em seguida deu-se o armazenamento das sementes, com função de preservar as qualidades iniciais da semente, evitando sua deterioração e ataque de fungos. Com base nisso, utilizou-se um método de baixo custo, simples e eficaz, a câmara seca, sendo construída com reaproveitamento de resíduos de madeira, vidro, e EPE (espuma de polietileno expandido) coletados gratuitamente no descarte de indústrias do polo industrial da Zona Franca de Manaus e feita a identificação pelos alunos envolvidos na pesquisa. Esta câmara seca, tem como função além de preservar as qualidades iniciais das sementes evitando sua deterioração, também viabilizar a construção de um Banco de Germoplasma Vegetal (banco de sementes) que irá proporcionar o ensino, a pesquisa e a extensão para inúmeros alunos carentes de comunidades ribeirinhas, rurais e urbanas da região metropolitana da cidade de Manaus na Amazônia. (Figuras 14 A-B).

Figuras 14 (A-B) - Câmara seca.



Fonte: Próprio autor, 2024.

1.3 - 3ª Etapa: PLANTIO E GERMINAÇÃO DE SEMENTES.

Para o plantio das sementes, foi utilizada terra preta adubada como substrato na produção das mudas de cupuaçu, com auxílio de uma pá de jardineiro a terra preta foi colocada em copos descartáveis para produção de 100 mudas, utilizou-se a técnica da falange, que ocorre afundando o polegar na terra de forma a ter uma profundidade adequada para semente germinar, se a semente for plantada com uma profundidade muito grande ela irá apodrecer, dando início ao processo de germinação, sendo irrigadas uma vez a cada três dias conforme a variação do clima da região. (Figuras 15 A-B).

Figuras 15 (A-B) - Plantio das sementes



Fonte: Próprio autor, 2024.

1.4 - 4ª Etapa: IMPLANTAÇÃO DO VIVEIRO FLORESTAL EXPERIMENTAL NA ESCOLA.

Nesta etapa foi feita a distribuição e o plantio das mudas de Cupuaçu na escola que nos recebeu e abraçou o projeto de conscientização sobre o banco de germoplasma vegetal e a importância da prática do plantio de mudas, Escola Estadual Milburges Bezerra de Araújo, localizada na rua Couto do Valê, bairro Raiz, em Manaus – AM, aplicado na turma do 6º ano de ensino fundamental, turno matutino (Figuras 16 A-B).

Figuras 16 A-B - Plantio de mudas e conscientização ambiental.



Fonte: Próprio autor, 2024.

1.5 - 5ª Etapa: EXTRAÇÃO DE LIPÍDIOS, ANÁLISE DO PERFIL LIPÍDICO DAS SEMENTES.

A extração de lipídios das sementes de cupuaçu foi realizada pelo método Bligh Dyer (BLIGH, E. G.; DYER, W. J. 1959), que consiste na extração com solvente metanol e clorofórmio por 4 horas de armazenamento a aproximadamente 4°C, seguido de ultrassonicação. A extração de lipídios foi realizada em triplicatas por meio de uma adaptação do método de Bligh e Dyer (1959). Antes de começar o procedimento com as amostras, foi necessário colocar os balões de fundo redondo em uma estufa (Figura 17 A-B) a 110 °C por uma hora, depois levá-los ao dessecador por mais uma hora (condicionando-o para o recebimento da fase orgânica da amostra) e então pesá-los, para obter o peso do balão vazio. Depois foi realizada adição de 6ml de solução metanólica de NaOH nos balões, e os mesmos foram postos no sistema, dentro da manta e acoplado nos condensadores.

Figura 17 A-B: A - Balões de fundo redondo colocados em uma estufa a 110 °C; B - Falcons com amostra submetidos ao banho ultrassônico com gelo.



Fonte: Próprio autor, 2024.

Após o último processo de centrifugação, foi possível verificar que as amostras possuíam duas fases, sendo a fase inferior (fase orgânica) a que foi transferida para os balões de fundo redondo previamente pesados (Figura 18). Os balões de fundo redondo foram colocados em estufa a 40 °C, para que houvesse a evaporação do solvente. Uma vez que a evaporação do solvente foi finalizada, pesou-se os balões de fundo redondo, obtendo os pesos finais de cada frasco e posteriormente armazenando-os em dessecador até a realização da próxima etapa.

Figura 18: Balões de fundo redondo contendo a fase orgânica.



Fonte: Próprio autor, 2024.

1.6 - 6ª Etapa: DERIVATIZAÇÃO DOS LIPÍDIOS DAS SEMENTES DE CUPUAÇU.

O método de derivatização foi realizado para transformar os lipídios resultantes em um derivado com características adequadas para serem analisados por cromatografia gasosa (Figura 19 A). Primeiramente foi montado o sistema de derivatização (Figura 19 B), utilizando os condensadores, as mantas, as mangueiras e o banho ultra termostatizado, comportando até quatro amostras por vez.

Figura 19 A-B: A - Análise das amostras por cromatografia gasosa; B - Sistema de derivatização.



Fonte: Próprio autor, 2024.



Iniciando o processo foram adicionados, com o uso de pipetas volumétricas, 6ml da solução metanólica de NaOH nos balões de fundo redondo provenientes da extração de lipídios, acoplando-os em seguida no sistema montado, submetendo as amostras a aquecimento e refluxo durante 20 minutos. Após essa primeira etapa foram adicionados, através do condensador, 7 ml de BF3-metanol 14%, sendo necessário refluxar por mais 4 minutos, adicionando em seguida, através do condensador, 5 ml de heptano e esperando refluxar por mais 2 minutos. Terminada a parte utilizando o sistema de derivatização esperou-se a amostra esfriar a temperatura ambiente, para então acrescentar cerca de 2 ml da solução saturada de NaCl e agitar delicadamente. O conteúdo do balão de fundo redondo foi transferido para um tubo de ensaio grande, onde foi possível perceber a formação de duas fases, a fase orgânica (superior) e a fase aquosa (inferior) (Figura 20 A). Por fim, utilizando pipetas de vidro, transferiu-se a fase orgânica para tubos de ensaio menores, adicionando uma ponta de espátula de sulfato de sódio anidro e esperando cerca de 2 minutos para transferir o extrato para pequenos frascos âmbar (Figura 20 B) que foram devidamente armazenados até o momento da análise cromatográfica.

Figura 20 A-B: A -Tubos de ensaio demonstrando a formação de duas fases nas amostras; B - Frascos âmbar contendo os extratos que foram armazenados e posteriormente submetidos à análise cromatográfica.



Fonte: Próprio autor, 2024.

2.7 - 7ª Etapa: ANÁLISE EXPLORATÓRIA POR ESPECTROMETRIA NO INFRAVERMELHO.

Cinquenta (50) Amostras ex situ de sementes de Cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*), retiradas do bioma Amazônia, do Banco de Germoplasma Vegetal do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, foram trituradas e analisadas, totalizando 150 análises feitas em triplicata. Estas análises ocorreram de forma exploratória por espectrometria no infravermelho (Figura 21 A). As análises foram realizadas com todas as amostras fragmentadas manualmente com uso de bisturi. As sementes de Cupuaçu fragmentadas, foram colocadas no leitor de infravermelho até atingirem o ponto ideal de leitura pelo software (Figura 21 B-C).

Figura 21 A-B-C. A - Amostras analisadas de forma exploratória por espectrometria no infravermelho; B-C - Amostras analisadas no leitor de infravermelho até atingirem o ponto ideal de leitura pelo software.



Fonte: Próprio autor, 2024.

Resultados e Discussões

Ao analisarmos os resultados obtidos a partir da análise realizadas nas sementes do cupuaçu, observamos a importância das pesagens inicial e final de cada matriz detalhada nas tabelas 2 e 3 a seguir:

Tabela 2 - Pesagem inicial.

Matriz	Peso Inicial							Média	Desvio Padrão			
M 1	5	9	8	8	8	7	5	7	7	7,1	1,287	
M 2	8	5	7	7	5	5	5	6	5	2	5,5	1,650
M 3	6	7	7	7	7	5	5	7	7	7	6,5	0,850
M 4	6	7	7	7	6	6	8	7	7	7	6,8	0,632
M 5	6	7	6	8	7	7	6	6	5	5	6,3	0,949

Fonte: Próprio autor, 2024.

Tabela 3 - Pesagem final.

Matriz	Peso Final							Média	Desvio Padrão			
M 1	2	3	3	2	3	2	2	2	3	2	2,4	0,516
M 2	3	2	3	3	2	2	2	2	0	2	2,1	0,876
M 3	2	2	2	3	2	2	2	3	2	3	2,3	0,483
M 4	2	2	3	3	3	2	2	3	2	3	2,5	0,527
M 5	2	2	1	2	3	3	2	2	2	2	2,1	0,568

Fonte: Próprio autor, 2024

Na Biometria das sementes foi realizado o cálculo da média da altura, largura e diâmetro das 5 (cinco) matrizes. M1= altura: 3,0 cm, largura: 2,8 cm e diâmetro: 5 cm; M2= altura: 3,0 cm , largura: 2,9 cm e diâmetro: 5 cm; M3= altura: 2,8 cm, largura: 2 cm e diâmetro: 4,5 cm; M4= altura: 3 cm, largura: 2,2 cm e diâmetro: 4,5 cm; M5= altura: 2,6 cm, largura: 2 cm e diâmetro: 4 cm (Tabelas 4, 5 e 6).



Tabela 4 - Cálculo - Altura das Sementes.

Matriz	Altura das Sementes										Média	Desvio Padrão
M 1	3,5	3,0	2,4	3,5	2,5	3,0	3,4	3,0	3,0	2,4	3,0	0,424
M 2	3,5	3,0	3,0	3,4	3,0	3,0	2,9	2,5	3,1	3,0	3,0	0,272
M 3	3,0	2,9	3,0	3,0	2,9	2,8	2,8	2,8	2,3	3,0	2,9	0,212
M 4	2,5	2,5	3,0	3,0	3,0	2,9	3,0	3,1	2,6	2,6	2,95	0,239
M 5	2,0	2,6	2,3	2,6	3,9	2,9	2,5	2,2	2,3	2,0	2,4	0,558

Fonte: Próprio autor, 2024.

Tabela 5 - Cálculo - Largura das Sementes.

Matriz	Largura das Sementes										Média	Desvio Padrão
M 1	2,8	2,6	2,0	3,0	2,4	2,8	2,7	2,5	2,0	3,0	2,65	0,361
M 2	2,9	2,9	2,8	2,5	2	2,9	2,6	2,0	2,6	2,2	2,6	0,360
M 3	2,5	2,3	2,2	2,0	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,1	2,05	0,207
M 4	2,2	2,2	2,3	2,3	2,2	2,0	2,0	2,2	2,0	2,2	2,2	0,117
M 5	2,2	2,2	1,9	2,3	2,3	2,3	2,0	2,0	1,7	1,5	2,1	0,276

Fonte: Próprio autor, 2024.

Tabela 6 - Cálculo - Diâmetro das Sementes.

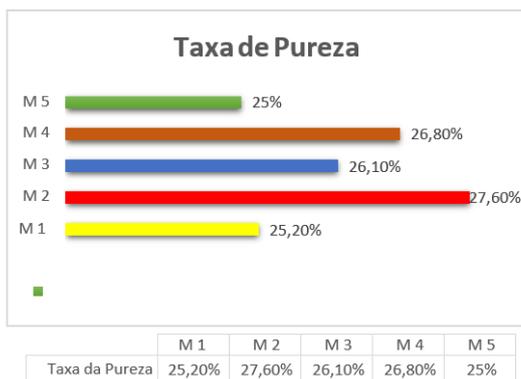
Matriz	Diâmetro das Sementes										Média	Desvio Padrão
M 1	5,0	6,0	4,0	5,0	4,2	5,0	5,0	4,8	4,0	1,8	4,9	1,116
M 2	4,9	5,0	5,0	5,0	5,3	5,0	4,7	4,7	5,3	4,5	5	0,255
M 3	5,0	4,9	4,9	4,5	5,0	4,4	5,0	4,5	4,5	4,9	4,9	0,250
M 4	4,6	4,5	5,0	4,4	4,5	4,5	4,0	5,0	4,7	4,9	4,55	0,307
M 5	4,0	4,0	4,3	5,0	5,0	4,9	4,6	4,5	4,0	4,4	4,5	0,403

Fonte: Próprio autor, 2024

Para calcular a perda de umidade das sementes foi utilizada a regra de três: Peso atual dividido pelo peso inicial multiplicado por 100 chegando ao valor “x” quantidade de umidade perdida em cada semente. Resultados de perda de umidade por matriz: M1= 66,19%, M2 = 61,87%, M3= 64,61%, M4= 63,20% e M5= 66,66%. Taxa de pureza: com os dados fornecidos com a pesagem das sementes foi feito realizado a aplicação da fórmula $Pureza = \frac{\text{semente secas}}{\text{semente úmidas} + \text{impurezas}} * 100$. O resultado obtido foi a média de pureza de cada matriz, M1=25,2% de pureza, M2=27,6% de pureza, M3=26,1% de pureza, M4=26,8% de pureza e M5=25% de pureza (Gráfico 1).

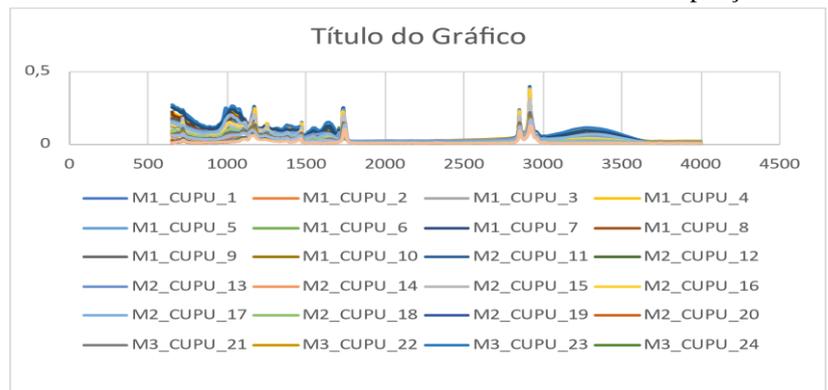
Fórmula: $Pureza = \frac{\text{Peso de sementes limpas} \times 100}{\text{Peso de sementes} + \text{impurezas}}$

Gráfico 1 - Taxa de pureza.



Fonte: Próprio autor, 2024.

Gráfico 2 - Análise no infravermelho das sementes de Cupuaçu.



Fonte: Próprio autor, 2024.

Ao analisarmos a taxa de pureza das sementes e a análise do infravermelho do cupuaçu, observamos que é um fator primordial para reconhecer o potencial de aproveitamento, pois, sementes com baixa taxa de pureza são inviáveis para o plantio e germinação, também são sementes com baixo potencial de aproveitamento, futuramente serão árvores frutíferas com baixa produtividade, estas informações também são importantes para a viabilização da organização de viveiros experimentais em escolas da região amazônica. Desse modo a implantação de viveiros florestais experimentais e a construção do banco de germoplasma vegetal, são de suma importância para promover a conservação e a preservação dos genes da espécie Cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) no qual se poderá acessar esse banco para fins de estudo, análise e avaliação do potencial biotecnológico desta espécie.



Referências Bibliográficas

- ALVES, R. M. *et al.* Cupuaçu tree genotype selection for an agroforestry system environment in the Amazon. *Genetics Pesq Agropec Bras*, v. 56, jan./dec., 2021, p. 1-10.
- ALVES, R. M. *et al.* High levels of genetic divergence and inbreeding in populations of cupuassu (*Theobroma grandiflorum*). *Tree Genetics & Genomes*, v. 3, 2007, p. 289-298.
- ALVES, R. M. *et al.* Seleção de descritores botânico-agronômicos para caracterização de germoplasma de cupuaçuzeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 1 jul. 2003. v. 38, n. 7, p. 807-818.
- ALVES, R. M. *et al.* Diversidade genética em coleções amazônicas de germoplasma de cupuaçuzeiro [*Theobroma grandiflorum* (Willd. ex Spreng.) Schum.]. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 2013. v. 35, n. 3, p. 818-828.
- BLIGH, E. G.; DYER, W. J. A rapid method of total lipid extraction and purification. *Canadian journal of biochemistry and physiology*, v. 37, n. 8, 1959, p. 911-917, 1959. ISSN 0576-5544.
- SERENO, M. L. *et al.* Genetic diversity and natural population structure of cacao (*Theobroma cacao* L.) from the Brazilian Amazon evaluated by microsatellite markers. *Conserv Genet.*, v. 6, 2006, p. 13-24.
- PÁDUA, J. G.; ALBUQUERQUE, M. S. M., MELO, S. C. M. Bancos e coleções de germoplasma da Embrapa: conservação e uso. Brasília, DF: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2020.
- DARDENGO, J. F. E. *et al.* Structure and genetic diversity of *Theobroma speciosum* (Malvaceae) and implications for Brazilian Amazon conservation. *Rodriguésia*, Rio de Janeiro, v. 72, e02022018, 2021.
- PEREIRA, A. L. F.; ABREU, V. K. G.; RODRIGUES, S. Cupuassu: *Theobroma grandiflorum*. *Exotic Fruits Reference Guide*, 1 jan. 2018. p. 159-162.
- SOUZA, A. A.; ANDRADE, J. S. Uso da semente do cupuaçu no desenvolvimento de um doce tipo paçoca. Programa Institucional de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação do INPA, 2021.
- SALGADO, J. M. *et al.* Cupuassu (*Theobroma grandiflorum*) peel as potential source of dietary fiber and phytochemicals in whole-bread preparations. *Plant Foods for Human Nutrition*, 24 nov. 2011. v. 66, n. 4, p. 384-390.
- SANTOS, T. G. Dos *et al.* Characterization of the genetic structure of a cupuassu tree population collected in primary forest. *Rev Bras Cienc Agrar*, 2022. v. 17, n. 4, p. e1592.



EDUCAÇÃO AMBIENTAL ATRAVÉS DA IMPLANTAÇÃO DE VIVEIRO FLORESTAL EXPERIMENTAL E ANÁLISE DO POTENCIAL BIOTECNOLÓGICO DE SEMENTES DE AÇAÍ (*Euterpe oleracea*) DO BANCO DE GERMOPLASMA VEGETAL COLETADO NA AMAZÔNIA - BRASIL

1André Vilhena de Oliveira, 2Rosana de Cassia de Souza Schneider, 3Adilson Ben da Costa, 4Nidianne Nascimento Vilhena, 5José Maria Lopes da Silva, 6Vitória Nascimento Santos, 7Luiz Alberto Nascimento Vilhena

1 Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC - IFAM, e-mail: andre.vilhena@ifam.edu.br; 2 Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC, e-mail: rosana@unisc.br; 3 Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC, e-mail: adilson@unisc.br; 4 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas - IFAM, e-mail: nidianne.nascimento@ifam.edu.br; 5 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas - IFAM; 6 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas - IFAM; 7 Universidade do Estado do Amazonas - UEA.

Palavras-chave: Açaí (*euterpe oleracea*). Germplasm bank. Fruitful species.

Abstract

This research was developed from the Experimental Forest Nurseries Project of the Subsequent Technical Course in Environment - IFAM/CMC. The methodology, willing to present the morphological descriptors on the subject, intending to spread the importance of applying the techniques in seeds for the genetic improvement, storage and germination, analyzed the available literature in order to collect data and convergent analysis categories. In a practical way, the exploratory research was carried out in the Laboratory of Biology and Natural Products, of the referred institution, being possible the production of a germplasm bank in the dry chamber technique, containing the açaí seed (*euterpe oleracea*). Analyzes of açaí seeds in the laboratory added optical microscopy devices, as well as illumination by light transmission, using the transilluminator apparatus for the latter. Based on the measured data, the physical characteristics and genetic variability were estimated. These results suggest that accessions to germplasm banks can be useful as genitors in knowledge transfer, a starting point for a more detailed evaluation, aiming at selection in seed technology.

Keywords: Açaí (*euterpe oleracea*). Germplasm bank. Fruitful species.

Introdução

Por agruparem constituições genéticas de diferentes origens, os bancos de germoplasma representam excelentes fontes para programas de melhoramento genético. Os Bancos Ativos de Germoplasma (BAGs) realizam a conservação de recursos genéticos para uso imediato ou com potencial de uso futuro. Os BAGs têm por finalidade promover a catalogação do máximo de variabilidade genética das espécies. Em decorrência disto, tem-se a representação dos genes, transportando a exata identidade de cada espécie, ou seja, carregando a herança de informações ao longo dos anos. Dessa forma, a conservação dos bancos de germoplasma devem ser pensados como base primordial para a manutenção da segurança alimentar no mundo.

Nesta pesquisa, para a construção do banco de germoplasma analisou-se a espécie frutífera do açazeiro, da variedade precatória, comumente denominado de açaí solteiro, açaí precatória, açaí-do-amazonas, açaí-da-mata, açaí-da-terra. Dados da Embrapa (2005) afirmam que o açazeiro é uma palmeira tropical, perene, nativa do Brasil encontrado nas regiões Norte e Sudeste do país. Pertencente à família *Arecaceae* (*Palmae*), é uma espécie de clima tropical quente e úmido (temperatura média anual acima de 26°C, umidade relativa do ar entre 71% e 91%, e precipitação acima de 1.600 mm por ano). As técnicas envolvidas nas análises das sementes em laboratório consistiram na microscopia óptica, onde as amostras foram submetidas a um corte axial, processo que permite obter uma imagem nítida de um só plano, e a técnica de iluminação por transmissão de luz, utilizando o aparelho *transilluminator*. Os procedimentos de análise morfológica foram realizados no Laboratório de Biologia de Produtos Naturais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas -IFAM, Campus Manaus Centro - CMC. Este laboratório é uma referência para a comunidade acadêmica da região norte, mais precisamente para a cidade de Manaus e municípios próximos.

Dessa forma, a pesquisa apresenta informações técnicas, de caráter qualiquantitativo, sobre as características do açazeiro. A montagem do banco de germoplasma na técnica da câmara seca, método de conservação *ex situ* da espécie de açaí (*euterpe oleracea*), se deu por meio dos procedimentos, análises e métodos explorados à luz da ciência. O açazeiro (*Euterpe oleracea*) é uma palmeira tipicamente tropical, originária da região amazônica. Destaca-se entre os diversos recursos biológicos vegetais, devido à abundância de seus frutos e, conseqüentemente, à produção do vinho de açaí, bebida amazônica tradicional consumida diariamente pela população regional (NOGUEIRA, 1998). Nos estudos levantados inicialmente, destacam-se informações colhidas por Oueiroz & Melem Júnior (2000), observando que o açazeiro pode ser apontado como uma das palmeiras mais importantes, do ponto de vista cultural, econômico e social do estuário, sendo encontrado ao longo dos rios, igarapés, baixadas e áreas úmidas em geral.



De acordo com Oliveira & Muller (1998), o açazeiro pode ser utilizado na alimentação, produção de celulose, fabricação de casas, ração animal, arborização, medicina caseira e corante natural. Porém, seu potencial econômico está nos frutos (explorado desde a época pré-colombiana) e no palmito, consumido a partir da década de 70, como substituto do palmito. Ao estudarmos a estrutura da semente encontramos respostas nos escritos de Oliveira et al. (2000) destacando que a estrutura usada como semente corresponde ao endocarpo, que contém em seu interior uma semente, com eixo embrionário diminuto e abundante, o tecido endospermático. O endocarpo é aproximadamente esférico, com comprimento e diâmetro médio de 1,23 cm e 1,45 cm, respectivamente, e representa 73,46% do peso do fruto. Segundo o mesmo autor, sementes de açaí maduro apresentam germinação superior a 90%, quando semeadas imediatamente após a remoção da polpa (MOREIRA, VILLACHICA et al. e CARVALHO et al. citados por OLIVEIRA et al. 2000).

O processo germinativo é relativamente rápido, porém desuniforme, iniciando-se a emergência das plântulas 22 dias após a sementeira e estabilizando-se aos 48 dias, quando as sementes são semeadas logo após a remoção da polpa (OLIVEIRA et al. 2000). Wade et al (2020) registram que desde o começo da década de 1970 houve uma crescente preocupação sobre a necessidade de se preservar os recursos genéticos das plantas. Com isso, estratégias de conservação foram adotadas a fim de garantir a identificação, a caracterização e a preservação de células germinativas de algumas espécies. De forma prática, uma das alternativas refere-se à manutenção de espécies no seu local de origem (in situ), em reservas biológicas, parques nacionais, florestas nacionais, áreas de proteção ambiental e reservas extrativistas. Locais que mantenham parte significativa das características genéticas das espécies conservadas.

Wade et al (2020) apontam que em paralelo as instituições de pesquisa começaram a armazenar sementes das plantas nativas e cultivadas. De modo geral, esse armazenamento realiza-se em câmaras frias e ambientes controlados. No entanto, algumas plantas não possuem sementes que possam ser conservadas por longos períodos. Wade et al (2020) complementa que o avanço das pesquisas em cultura de tecidos e biologia molecular, as estratégias de conservação de germoplasma foram mudando. Foi possível, dessa forma, conservar as plantas in vitro, ou seja, em frascos com pedaços do vegetal em um ambiente controlado e nutritivo. Enfatiza os autores que além da cultura de tecidos, o estudo mais detalhado do DNA das espécies, pelo sequenciamento de genomas e estudo de genes específicos, representa estratégias valiosas para a conservação de informações sobre as espécies agrícolas. Portanto, esses estudos permitem caracterizar os recursos genéticos disponíveis dentro dos bancos de germoplasma e identificar, de forma mais prática, aqueles acessos com genes de interesse. Assim, plantas que contêm os genes para determinadas características, poderão ser utilizadas no melhoramento genético de cultivares futuros (WADE et al, 2020).

Metodologia

Esta pesquisa foi realizada inicialmente nos laboratórios de microscopia e Biologia de Produtos Naturais do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Amazonas-IFAM com a participação de alunos da Formação Técnica e a atividade de educação ambiental foi na Escola ADCAM – Associação para o Desenvolvimento Coesivo da Amazônia em Manaus/AM, onde foi implantado o viveiro florestal experimental. Nesta pesquisa foram utilizadas sementes de Açaí oriundas de cinco matrizes de locais distintos, com a finalidade de criar um banco de germoplasma vegetal (banco de sementes) para estudo e produção de 100 mudas para plantio na escola ADCAM.

1.1 Localização e Coleta das Matrizes

A coleta dos frutos de açaí (*Euterpe oleracea*), foram realizadas em Manaus. Como procedimento foram selecionadas cinco palmeiras em locais diferentes e geograficamente afastados. De cada uma dessas espécies foram obtidos frutos suficientes tanto para a sementeira, quanto para o banco de germoplasma. As matrizes foram caracterizadas pelos códigos M1, M2, M3 M4, M5. A coleta se deu pelo método manual. Para a coleta levou-se em consideração a seguinte ordem: M1, no bairro Colônia Antônio Aleixo, M2, no bairro Jorge Teixeira, M3 foi obtida na Comunidade Santa Inês, M4 foi retirada no Ramal do Pescador - Puraquequara e M5 foi coletada na Reserva Adolfo Ducke - Cidade de Deus . Os locais estão destacados na figura 1 abaixo.



Figura 1. Açazeiros Matrizes.

O método de coleta utilizado para a obtenção das sementes do açaí, foi o método de árvore em pé, que consiste em colher os frutos diretamente na copa das árvores. “A colheita é feita através da derrubada dos frutos ou sementes com tesouras ou ganchos apropriados, presos na extremidade de uma vara, geralmente de bambu” (CARVALHO & NAKAGAWA, 1980 apud OLIVEIRA, 2020). A amostragem foi realizada selecionando os frutos maduros de cada palmeira - matriz. De acordo com Azevedo (2004), os frutos maduros podem ser identificados pela observação dos frutos localizados abaixo da árvore.

1.2 Extração, Beneficiamento, Análise e Armazenamento de Sementes

Os frutos foram higienizados em água corrente seguida do teste de flutuabilidade realizado antes da maceração, logo após foram imersos em água à temperatura ambiente ($\pm 28^{\circ}\text{C}$) por 24 horas sem maceração, após submeteu-se as sementes novamente em imersão, agora em água morna a temperatura de (50°C) por 15 minutos seguida de maceração para extração da polpa. Observa-se na Figura 2 as etapas de flutuação, higienização das sementes e a maceração.



Figura 2. Flutuação, higienização e maceração das sementes.

Com as matrizes para a sementeira foram realizadas as identificações de cada matriz (sementes de cada açazeiro), separando-as em potes de plásticos e conservando-as a $21 \pm 3^{\circ}\text{C}$. As sementes higienizadas e identificadas, foram secas em estufa. Após essa etapa as sementes foram submetidas as análises biométricas de peso, comprimento, largura, diâmetro e teor de umidade. O Banco de Germoplasma Vegetal do IFAM, adotou a técnica da câmara seca. Todos os materiais utilizados para a construção da câmara seca foram de reciclagem. Após a montagem da câmara, organizou-se as sementes por matriz, conforme registrado na Figura 3.



Figura 3. Armazenamento das sementes, Câmara seca pronta.

As avaliações dos parâmetros adotados pela pesquisa para a semente do açaí foram realizadas duas vezes, sendo uma antes e outra depois da secagem na estufa. A temperatura de secagem na estufa foi de $70^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, por 4 horas.

A análise biométrica do comprimento das sementes, foi realizada utilizando-se um paquímetro com precisão, como também os parâmetros de largura e diâmetro que foram realizados com o auxílio do mesmo instrumento. Para o parâmetro diâmetro das sementes utilizou-se uma fita métrica. Os procedimentos foram realizados em todas as 50 sementes que compõem o Banco de Germoplasma Vegetal (câmara seca).

Quanto ao teor de umidade, analisou-se os dados da (primeira pesagem) após a maceração e extração da polpa do açaí, e os dados obtidos depois da secagem na estufa (segunda pesagem) para calcular o teor de umidade das sementes. As sementes foram colocadas em placa de Petri para secagem na estufa, conforme figura 4 abaixo.



Figura 4. Sementes organizadas em círculos na placa de Petri para a secagem na estufa.

Foi realizada a análise das sementes para visualização e identificação das estruturas fisiológicas que apresentam as sementes, como embrião, radícula, hilo, tegumento externo, tegumento interno, região embrionária. A análise em lupa binocular permite verificar a sanidade das sementes. As análises realizadas com o *transilluminator UV*, visou a observação interior das sementes, dentro de uma faixa baixa e alta de raios UV, onde foi possível visualizar as estruturas internas das sementes (Figura 5).

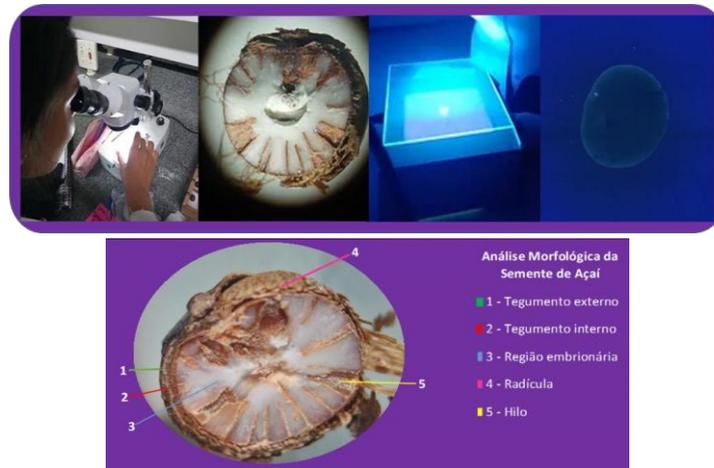


Figura 5. Análises com o microscópio e o transilluminator.

1.3 Plantio e Germinação de Sementes

A etapa de plantio e germinação das sementes, iniciou-se com a elaboração do adubo orgânico usado como substrato e o teste da falange, que consistiu respectivamente em terra preta oriunda de decomposição orgânica da floresta (folhas, galhos, insetos, frutos e animais decompostos), bem como a técnica da primeira falange do polegar enfiado no solo, seguido do plantio das sementes em copos plásticos. O substrato utilizado foi constituído de uma mistura de 2 partes de terra arenosa, 1 parte de terra argilosa e 1 parte de terra preta. A terra, utilizada como substrato, foi retirada do subsolo, a uma profundidade de aproximadamente 20 cm, diminuindo a ocorrência de organismos e de sementes de ervas daninhas, sendo peneirada em peneiras com malha de aproximadamente 1,5 cm. A semeadura e a elaboração do adubo estão dispostas na figura 6 abaixo.



Figura 6. Elaboração do substrato.

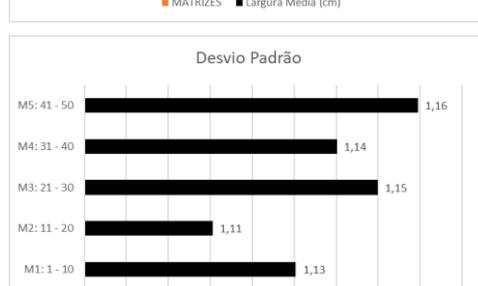
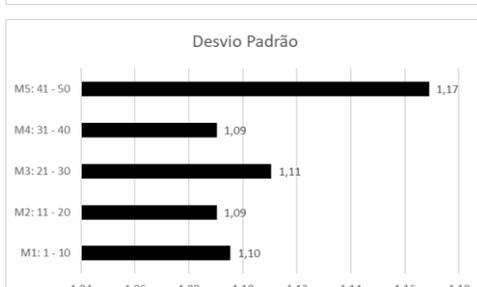
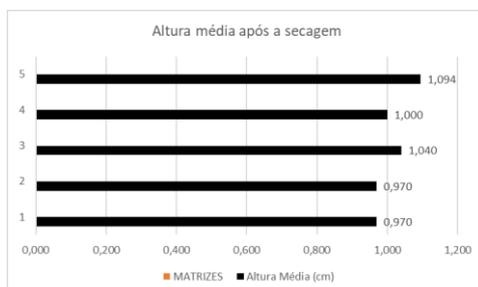
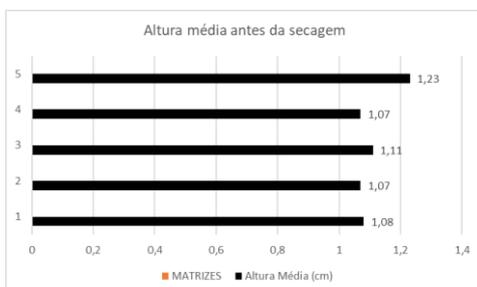
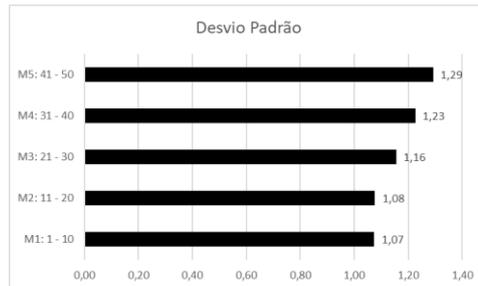
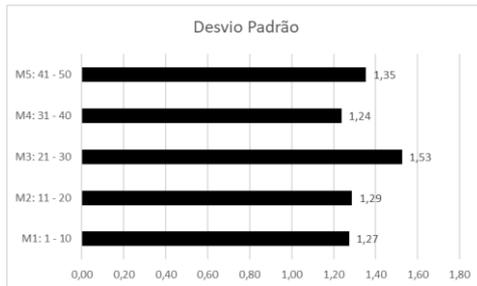
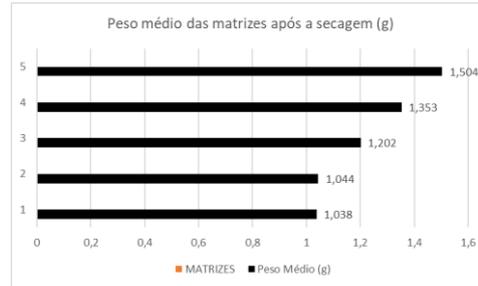
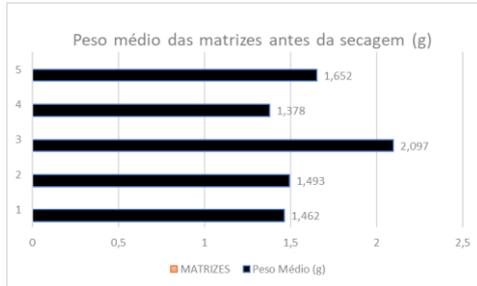
1.4 Implantação do Viveiro Florestal Experimental na Escola.

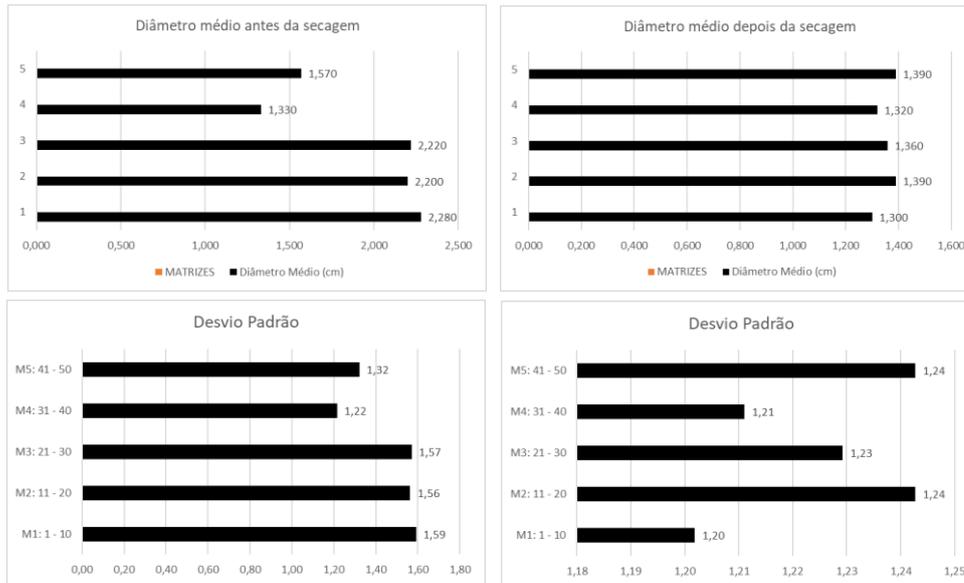
Para a construção do viveiro foi realizado o envolvimento de alunos do 6º ano do Ensino Fundamental. Foi realizada uma oficina pedagógica, com aplicação de questionário visando obter um levantamento do conhecimento dos mesmos quanto a pesquisa aplicada, evidenciando o objetivo da conservação das espécies, e principalmente as frutíferas, dando ênfase na criação dos Bancos de Germoplasma Vegetal, sua importância para a conservação genética e preservação das espécies ao longo dos tempos. Em seguida foi realizada a doação de 50 mudas de açai e o plantio das mesmas na Escola, através da Implantação de um Viveiro florestal experimental.

Resultados e Discussões

Na atividade os estudantes do Curso Técnico vivenciaram o reconhecimento de qualidade de sementes e a variabilidade que obtem-se entre uma mesma espécie que está em condições ambientais diferentes como mostram os gráficos da Figura 7, construídos em conjunto com os estudantes e discutidos com relação a espécie em estudo.

Além de reconhecer a variabilidade das sementes, parâmetros físicos e de germinação, os alunos aprenderam procedimentos que pode ser importante para a sua formação como técnicos. Neste sentido, destaca-se o uso de sementes de açai, as quais foram coletadas na região, promovendo a conservação desta espécie na floresta amazônica. Estes procedimentos poderiam ter sido realizados com sementes de várias espécies, inclusive de espécies exóticas, o que não traria aos alunos a oportunidade de reflexão sobre a sua floresta.





Quanto a implantação de viveiros florestais experimentais e a construção do banco de germoplasma vegetal observou-se que os alunos do ensino fundamental tiveram uma vivência que busca o conhecimento das frutíferas da Amazônia e da importância do cultivo de uma espécie nativa. Ademais, para os alunos de ensino fundamental, foi uma oportunidade de compreender melhor a importância de frutos da região amazônica.

Agradecimentos

Capes edital PDPG consolidação 3 e 4- 88881.710390/2022-1.

Referências

- AZEVEDO, D. M.; MENDES, A. M.; FIGUEIREDO, A. F. Característica da germinação e morfologia do endocarpo e plântula de taperebá (*Spondias mombin* L.) – Anacardiaceae. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 26, n. 3, p. 534-537, 2004.
- CARVALHO, N. M. & NAKAGAWA, J. 1980. Sementes: ciência, tecnologia e produção. Campinas., Fundação Cargill. 326p.
- CARVALHO, C.J.R. de; ROMBOLD, J.; NEPSTAD, D.C.; SÁ, T.D. de A. Relações hídricas do açazeiro em mata de várzea do estuário do Amazonas. *Revista Brasileira de Fisiologia*, v.20, p.213-218, 1998a.
- CARVALHO, J.E.U. de; NASCIMENTO, W.M.O. do; MÜLLER, C.H. Características físicas e de germinação de sementes de espécies frutíferas nativas da Amazônia. Belém: Embrapa-CPATU, 1998b. 18p. (Embrapa-CPATU. Boletim de Pesquisa, 203).
- MOREIRA, A.J. F. Efeitos da temperatura na conservação e germinação da semente do açazeiro, *Euterpe oleracea* Mart. Piracicaba: ESALQ, 1989. 79p. Tese de Mestrado.
- NOGUEIRA, O.L.; CALZAVARA, B.B.G.; MÜLLER, C.H.; MOREIRA, D.A. Manejo de açazeiros (*Euterpe oleracea* Mart.) cultivados em Latossolo Amarelo na Amazônia. *Revista Brasileira de Fruticultura*, Cruz das Almas, v.20 n.1, p.53-59, 1998.
- NOGUEIRA, O.L.; FIGUEIRÊDO, F. J.C.; MÜLLER, A.A. Açai. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental. 2005. 137 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Sistemas de produção, 4).
- NOGUEIRA, O.L.; HOMMA, A.K.O. Análise econômica de sistemas de manejo de açazeiros nativos no estuário amazônico. Belém: EMBRAPA-CPATU, 1998. (EMBRAPA-CPATU. Documentos, 28). 38p.
- OLIVEIRA, M. do S. P. de; MULLER, A. A. Seleção de germoplasma de açazeiro promissor para frutos. Belém: EMBRAPACPATU, 1998. 5p. (EMBRAPA-CPATU. Pesquisa em Andamento, 191).
- OLIVEIRA, M.doS.P. de; CARVALHO, J.E.U. de; NASCIMENTO, W.M.O. do. Açai (*Euterpe oleracea* Mart.). Jaboticabal: Funep, 2000. 52p.
- OLIVEIRA, S et al. (2018). Tempo e ambientes na conservação de sementes de taperebá (*Spondias mombin* L.anacardiaceae). 10.31692/25267701. III COINTERPDVAGRO. 2018.00215.



OLIVEIRA, A. V. Apostila do Curso Técnico em Meio Ambiente – IFAM - CMC. Manaus, AM: 2020.

WADE, R. AUGYTE S, HARDEN M, NUZHDIN S, YARISH C, ALBERTO F (2020). Banco de germoplasma de macroalgas para conservação, segurança alimentar e indústria. PLoS Biol 18(2): e3000641. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000641>.

QUEIROZ, J.A.L.de; MELÉM JÚNIOR, N.J.de. Efeito do tamanho do recipiente sobre o desenvolvimento de mudas de açáí (Euterpe oleracea Mart.). Revista Brasileira de Fruticultura, Cruz das Almas, 2000.

VILLACHICA, H.; CARVALHO, J.E.U. de; MÜLLER, C.H.; DIAZ, S.C.; ALMANZA, M. Frutales y hortalizas promissorios de la Amazonia. Lima: Tratado de Cooperación Amazonica, 1996.



PRATICANDO A EDUCAÇÃO AMBIENTAL PARA ALÉM DOS MUROS DO IFPB, CAMPUS SANTA RITA

1Maria Luisa Lins Pimentel Fernandes Souza, 2Bruna Letícia da Silva, 3Gabriel da Silva Galvão, 4Ana Júlia Lins Pimentel Fernandes Souza, 5Anamaria de Sousa Duarte

1Instituto Federal da Paraíba, e-mail: marialuisafernandes26@gmail.com; 2Instituto Federal da Paraíba, e-mail: brunaletpb@gmail.com; 3Instituto Federal da Paraíba, e-mail: silva.galvao@academico.ifpb.edu.br; 4Instituto Federal da Paraíba, e-mail: anajuliaafernandess@gmail.com; 5Instituto Federal da Paraíba, e-mail: anamaria.duarte@ifpb.edu.br

Palavras-chave: Educação Ambiental; Resíduos Sólidos; Práticas Sustentáveis;

Resumo

A crescente preocupação com o meio ambiente impulsiona a busca por práticas sustentáveis e conscientização acerca dos impactos das ações antrópicas no Meio Ambiente. Partindo desse contexto, a Educação Ambiental surge como instrumento fundamental para que auxilie os cidadãos a criarem responsabilidade ambiental com o meio em que os cercam. Através desse cenário, o gerenciamento de resíduos sólidos é uma das temáticas com mais obstáculos a serem ultrapassados, demandando estratégias eficazes para lidar com o crescente aumento da geração dos resíduos sólidos no mundo. O presente artigo é um produto decorrente da execução do projeto de extensão desenvolvido no IFPB, campus Santa Rita, Paraíba, intitulado “Praticando a Educação Ambiental para além dos muros do IFPB Campus Santa Rita”. Nesse artigo são apresentados e discutidos os desafios enfrentados na implementação da Educação Ambiental no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB-SR), campus Santa Rita, e no Lar Educativo Cristão (LEC), unidade Jardim Carolina, parceiro social do projeto, com objetivo definir e estabelecer estratégias que fomentem o manejo adequado e a valorização dos resíduos gerados nas instituições. Anteriormente, no ano de 2023, o mesmo grupo de trabalho desenvolveu o projeto de extensão denominado geração e composição gravimétrica dos resíduos sólidos gerados no IFPB - Campus Santa Rita, o qual é precursor do atual projeto. Da execução do primeiro projeto, notou-se que a comunidade acadêmica do IFPB-SR quanto a do LEC não sabem separar corretamente os resíduos sólidos gerados devido à falta de conhecimento sobre a temática, visto que, foram encontrados diversos tipos de resíduos descartados de maneira inadequada. Diante das respostas obtidas, observou-se a necessidade da aplicação da educação ambiental nas duas instituições, como forma de promover a conscientização ambiental acerca dos resíduos que são lá gerados. Como forma de alcançar tal premissa, a metodologia aplicada para tal ação se deu por meio de realizações de palestras educacionais e oficinas de velas e sabão reutilizando o óleo de cozinha usado. Após a execução da metodologia adotada durante a execução do projeto, observou-se que, apesar dos métodos utilizados e esforço dos membros do projeto, a maior parcela dos participantes se mostrou desinteressada na temática abordada, dificultando, assim, a implementação da educação ambiental nas duas instituições. A identificação do desinteresse da comunidade acadêmica com relação à adoção de práticas de gerenciamento de resíduos, após a aplicação das palestras e oficinas, ressalta a alta complexidade de promover mudanças em comportamentos rotineiros em relação ao meio ambiente. Isso pode indicar a necessidade de revisão e aprimoramento das abordagens utilizadas ou de estratégias mais eficazes, especialmente, da população adulta, a qual é mais resistente em adotar práticas sustentáveis em relação ao manejo correto dos resíduos sólidos gerados. Ademais, se faz importante ressaltar que é necessário uma abordagem não apenas da conscientização ambiental dos cidadãos, mas, também, dos contextos sociais, econômicos e culturais, que influenciam nas atitudes e nos comportamentos das pessoas em relação à sustentabilidade e à preservação do meio ambiente. Tomando conhecimento de tal fato, é fundamental reconhecer que a mudança de hábitos é um processo gradual e complexo, que requer tempo, esforço e muito comprometimento de diversos atores da sociedade e, quando se trata da criação de responsabilidade ambiental com o meio em que estamos inseridos, o cuidado com as boas práticas ambientais, inclusive no tocante aos resíduos gerados, o aprendizado deve ser construído desde a mais tenra idade, com objetivo de formar adultos com responsabilidade ambiental. Portanto é necessário perseverar no trabalho de educação ambiental, adaptando constantemente as estratégias e buscando envolver a comunidade de maneira cada vez mais efetiva nessa ação. Apesar dos desafios, o projeto representou um passo importante por apresentar práticas mais sustentáveis na comunidade local tendo em vista promover a conscientização ambiental da comunidade.

Introdução

A crescente preocupação com o meio ambiente impulsiona a busca por práticas sustentáveis e a conscientização acerca dos impactos das atividades humanas no ecossistema. Nesse contexto, a educação ambiental emerge como uma ferramenta essencial para promover a compreensão e a mudança de comportamento em relação ao ambiente que nos cerca.

Associada a esse cenário, o gerenciamento de resíduos sólidos figura como uma das áreas de atuação mais críticas, demandando estratégias eficazes para lidar com o grande aumento da produção de resíduos na sociedade contemporânea. A Lei Nº 9.795, de 27 de Abril, 1999 disserta acerca da obrigatoriedade da efetivação Educação Ambiental tanto no ensino formal, como o não formal. No entanto, tal legislação não é respeitada na maior parte das instituições do território brasileiro, dado que há obstáculos na sua implementação, como: Se as estratégias educacionais das escolas visam o desenvolvimento integral do indivíduo como parte ativa na sociedade, tanto em sua dimensão pessoal quanto social, política, cultural e produtiva, então a integração da educação sócio-ambiental deve estar em total consonância com os propósitos, metas e estrutura do sistema de ensino (SILVA,



2004). Neste contexto, a conscientização gerada pela educação ambiental pode levar a uma participação mais ativa na separação de resíduos, na adesão a programas de reciclagem e na busca por alternativas mais sustentáveis em suas vidas cotidianas.

Além disso, no âmbito do cenário escolar, responsável pela transformação social dos indivíduos, a educação ambiental desempenha um papel crucial ao incentivar a responsabilidade coletiva em relação aos resíduos, promovendo a ideia de que cada indivíduo tem um papel a desempenhar na preservação do meio ambiente. No contexto específico do Instituto Federal da Paraíba (IFPB) e do Lar Educativo Cristão (LEC), a educação ambiental desempenha um papel crucial na formação de cidadãos conscientes e responsáveis. Para isso, o educador é a chave crucial para a disseminação dessa prática, a fim de multiplicar o conhecimento adquirido. Além disso, conforme SATO (2003) é de responsabilidade do professor a abordagem interdisciplinar propondo sempre metodologias criativas, abandonando os modelos tradicionais como estratégias para dirimir os problemas ambientais. “Metodologias criativas que podem ser elaboradas na educação ambiental incluem projetos de aprendizagem ao ar livre, simulações de problemas ambientais reais e o uso de tecnologias interativas, como realidade virtual e jogos educativos, conforme mencionado por SATO (2003).”

Um exemplo positivo da inserção da Educação Ambiental no ambiente escolar acontece no colégio Dante Alighieri em São Paulo, localizado no bairro Cerqueira César; na instituição, são desenvolvidas diversas atividades em prol da sustentabilidade e formação de cidadãos conscientes na conjuntura social e no meio em que estão inseridos. Os alunos realizam projetos diariamente, com auxílio dos professores, práticas como coleta seletiva, coleta de água de chuva, compostagem, telhado verde, etc.

Ao considerarmos o ambiente educacional como uma plataforma estratégica para a disseminação de conhecimentos e a formação de hábitos, o objeto de estudo abrange desde as metodologias pedagógicas empregadas até as práticas cotidianas de manejo de resíduos dentro das instituições de ensino.

A problemática identificada reside na lacuna existente entre a teoria e a prática no que diz respeito à educação ambiental nas escolas. Este desafio, lamentavelmente, presente tanto em instituições públicas quanto privadas, reflete uma lacuna significativa na implementação efetiva da educação ambiental, especialmente, nas séries iniciais até as etapas superiores do ensino, resultando em uma geração de estudantes que, apesar de possuírem conhecimento teórico sobre questões ambientais, carecem de experiências práticas e de uma compreensão mais profunda das implicações de suas ações no meio ambiente.

A relevância deste estudo consiste na sua capacidade de diagnosticar os obstáculos e fomentar soluções diante da urgência de enfrentar os desafios ambientais que assolam as instituições, buscando promover uma mudança cultural profunda, incorporando práticas sustentáveis no cotidiano da população acadêmica. Ao compreendermos melhor essa interação, estaremos mais preparados para enfrentar os desafios ambientais e promover uma mudança positiva nas instituições de ensino.

Diante do exposto, neste trabalho buscou-se definir e estabelecer estratégias para implementação da educação ambiental, de modo que fosse fomentado o manejo adequado e a valoração dos resíduos gerados nas duas instituições.

Metodologia

O estudo faz parte do projeto de extensão "Praticando a Educação Ambiental para além dos muros do IFPB campus Santa Rita", realizado no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba campus Santa Rita e no Lar Educativo Cristão, unidade Jardim Carolina. Este projeto desempenhou um papel crucial na formação de cidadãos conscientes, indo além da simples transmissão de informações para cultivar atitudes e valores ambientalmente responsáveis.

A parceria entre um instituto federal e um parceiro social destaca a abordagem integral do projeto, conectando diferentes setores da sociedade para alcançar resultados mais englobantes.

Caracterização do local de estudo

Todo trabalho ocorreu em Santa Rita, município situado na Região Metropolitana de João Pessoa, Mesorregião Mata Paraibana, Estado da Paraíba, Nordeste do Brasil (Figura 1), obtendo sua área inteiramente coberta pelo bioma Mata Atlântica. Estima-se que sua população em 2023, segundo o IBGE (2022), foi de aproximadamente 149.910 habitantes, abrangendo uma área de 718.576 km².

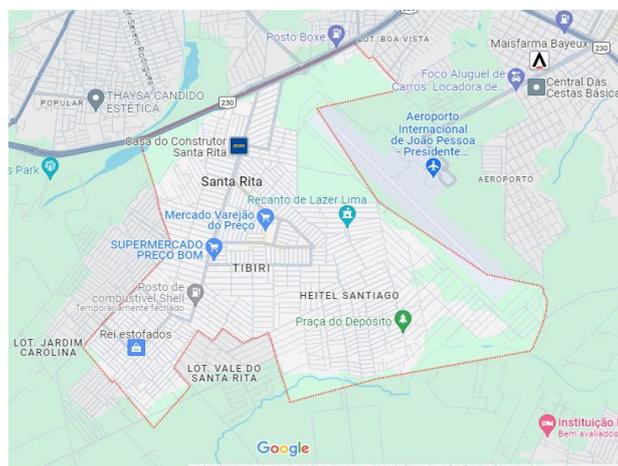


Figura 1: Município de Santa Rita.



O Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), é uma instituição de ensino pública federal do Brasil, validada em 1999 pelo Ministério da Educação e Cultura (MEC), e conta com 21 unidades espalhadas em todo o estado paraibano. A Instituição busca oferecer a formação profissional, tecnológica e humanística em todas as suas instâncias e formas, por meio do Ensino, da Pesquisa e da Extensão, com o objetivo de colaborar na capacitação de indivíduos para desempenharem papéis no ambiente profissional e na edificação de uma sociedade inclusiva, equitativa, sustentável e democrática.

O campus Santa Rita, do Instituto Federal da Paraíba, hoje tem 501 pessoas, sendo 420 discentes, 30 funcionários terceirizados, 29 funcionários da docência e 22 técnicos. IFPB-SR (Figura 2) oferta, atualmente, três cursos: Técnico Integrado em Informática; Técnico Integrado em Meio Ambiente; Formação Inicial e Continuada em Agente de Fiscalização Ambiental. Nos quais, atualmente, em 2023, contam com aproximadamente 420 discentes matriculados. O local, situado na BR-230, no Bairro Popular, Santa Rita – PB, inclui um edifício administrativo e dois edifícios acadêmicos. Esses possuem salas de aula, juntamente com laboratórios de Química, Física, Biologia, Açúcar e Álcool, Automação e Instrumentação Industrial, Metrologia, entre outros.



Figura 2: Sede definitiva do IFPB campus Santa Rita.

O Lar Educativo Cristão (LEC), é uma Organização Não Governamental (ONG), parceiro da Compassion, entidade que está presente em mais de 15 países e que soma, amplia e fortalece os atendimentos, alcançando mais de 700 famílias e mais de 1.100 usuários entre bebês, crianças, adolescentes e jovens em idades que variam de 0 anos até os 20 anos com gratuidade total em regime de projeto pós-escola. Distribuído estrategicamente, o LEC se faz presente nos bairros com maiores índices de vulnerabilidade social, em cinco unidades no município de Santa Rita. O projeto "Praticando a Educação Ambiental para além dos muros do IFPB campus Santa Rita" está presente na unidade Jardim Carolina do LEC (Figura 3C), atendendo seus usuários e suas famílias, com o objetivo de auxiliar educacionalmente em relação ao gerenciamento de resíduos sólidos, além de capacitar e contribuir para uma possível geração de renda extra.



Figura 3: Unidade Jardim Carolina do LEC.



Estratégias para fomentação da educação ambiental

Para identificar quais as estratégias poderiam ser adotadas quanto à prática de educação ambiental no tocante ao manejo de resíduos no IFPB-SR e no LEC, foi realizado um levantamento bibliográfico sobre coleta seletiva e logística reversa, com intuito de ter conhecimento sobre os dados e as dificuldades que as pessoas encontram com relação a estas duas temáticas. Para tanto, utilizou-se dados provenientes do Instituto Brasileiro de Geografia Estatística (IBGE), Associação Brasileira de Limpeza Urbana (ABRELPE) e artigos científicos que abordem resíduos sólidos, coleta seletiva e logística reversa. Além destes mencionados, ainda considerou-se neste estudo a Legislação Federal no. 12.305/2010 e a NBR 10.004/2004 da ABNT.

De posse das informações e dados, foram observados os pontos que requerem melhorias na sociedade, em virtude das dificuldades existentes, sendo tais informações utilizadas como embasamento dentro do universo de atuação deste projeto de extensão. Assim, foram definidas como estratégias de fomento de educação ambiental nas referidas instituições: a) Palestras sobre resíduos sólidos, enfocando a produção, o tratamento e o descarte de resíduos, ministrada para comunidade acadêmica do IFPB-SR, LEC e empresas locais. O objetivo dessas palestras foi instruir os participantes sobre a correta separação, gerenciamento e descarte de resíduos gerados, visando informar a comunidade que participam das instituições e; b) Oficinas práticas de produção de velas ecológicas e sabão líquido a partir do óleo de cozinha usado. Essas oficinas, ministradas para alunos e seus responsáveis, não apenas promovem um manejo adequado desse resíduo comum em nossas residências, mas também, oferecem uma oportunidade para os participantes gerarem uma renda extra por meio da produção e comercialização desses produtos sustentáveis.

Essas ações integradas contribuem para a conscientização ambiental, além de também capacitar as comunidades a adotarem práticas mais sustentáveis em seu cotidiano, promovendo um impacto positivo tanto no meio ambiente quanto na qualidade de vida das pessoas envolvidas.

Resultado e Discussão

De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, publicado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE (2022) - mais de 39,0% dos resíduos sólidos produzidos no país foram descartados em locais inadequados, como os lixões. Partindo dessa problemática, foram oferecidas palestras e oficinas, como caminhos para fomentação de conscientização ambiental tanto no *campus*, como no parceiro social do projeto.

As palestras foram ofertadas para todo corpo das instituições - docentes, discentes e servidores - e ministradas pelos membros do projeto (Figuras 4 e 5), tendo como objetivo informar sobre o processo da educação ambiental e gerenciamento dos resíduos sólidos que são produzidos em cada instituição, bem como sanar dúvidas surgidas. No decorrer das palestras, foi notório observar falta de conhecimento sobre alguns termos relacionados aos resíduos sólidos e, principalmente, acerca da ação de separar os resíduos sólidos, fato que pode ser justificado pelos seguintes fatores: a) Ausência de estímulos sobre Educação Ambiental por parte das instituições acompanhadas; b) Carência de abordagens sobre as temáticas ambientais desde os anos iniciais dos alunos e c) Descaso ou falta de interesse para com a temática, pois não se enxerga a importância das temáticas ambientais inclusive o manejo adequado dos resíduos sólidos.

Ao término do ciclo de palestras, como forma de retorno de aprendizagem, foi proposto um desafio de um mês, que consistia na separação de resíduos sólidos produzidos nos recintos ocupados pela comunidade acadêmica e, como bonificação, o ambiente que mostrasse a separação correta dos resíduo, sem todo o mês, receberia um prêmio. Entretanto, após algumas semanas desse desafio, observou-se que houve falta de interesse, afetando a separação dos resíduos, mostrando que a tentativa de conscientizar a comunidade acadêmica havia falhado, fato que causou frustração à equipe participante do projeto.



Figura 4: Palestra ministrada aos discentes do IFPB campus Santa Rita.



Figura 5: Palestra ministrada aos discentes do LEC.

Além das palestras, foram executadas oficinas para fabricação de velas ecológicas e detergente líquido a partir do óleo de cozinha usado. O objetivo das oficinas foi mostrar que há meios sustentáveis de utilizar tal material, que é produzido em abundância no nosso dia-a-dia e, que se descartado de maneira incorreta, acarreta malefícios ao meio ambiente, além de apontar alternativas de valoração econômica do referido resíduo. Nas Figuras 6 e 7, são mostradas a oficina de velas ecológicas executada no IFPB-SR e a oficina de detergente líquido executada no LEC Jardim Carolina.



Figura 6: Oficina de velas ecológicas executada no IFPB campus Santa Rita.

Conforme se deu a execução da produção de velas ecológicas, foi possível notar que 10, dos 15 alunos que participaram da prática, se mostraram interessados e focados em conhecer meios sustentáveis de reutilizar o óleo de cozinha usado, fazendo com que esse material não seja desejado pelo ralo da pia. Na Figura 6 são mostrados os participantes com suas velas ecológicas produzidas pelos próprios alunos. A outra parcela dos participantes presentes se mostrou desinteressada no que foi ensinado e estima-se que esses alunos se fizeram presentes, pois a presença valeria uma nota bimestral.

Apesar de não atingir todo o público, em questão de interesse dos participantes, a maior parcela manifestou-se positivamente ao que foi repassado, fazendo com que o objetivo da oficina fosse alcançado, ou seja, repassar conhecimento e aprendizado aos alunos que desejam mudar seus hábitos e assumir a responsabilidade ambiental quanto ao meio em que vivemos.

Após a realização da oficina de sabão líquido no LEC, ficou notório a falta de interesse pela maior parte dos ouvintes durante a execução da oficina, onde, a maioria do público participante relatou a dificuldade de se fabricar o sabão líquido, em virtude de que a prática era trabalhosa, sendo mais prático comprar o sabão. Percebe-se, com isto, que as participantes não deram importância à prática executada, ocasionando num resultado surpreendente, uma vez que a comunidade atendida pelo LEC poderia usufruir desse conhecimento passado, para que pudessem fazer um produto para consumo próprio, diminuindo os com aquisição de produtos de limpeza, já que com 200 mL de óleo usado produziria 7.000 mL de sabão líquido, bem como poderia ser fonte renda extra se comercializassem o produto.



Ao analisar os resultados alcançados com o desenvolvimento do projeto, percebeu-se a dificuldade de se implementar ações de educação ambiental nas duas instituições devido a falta de conhecimento acerca de conceitos básicos sobre o meio ambiente. Infere-se que estas respostas podem ter sido provocadas como fatores, como: déficit de incentivo por parte das duas instituições, carência de profissionais capacitados na passagem do conhecimento e ausência das responsabilidades ambientais advindas dos participantes. Corroborando a afirmação anterior, observa-se que as respostas obtidas neste estudo se assemelham às obtidas no trabalho desenvolvido por Fenner (2015), onde, após tentar introduzir a educação ambiental numa escola municipal do estado do Rio Grande do Sul, encontrou-se os mesmos obstáculos durante essa inserção de ações de educação ambiental no contexto escolar.



Figura 7: Oficina de detergente líquido executada no LEC Jardim Carolina.

A partir das situações relatadas acima, pode-se concluir que para que exista uma sociedade reflexiva e responsável com suas próprias mudanças de hábitos acerca das questões ambientais, é imprescindível que haja instrumentos que fomentem e despertem a responsabilidade ambiental em cada cidadão. Assim, como base no que foi vivenciado, para que a implementação da educação ambiental na escola seja efetiva, deve haver na localidade onde o IFPB-SR e LEC estão inseridos, um trabalho contínuo e abrangente por parte dos gestores do município de Santa Rita em conjunto com as instituições públicas, entre elas, as instituições escolares.

Corroborando a afirmação acima, Ferreira (2019) comenta que, para que a educação ambiental seja utilizada como instrumento de desenvolvimento social de um lugar, deve-se entender que, para que tal objetivo seja alcançado, recomenda-se que haja um processo contínuo de construção coletiva que relacione todas as demandas comunitárias. Logo, inserir a educação ambiental apenas nas instituições escolares acompanhadas seria difícil, visto que é necessário um trabalho educacional contínuo que seja vivenciado por toda a comunidade, dotando-a de conhecimento com relação às questões relacionadas à sustentabilidade do meio ambiente, entre elas, o manejo correto dos resíduos produzidos. Além disso, é notório que além da educação ambiental, os gestores do município ofereçam os serviços públicos adequados à população.

Comentários finais

A educação ambiental desempenha um papel crucial, sendo reconhecida como um dos instrumentos que podem desencadear mudanças notáveis no comportamento das pessoas em relação ao meio ambiente. No entanto, sua eficácia requer a implementação de estratégias específicas desde as séries iniciais e modificações na formação dos educadores. Os resultados deste estudo apontam que a adoção de um conjunto de abordagens metodológicas, aplicadas de maneira dinâmica e criativa, com ênfase na afetividade entre os indivíduos e o meio ambiente, constitui a principal via para avançar na implantação da educação ambiental dentro das instituições educacionais, no entanto ainda requer muito esforço para desenvolver o senso crítico e diminuir a resistência à aceitação em adotar práticas corretas e sustentáveis para com os resíduos sólidos produzidos, especialmente, no tocante às pessoas adultas.

Foi observado, também, que é necessário que haja um comprometimento mais efetivo tanto por parte das instituições educacionais quanto do poder público, a fim de mudar os hábitos da sociedade, promovendo um meio ambiente mais equilibrado para as gerações futuras.

Agradecimentos

Os autores desejam expressar sua gratidão ao Instituto Federal da Paraíba, Campus Santa Rita, pelo apoio fundamental concedido ao Projeto de Extensão, por meio da concessão de recurso financeiro (taxa de bancada e bolsas). Essa contribuição não só nos permitiu expandir nossos esforços, mas, também, nos ajudou a contribuir para o desenvolvimento da comunidade do município.



Referências Bibliográficas

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10007: 2004. Amostragem de resíduos. Associação Brasileira de Normas, 2004.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: 2004. Resíduos sólidos: Classificação. Associação Brasileira de Normas, 2004.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Indicadores Sociais Municipais**: uma análise dos resultados do Censo Demográfico 2020. Rio de Janeiro, 2024.

INFORMAÇÃO, D.-G. DE T. DA. Sobre o campus. Disponível em: <<https://www.ifpb.edu.br/santarita/institucional/sobre-o-campus>>. Acesso em: 15 dez. 2023.

LEC – AD Santa Rita PB. Disponível em: <<https://adsantarita.com.br/lec/>>. Acesso em: 15 dez. 2023.

MEDEIROS, Aurélia. et al. A Importância da educação ambiental na escola nas séries iniciais. **Revista Faculdade Montes Belos**, Goiás, v. 4, n. 1, p. 15-16, set. 2011.

NEVES, Gisele Aparecida dos Santos; MACHADO, Fábio P. DESAFIOS DA INSERÇÃO DA EDUCAÇÃO AMBIENTAL NAS ESCOLAS PARA O ALCANCE DA SUSTENTABILIDADE. **Revista Uninter**, Website, 2022. Disponível em: <https://repositorio.uninter.com/bitstream/handle/1/1161/2866294-GISELE%20APARECIDA%20DOS%20SANTOS%20NEVES.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Acesso em: 23 jan. 2024.



CEDAE IMERSA NA AGENDA 2030: EDUCAÇÃO AMBIENTAL, COMPROMISSO PARA ALÉM DOS MUROS DAS INSTITUIÇÕES DE ENSINO

1Juliana Souza de Oliveira, 2Paulo Cesar Oliveira da Cunha, 3Carlos Henrique Parente, 4Glaucir Ribeiro Passos, 5Edson Vander Oliveira Soares 6Paulo Henrique Pereira Reis

1 Companhia Estadual de Águas e Esgoto do Rio de Janeiro, e-mail: joliveira@cedae.com.br; 2 Companhia Estadual de Águas e Esgoto do Rio de Janeiro, e-mail: paulocunha@cedae.com.br; 3 Companhia Estadual de Águas e Esgoto do Rio de Janeiro, e-mail: carlosparente@cedae.com.br; 4 Companhia Estadual de Águas e Esgoto do Rio de Janeiro, e-mail: glaucirpassos@cedae.com.br; 5 Companhia Estadual de Águas e Esgoto do Rio de Janeiro, e-mail: edsonvander@cedae.com.br; 6 Companhia Estadual de Águas e Esgoto do Rio de Janeiro, e-mail: pauloreis@cedae.com.br.

Palavras-chave: Educação Ambiental; Centro de Visitação Ambiental - CEDAE; Agenda 2030

Resumo

O presente artigo tem como objetivo apresentar a estrutura do programa de Educação Ambiental implementada pela empresa CEDAE (Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro) por meio do Centro de Visitação Ambiental (CVA) da Estação de Tratamento de Água (ETA) do Laranjal, localizada no município de São Gonçalo/RJ, após pandemia COVID 19. Embora as questões ambientais sejam pautas de muitas conferências e congressos há anos, nunca se viu tanta necessidade de trabalhá-las de forma abrangente e sólida como atualmente. Diante da consolidação de uma economia capitalista, pós-revolução industrial, onde a acumulação de capital e obtenção de lucro estão acima de qualquer preceito, iniciou-se uma exploração intensiva e extensiva dos recursos naturais. Esse ritmo de exploração, incompatível com o processo de recomposição da natureza, acendeu uma luz de alerta e provocou uma onda crescente de movimentos e ações a favor da preservação e conservação ambiental. Como pilar essencial na estrutura de uma sociedade ambientalmente mais sustentável, a educação ambiental, ferramenta importantíssima e consagrada, desde meados da década de 60, tornou-se exigência mundial. No Brasil, a educação ambiental foi colocada pela primeira vez no regime jurídico em 1981 e, vista como um instrumento auxiliar para solucionar problemas ambientais. Mesmo não se apresentando, até o presente momento, como uma disciplina específica do currículo do ensino formal, a educação ambiental é elemento necessário e permanente na educação nacional, sendo trabalhada de forma multidisciplinar e abrangente a todos os níveis de ensino e modalidades (formal e não-formal). O processo educativo não-formal criado pelo CVA Laranjal, trabalha em paralelo ao sistema de ensino formal tendo como eixo a (re) construção de conceitos, ideias e atitudes que denotem uma sensibilização e conscientização ambiental compatível com a realidade e necessidade da atualidade. Nessa perspectiva, as pessoas que passam pelo programa têm a oportunidade de tornarem-se cidadãos conscientes de suas práticas, estabelecendo padrões de valores com o enfoque para a sustentabilidade. Garantindo, desta maneira, uma expectativa de um futuro favorável às próximas gerações. A meta é alcançar o maior número possível de pessoas de diferentes faixas etárias e posições sociais, mantendo para isso, uma política que possibilite igualdade de acessibilidade ao programa. Este visa fortalecer as ações propostas pela agenda 2030 da ONU, mais especificamente ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável – ODS 4 que traz consigo a necessidade e a responsabilidade de garantir um processo educacional de qualidade para todos, de respeito às diferenças, sem preconceito e discriminação ao longo de toda jornada de vida do ser humano. Tendo como foco a meta 4.7 que visa garantir que alunos detenham conhecimentos e habilidades necessárias através da educação para o desenvolvimento sustentável e estilos de vida sustentável. O Objetivo de Desenvolvimento Sustentável – ODS 12 também é abraçado pelo programa desenvolvido pelo CVA Laranjal, na medida, que é trabalhada a problemática que envolve a geração de resíduos sólidos, a importância de repensar hábitos, as possibilidades de redução do consumo, da recusa ao ato de consumir quando possível, as formas ambientalmente mais corretas de destinação dos resíduos – possibilidade de reúso e reciclagem.

Introdução

As mudanças climáticas evidenciadas atualmente são fruto da ação humana sobre o meio ambiente por décadas. O homem vem ceifando a natureza em um ritmo cada vez mais acelerado, tendo como justificativa para suas ações de crueldade o tão almejado desenvolvimento econômico. O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), órgão que tem a incumbência de produzir informações científicas, assegura que há evidências que o aumento da temperatura global tem como causa a ação humana. Dentre as atividades que mais contribuem para o aquecimento do planeta e, consequentemente, para as alterações do clima estão a queima de combustíveis fósseis, conversão do uso do solo, agropecuária, descarte de resíduos sólidos e o desmatamento. Os alertas sobre os perigos das mudanças climáticas tornaram-se cada vez mais frequentes e, a população mundial já sofre com os efeitos dessas mudanças. O relatório síntese divulgado pelo IPCC, em março de 2023, informa que o cenário atual exige urgentemente a tomada de medidas mais ambiciosas na direção de frear as agressões ao meio ambiente e que, se as ações forem realizadas agora, ainda será possível assegurar um futuro habitável e sustentável.

Para a reversão desse quadro ou, pelo menos, para impedir que alcancemos níveis de alterações ambientais insustentáveis a manutenção da vida, é necessário trabalhar no campo educacional. Um processo educacional para além da mera



transmissão de conhecimentos torna-se urgente, estimula a conscientização e o empoderamento em prol de ações individuais na construção de um mundo ambientalmente mais sustentável. A formação de agentes ativos é o primeiro passo para a formação de uma sociedade mais justa e igualitária. Conforme a ideia central da obra de Paulo Freire “Educação e Mudança” (1979): “Educação não transforma o mundo. Educação muda as pessoas. Pessoas transformam o mundo.”

É visível que esforços mundiais estão sendo canalizados para transformar o cenário global. Tendo, hoje, como base os objetivos e metas contidos na Agenda 2030 anunciados pela ONU em 2015, sendo esses, pautados para que se atinja o desenvolvimento sustentável em três dimensões: econômica, social e ambiental. Diante de tal fato, a CEDAE (Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro) assumiu, em outubro de 2022, o compromisso em fortalecer a ação aderindo ao Pacto Global.

Dentro do compromisso assumido pela Cia, o Centro de Visitação Ambiental da Estação de Tratamento de Água (ETA) do Laranjal (CVA Laranjal) tem proposto e desenvolvido trabalhos correlatos ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável - ODS 4 (Educação de Qualidade) da Agenda 2030, que tem como meta garantir educação qualitativa, inclusiva e equitativa, além de fomentar oportunidades de aprendizagem ao longo da vida para todos. Em sua meta 4.7 vislumbra-se: “Até 2030, garantir que todos os alunos adquiram conhecimentos e habilidades necessárias para promover o desenvolvimento sustentável, inclusive, entre outros, por meio da educação para o desenvolvimento sustentável e estilos de vida sustentáveis, direitos humanos, igualdade de gênero, promoção de uma cultura de paz e não violência, cidadania global e valorização da diversidade cultural e da contribuição da cultura para o desenvolvimento sustentável” (ONU, 2015).

Tendo, o CVA Laranjal, um programa de educação ambiental que trabalha a importância e necessidade de um consumo mais responsável e sustentável, visando a concretude da percepção do público no que tange a utilização de recursos naturais e geração de resíduos, conecta-se ao ODS 12 da Agenda 2030. A contribuição ao Pacto Global configura-se no trabalho de conscientização quanto a recusa de materiais descartáveis sempre que possível, a reutilização de produtos e/ou materiais e do processo de reciclagem. Provocando, desta forma, o ato de repensar hábitos corriqueiros que trazem tantos malefícios para o meio ambiente.

Desenvolvimento

O CVA Laranjal, localizado na Estação de Tratamento de Água (ETA) do Laranjal, no município de São Gonçalo/RJ, teve suas atividades retomadas em agosto de 2022 após a pandemia de Covid-19. Anteriormente, a administração do centro era realizada pela própria gerência da ETA e, não se tinha uma equipe dedicada exclusivamente para a condução das visitas à unidade. A reabertura do CVA Laranjal trouxe modificações em diversos aspectos do projeto inicial, sua missão hoje, exigiu que mudanças funcionais e estruturais fossem realizadas. Atualmente, o projeto é conduzido por uma equipe exclusiva, composta por colaboradores dedicados à Educação Ambiental, tais colaboradores foram selecionados de acordo com o perfil acadêmico e profissional adequado à função.

A missão do CVA Laranjal perpassa a atuação de facilitador na transmissão de conhecimentos sobre o tratamento de água e a importância de uma ETA e, agrega para si, o compromisso de propagar a educação ambiental de forma lúdica e didática, consolidando uma consciência ambiental adequada ao momento que vivemos.

Uma vez que um dos objetivos é permitir que o acesso à educação ambiental se torne equitativo a todos os segmentos da sociedade, o trabalho do CVA Laranjal não se restringe aos limites da estação de tratamento. Realiza-se visitas às instituições diversas contemplando, também desta forma, um público de faixa etária não permitida a visitar uma ETA. Atualmente, devido às normas de segurança, o CVA Laranjal recebe visitantes a partir de 11 anos ou a partir do 5º ano do ensino fundamental I (antiga 4ª série).

Metodologia

Agendamento das visitas

O agendamento das visitas pode ser feito pela sociedade acadêmica e civil que tenha interesse em conhecer a ETA Laranjal ou que tenha interesse em obter a visita da equipe do CVA Laranjal em seu espaço. A solicitação é realizada via *e-mail* institucional (visitalaranjal@cedae.com.br) e recebida pela equipe, que encaminha um formulário para ser preenchido pelo responsável da solicitação. A partir do formulário preenchido verifica-se o *e-mail*, nome e telefone de contato da pessoa que solicitou o agendamento, assim como, o nome da instituição visitante, o tipo de instituição (municipal, estadual, federal, particular ou outros) e as opções de datas pretendidas para realização da visita. O nível de escolaridade, faixa etária e quantidade de visitantes são dados importantes que devem ser preenchidos corretamente para que a equipe faça a programação adequada ao público.

Para instituições públicas e sem fins lucrativos é disponibilizado ônibus para o transporte dos visitantes (Instituição – ETA / ETA – Instituição) garantindo a igualdade de acesso ao nosso programa por instituições menos privilegiadas em termo de recursos financeiros e materiais. Tal ação, dentro do ODS 4 da Agenda 2030, abrange e contribui com as metas 4.5 e 4.7.

Dinâmica das visitas à ETA – Laranjal

As visitas à ETA Laranjal seguem um roteiro preestabelecido que compreende um primeiro encontro no auditório da ETA, onde são ministradas duas palestras com duração máxima de 15 minutos cada. A primeira, tem como foco a educação ambiental. Assuntos como mata ciliar (função, importância de sua manutenção/recomposição para preservação dos recursos



hídricos e legislação) e resíduos sólidos (geração consciente, coleta seletiva e os impactos negativos ao meio ambiente devido ao lançamento inadequado dos resíduos no meio) são abordados nesta primeira palestra. Além disso, dois programas desenvolvidos pela CEDAE são abordados e debatidos: o “Replantando Vida” e o “Por um mundo menos descartável”.

O programa socioambiental Replantando Vida, teve início em 2001 com a missão de contribuir para a ressocialização de apenados do sistema prisional do Estado do Rio de Janeiro, ofertando trabalho, capacitação profissional, geração de renda e inclusão social, tendo recebido muitas premiações nacionais e internacionais. Dentre as frentes de atuação deste programa destacamos a ambiental, nela os colaboradores do Programa participam de todas as etapas que envolvem a ação de reflorestamento, que vai desde a coleta de sementes, produção de mudas florestais, plantio e manutenção, até o monitoramento dos reflorestamentos para proteção de mananciais. Nos viveiros integrantes do Programa, são produzidas mudas de 254 espécies nativas da Mata Atlântica, sendo 40 espécies ameaçadas de extinção que atendem não somente ações de reflorestamento próprias da Cedae como também iniciativas de outras instituições que desejam restaurar alguma área.

O programa “Por um mundo menos descartável” é uma ação que foi desenvolvida no ano de 2022 com foco na eliminação do uso de copos descartáveis convencionais nas dependências da empresa. Para isso, todos os colaboradores receberam um kit contendo uma caneca e uma garrafa. No âmbito do trabalho do CVA Laranjal, atualmente, para os visitantes são disponibilizados copos biodegradáveis. Ao mencionar a atuação da Companhia na esfera prática, as ações apresentadas saem do campo subjetivo/teórico da problemática que envolve a questão ambiental e permite que seja construída uma percepção real, por parte dos visitantes, da importância da conscientização, da mudança de hábitos e, talvez o mais importante, que atitudes em prol de um meio ambiente ecologicamente equilibrado é sim possível.

Já a segunda palestra dá uma visão de como ocorre o processo de tratamento de água (modo convencional) em uma estação de tratamento. A abordagem contempla desde a captação da água bruta pela empresa, passando as etapas de tratamento dentro da estação e as funções e importância dos laboratórios operacional e de controle de qualidade, além do Centro de Controle Operacional (CCO).

Fechando esta primeira etapa fornecemos aos visitantes um lanche para que possam recarregar as energias e prosseguir para a segunda etapa; ida a planta da estação e laboratórios. Na planta, os visitantes visualizam a chegada da água bruta na estação e os processos de tratamento possíveis de serem observados (coagulação, floculação, decantação e filtração). A lavagem dos filtros realizada após 24h ou 30h de funcionamento, quando coincide com o horário da visita, também é um procedimento que os visitantes têm oportunidade de acompanhar. Nos laboratórios operacional e de controle de qualidade, os visitantes verificam a rotina de análises e sua importância para o sistema de produção.

Encerra-se a visita com a distribuição de mudas de espécies nativas do bioma mata atlântica para pessoas que desejam e se comprometem a realizar o plantio. Para que possamos ter um controle das mudas que saem dos viveiros e são destinadas a este fim, registramos as unidades doadas e solicitamos que os visitantes no momento do plantio façam o registro fotográfico e nos envie por *e-mail*.

Toda visita recebida na ETA Laranjal tem seu registro realizado por meio de fotos e de uma lista de presença com o nome completo dos visitantes e assinatura. Essa listagem norteia a confecção dos certificados digitais de participação das atividades que são encaminhados ao responsável dias após a realização da visita.

Dinâmica das visitas às instituições pela equipe do CVA Laranjal

Esse programa teve seu início em abril de 2023 e, portanto, encontra-se em fase de implementação, totalizando cinco instituições atendidas até o presente momento. A importância desse programa vai muito além de contemplar o público fora da faixa etária atendida pela visita realizada nas dependências da ETA Laranjal, consegue-se com essa ação disseminar conhecimento para um número maior de pessoas em pouco tempo e o mais importante, permitir que atuem (ativos) na construção do saber.

A dinâmica utilizada nas visitas realizadas pela equipe às instituições solicitantes depende do número de turmas a serem contempladas e da faixa etária do público. Há um portfólio de atividades possíveis de serem desenvolvidas, são elas: exibição de vídeo (15 minutos de duração) e posterior roda de conversa; contação de estória (história do saneamento); e palestra em turma única abordando assuntos variados dentro do tema Educação Ambiental. Quando as atividades são realizadas em mais de uma turma, monta-se grupos que são distribuídos em três “Estações do saber” que são: Mata, Água e Resíduos. Nesse caso, cada turma permanece em cada estação por cerca de 10 a 15 minutos (o movimento das turmas é cíclico até que todas passem pelas três estações); dinâmica da coleta seletiva; dinâmica da água e o quiz ambiental.

Assim como acontece nas visitas à estação, toda visita realizada pela equipe tem seu registro realizado por meio de fotos e de uma lista de presença com assinaturas.

Resultados e Discussão

O presente trabalho de educação ambiental desenvolvido pela CEDAE por meio do CVA Laranjal, tem sua ação baseada: (i) nas diretrizes definidas nos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs) e suas diversas abordagens; (ii) nas proposições da Política Nacional de Educação Ambiental (PNEA) - lei n.º 9 795, que em seu Art. 1º diz: “entendem-se por educação ambiental, os processos por meio dos quais o indivíduo e a coletividade constroem valores sociais, conhecimentos, habilidades, atitudes e competências voltadas para a conservação do meio ambiente, bem de uso comum do povo, essencial à sadia qualidade de vida e sua sustentabilidade”; e (iii) com os eventos e conferências voltados para as questões ambientais realizados mundialmente, que estabelecem propostas e metas objetivando o alcance de mudanças necessárias ao enfrentamento do quadro já iniciado. Mudanças essas que são de grande importância para gerar condições melhores de vida hoje e para as



futuras gerações (Carvalho, 2006).

A constituição de 1988 estabelece no Art. 225 que: todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-la e preservá-la para as presentes e futuras gerações.

O programa desenvolvido pela equipe do CVA Laranjal atua em paralelo à educação ambiental desenvolvida nas instituições de ensino portanto, não como substituto. O trabalho pedagógico deve se concentrar nas realidades locais de vida dos alunos, para que cada um deles desenvolva a conscientização de forma a compreender a sociedade e suas relações, tornando-se sujeitos ativos do processo, exercendo de fato a cidadania, sustentabilidade de forma ética e libertária, gerando desenvolvimento local das comunidades.

No período compreendido entre agosto de 2022, período no qual houve a reabertura do CVA Laranjal, e dezembro de 2023, o CVA, recebeu ao todo 3.162 visitantes de diversos tipos de instituições, sendo 86% de instituições públicas, dentre essas em maior número da esfera estadual compreendendo 40%, como mostrado na figura 1.

A figura 2 evidencia o quantitativo de visitantes recebidos mensalmente pelo CVA Laranjal, a média mensal e os valores acumulados. Os meses de agosto, setembro e outubro de 2022 apresentaram um número pouco expressivo de visitantes por se tratar do período de divulgação da reabertura do centro e poucas instituições tinham conhecimento do fato. Os meses de janeiro, fevereiro de 2023 e dezembro tanto de 2022 quanto de 2023, foram meses críticos devido ao período de férias das instituições de ensino.

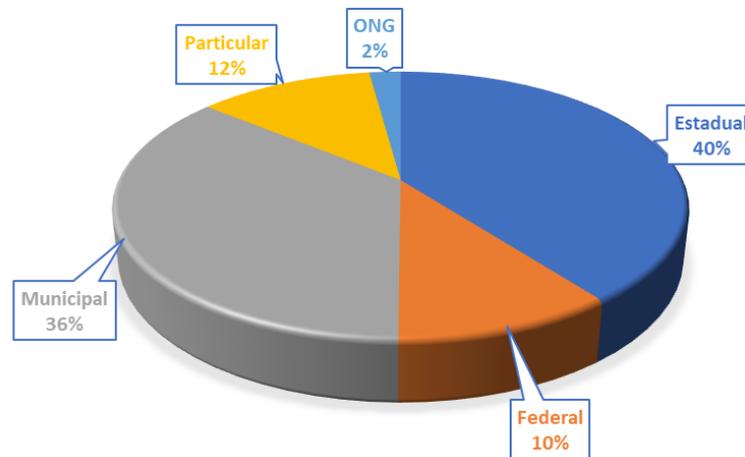


Figura 1: Gráfico tipo de instituições atendidas pelo CVA Laranjal no período de agosto de 2022 a dezembro de 2023.

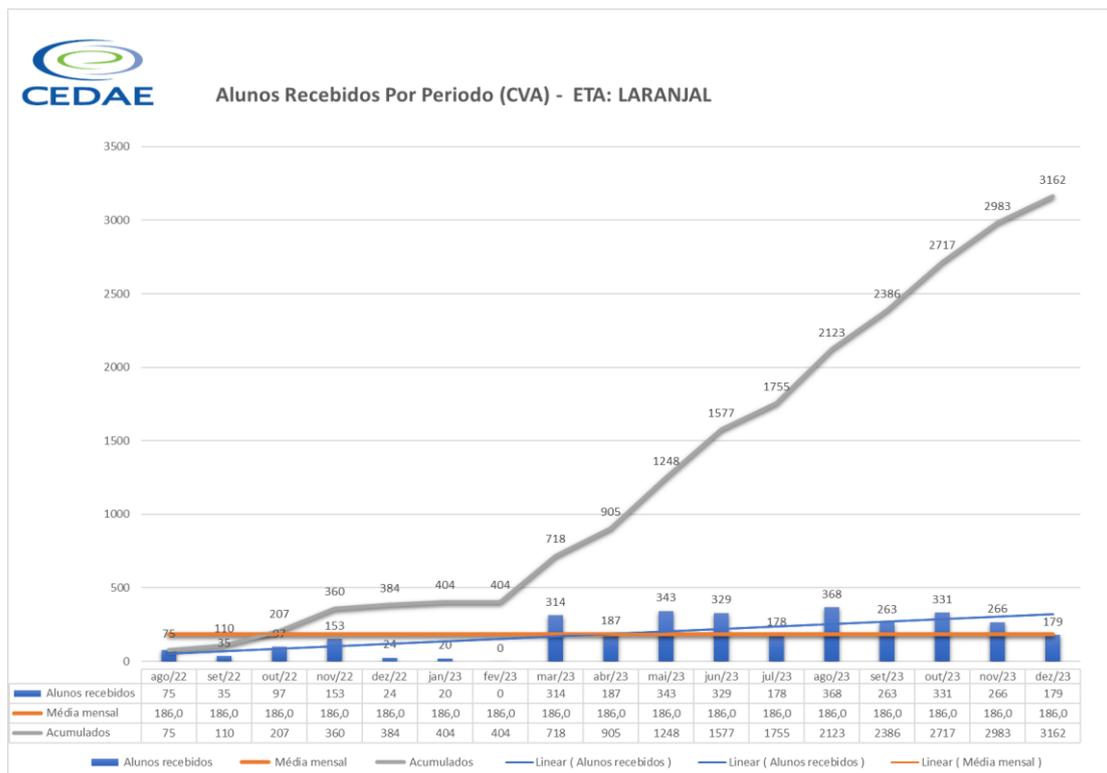


Figura 2: Gráfico do quantitativo de Visitantes recebidos no CVA Laranjal no período de agosto de 2022 a dezembro de 2023.
O total de visitantes apresentado na figura 2, foi possível obter a distribuição por cidades contempladas do estado do Rio de Janeiro apresentada na figura 3.

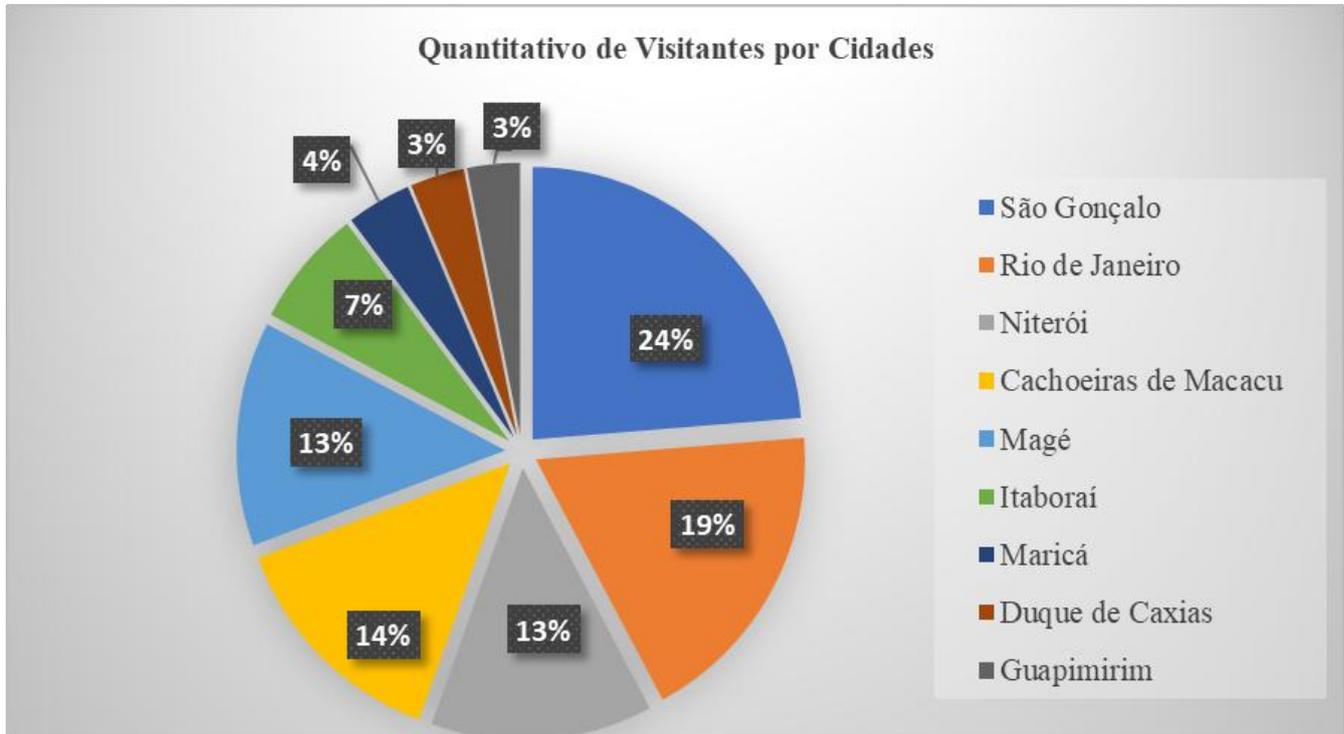


Figura 3: Gráfico do quantitativo de visitantes do CVA Laranjal destruído por Cidades no período de agosto de 2022 a dezembro de 2023.

Do total dos 3.162 visitantes recebidos no CVA Laranjal no período de agosto de 2022 a dezembro de 2023, 764 foram da cidade de São Gonçalo, compreendendo 24% do público recebido; 594 da cidade do Rio de Janeiro compreendendo 19% do público recebido; 445 da cidade de Cachoeiras de Macacu compreendendo 14% do público recebido; as cidades de Niterói e Magé tiveram a mesma representatividade, com 429 visitantes cada, compreendendo 13% do público recebido; 226 foram da cidade de Itaboraí compreendendo 7% do público recebido; 125 da cidade de Maricá compreendendo 4% do público recebido; e na mesma faixa de porcentagem (3%) encontram-se as cidades de Duque de Caxias com 105 visitantes e Guapimirim com 102 visitantes.

Os principais rios que abastecem a ETA Laranjal são o Rio Macacu e o Rio Guapiaçu, a bacia hidrográfica Guapi-Macacu está compreendida nos limites das cidades de Cachoeiras de Macacu, Guapimirim e parte de Itaboraí, cidades essas importantíssimas frente a conscientização ambiental de forma geral e, mais especificamente na conservação e proteção das matas ciliares e dos recursos hídricos. Desta maneira, levando-se em conta o gráfico de visitantes por cidades é possível verificar que o quantitativo de visitantes dessas regiões está abaixo do ideal. E, que se faz necessário uma maior divulgação do projeto nessa região.

Segundo a Lei de Diretrizes e Bases da Educação (LDB – 9.394/96), a Educação básica engloba a Educação infantil, o Ensino Fundamental e o Ensino Médio. Considerando o segmento da Educação Básica, o melhor ponto de partida para conscientização das futuras gerações, visto que, os indivíduos estão em processo de construção cognitiva, o programa desenvolvido pelo CVA Laranjal conseguiu no período tratado atingir um excelente resultado. Neste período de 17 meses, atendeu 2.648 alunos do segmento supracitado, cumprindo a missão de auxiliar na formação da consciência ambiental. A figura 4 mostra o quantitativo de alunos recebidos por segmentos da formação intelectual do indivíduo e verifica-se um quantitativo inferior, porém, não menos importante de visitantes a nível superior, técnico, profissional e provenientes de ONGs (outros).

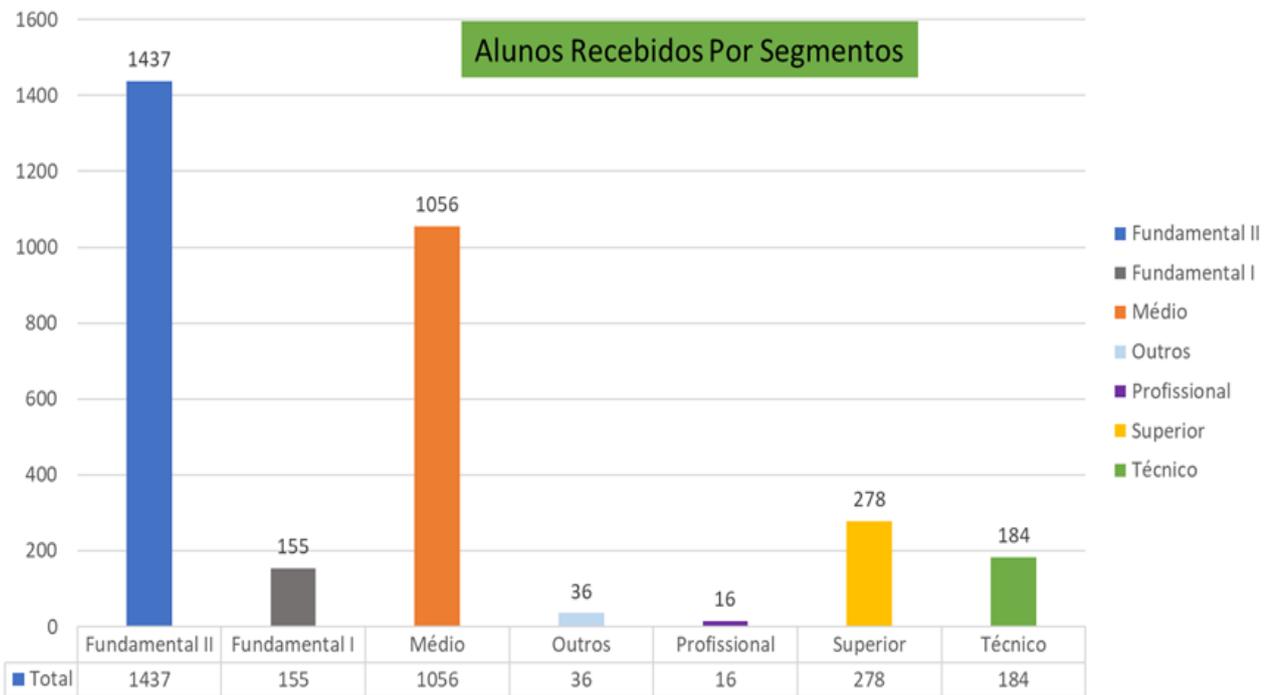


Figura 4: Gráfico alunos recebidos no CVA Laranjal divididos por segmentos da educação, no período de agosto de 2022 a dezembro de 2023.

Com o apoio ao programa Replantando Vida, foram destruídos aos visitantes 2117 mudas de árvores oriundas da mata atlântica, entre elas algumas espécies ameaçadas de extinção como o jacarandá, palmito juçara, ipê amarelo, entre outras. Essas mudas distribuídas são suficientes para cobrir uma área de 12.669,46 metros quadrados distribuídas por nove cidades da região fluminense.

A figura 5 evidencia a importância da oferta do ônibus da Cia, o qual beneficiou 76% das instituições recebidas.

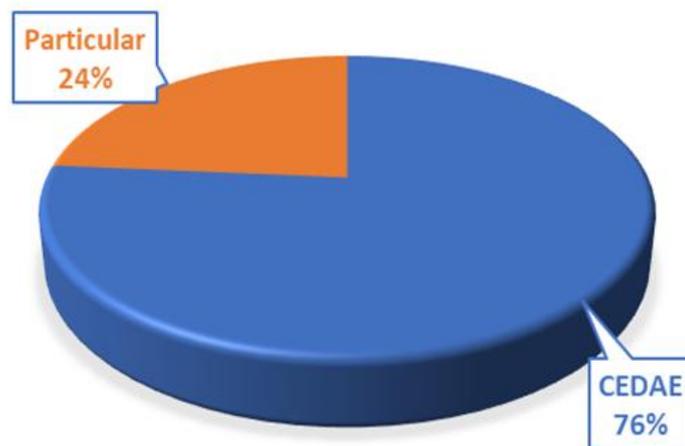


Figura 5: Gráfico uso dos transportes das visitas recebidas pelo CVA Laranjal no período de agosto de 2022 a dezembro de 2023.

Comentários finais

Em razão do exposto no presente trabalho, a reabertura do Centro de Visitação Ambiental da ETA-Laranjal se mostrou eficaz ao estabelecer conexão entre a comunidade e a Cia objetivando a disseminação de conhecimento, o trabalho paralelo com as instituições formais de ensino e ONGs no campo da Educação Ambiental e no acesso ao programa por instituições menos favorecida financeiramente, uma vez que o transporte é ofertado pela empresa às instituições públicas e ONGs.

A outra vertente do programa, as visitas da equipe CVA Laranjal às instituições, mesmo estando em fase inicial, demonstrou sinais de eficácia na medida que englobou no processo de ensino/aprendizagem, alunos de faixa etária inapropriada a estarem em uma ETA. Além de ser um instrumento potencial no desenvolvimento de indivíduos pensantes, questionadores, ativos na construção do conhecimento e, não meramente ouvintes.



Ações como essas são de extrema importância pois, apesar de existir todo um aparato legal que exija que a Educação Ambiental seja devidamente trabalhada nas escolas de maneira multidisciplinar, na realidade, o que é evidenciado é uma prática educacional aquém das expectativas.

Agradecimentos

Os autores do presente artigo gostariam de agradecer a Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro, em especial, aos senhores Fabrício José Terra Pires, Eduardo Schlaepfer Ribeiro Dantas e Paulo Henrique Pereira Reis pela confiança, respeito e todo suporte estrutural para que o projeto pudesse ser viável.

Referências Bibliográficas

BRASIL. Nações Unidas Brasil. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil/Educação de Qualidade. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/4>>. Acesso em: 06 fev. 2024.

BRASIL. Nações Unidas Brasil. Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustent%C3%A1vel>>. Acesso em: 20 fev. 2024.

BRASIL. WWF – Brasil. As Mudanças Climáticas. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/reducao_de_impactos2/clima/mudancas_climaticas2/>. Acesso em: 21 fev. 2024.

CARVALHO, I. C. M. Educação ambiental: a formação do sujeito ecológico. 2.ed. São Paulo: Cortez Editora, 2006.

Cedae. Replantando Vida. Disponível em: <<https://cedae.com.br/replantandovida>>. Acesso em: 22 fev. 2024.

Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm>. Acesso em: 19 fev. 2024.

Lei de Diretrizes e Bases da Educação. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19394.htm>. Acesso em: 23 fev. 2024.

Nações Unidas. Notícias da ONU Perspectiva Global Histórias humanas. Disponível em: <<https://news.un.org/en/story/2023/03/1134777>>. Acesso em: 06 fev. 2024.

FREIRE, Paulo. Educação e Mudança. 12. ed. São Paulo: Paz terra, 1979

Parâmetros Curriculares Nacionais. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/blegais.pdf>>. Acesso em: 23 fev. 2024.

Política Nacional de Educação Ambiental. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19795.htm>. Acesso em: 22 fev. 2024.



IMPACTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO DE COGUMELOS COMESTÍVEIS

1Milena Ricci, 2Maria Cristina Rizk

1 Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - Faculdade de Ciências e Tecnologia, câmpus de Presidente Prudente, e-mail: milena.ricci@unesp.br; 2 Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - Faculdade de Ciências e Tecnologia, câmpus de Presidente Prudente, e-mail: mc.rizk@unesp.br

Palavras-chave: Cogumelos Comestíveis, Produção Sustentável, Ecoeficiência.

Resumo

A produção de cogumelos comestíveis está em expansão no Brasil, pelo aumento do seu consumo devido à função dietética do produto. Em paralelo a isso, ações ambientalmente sustentáveis para promover melhor qualidade de vida para a população e preservar o meio ambiente são importantes de serem desenvolvidas pelas empresas. A partir da relação entre esses dois fatores, o presente estudo teve como objetivo avaliar os impactos ambientais do processo de produção de cogumelos comestíveis em uma pequena empresa e estabelecer diretrizes que orientem boas práticas ambientais na produção de cogumelos comestíveis, visando mitigar ações que levem à degradação do meio ambiente. A metodologia utilizada foi baseada na realização de acompanhamentos da rotina da produção de cogumelos, levantamento de dados referentes ao consumo de água e de energia elétrica, de geração de resíduos sólidos inorgânicos e orgânicos, de efluentes, calor e ruído. Posteriormente, foram estabelecidos os aspectos ambientais que causam ou podem causar impactos ambientais decorrentes da atividade produtiva analisada. Os aspectos que causam ou podem causar impactos ambientais no processo estudado foram avaliados de acordo com a sua significância (crítico, moderado, desprezível). Os principais resultados obtidos indicaram que a produção de cogumelos no empreendimento estudado consome e apresenta entre os seus maiores consumos de recursos naturais, por unidade de produto produzida, a água e a energia elétrica. Os impactos ambientais associados aos resíduos sólidos, efluentes, emissão de gases, ruído e calor, no empreendimento estudado, foram, em geral, considerados moderados a desprezíveis.

Introdução

O interesse pelas propriedades medicinais dos cogumelos aumentou a partir da década de 1970 e, desde então, comprova-se a função dietética dos cogumelos, sua base para o desenvolvimento de fármacos e também várias características fisiológicas. (AMAZONAS; SIQUEIRA, 2003).

O impacto dos produtos ao meio ambiente, aliado ao consumo de recursos da natureza e à geração de emissões, resíduos e poluentes, faz com que muitas empresas, atualmente, adotem diversas ferramentas e métodos para desenvolvimento de produtos sustentáveis (RIEGEL; STAUDT; DAROIT, 2012).

Nesse contexto, cada vez mais se torna importante que as empresas monitorem o consumo de recursos naturais, como água, energia, gás e outros, bem como a geração de suas emissões em termos de efluentes, resíduos sólidos e emissões gasosas, para que com esses dados as empresas possam adotar ações sustentáveis visando a mitigação ou redução dos impactos ambientais decorrentes de suas atividades.

Portanto, este estudo visou avaliar os aspectos e os impactos ambientais da produção de cogumelos Shimeji, com o propósito de reduzir, eliminar ou compensar os problemas ambientais causados na atividade.

Materiais e Métodos

A pesquisa foi realizada numa pequena empresa familiar de produção de cogumelos comestíveis, localizada no estado de São Paulo. Foi realizado um acompanhamento da rotina de atividades dos setores de produção de cogumelos, como o descarregamento da matéria prima, mistura e pasteurização do composto, inoculação, incubação, frutificação do micélio, colheita, pós-colheita, armazenamento dos cogumelos e a venda destes, para identificar e caracterizar essas etapas da produção, as entradas e saídas de cada e a interação entre elas.

O levantamento de dados quali-quantitativos, fundamentado em um estudo de campo, foi conduzido por acompanhamento e registro de relatos dos envolvidos na atividade produtiva. Foram levantados registros referentes à aquisição de matéria prima (feno, bagaço de cana, gesso, farelo de trigo, calcário e sementes de cogumelo) com base nas planilhas fornecidas pela empresa, consumo de água e energia em todas as etapas, efluentes gerados, emissão de gás carbônico, ruído, calor e quantidade de resíduos sólidos orgânicos (composto exaurido e cogumelos) e inorgânicos (embalagens plásticas) descartada. Com registros, foi possível fazer uma análise para a produção do fluxograma de entrada e saída da produção e, elaborar uma matriz de impactos ambientais.

A quantidade de resíduos sólidos orgânicos e inorgânicos gerada, foi estimada por meio de dados coletados diariamente na empresa e por pesagens dos recipientes onde os resíduos são armazenados. O consumo de água e energia elétrica foi levantado pela análise das respectivas faturas. Em relação aos efluentes gerados, foi realizada uma estimativa do volume dos mesmos, de acordo com a sua formação e descarte. As emissões atmosféricas foram aferidas no túnel de pasteurização, na sala de incubação e na sala de resfriamento e higienização dos cogumelos, com o equipamento AZ-77532 medidor de qualidade do ar interno e



temperatura – Ketech Instrument. Este aparelho também foi utilizado para medir a geração de calor nos locais de pasteurização do composto e câmaras de frutificação.

Ao reunir todas as informações dadas, foi possível identificar os aspectos e impactos que estão associados em cada processo produtivo. Em seguida, os impactos ambientais foram classificados de acordo com uma adaptação da metodologia sugerida por Moreira (2006).

Para Moreira (2006), é possível avaliar os impactos causados a partir da sua natureza, podendo ser benéfica ou adversa ao meio ambiente, e quanto a sua relevância, que se divide em abrangência, gravidade e frequência. A abrangência está relacionada à extensão do impacto e é classificada como pontual (1 ponto); local (3 pontos) ou regional (5 pontos). A gravidade considera o quanto o ambiente é capaz de suportar ou reverter o impacto e é classificada como baixa (1 ponto); média (3 pontos) ou alta (5 pontos). Já a frequência avalia a repetição do impacto, classificada como baixa (1 ponto); média (3 pontos) ou alta (5 pontos).

A relevância do impacto é calculada pela soma dos pontos da em abrangência, gravidade e frequência, sendo desprezível (3 pontos); moderada (5 a 7 pontos); e crítica (9 a 15 pontos).

Resultados e Discussões

Descrição da Produção

No cultivo de cogumelos da empresa estudada são necessários 71 dias para completar cada ciclo de produção, que consiste em descarregamento e armazenamento da matéria prima, mistura da matéria prima com nutrientes, pasteurização do composto, inoculação, incubação, frutificação do micélio, colheita, pós-colheita, expedição e vendas.

O local possui um pátio coberto com uma sala de pasteurização, onde ocorrem as etapas de armazenamento da matéria prima, mistura da matéria prima com nutrientes, pasteurização e inoculação, também contém seis salas de cultivo, sendo utilizadas apenas uma para cada produção. No processo de pós-colheita há uma sala com refrigeração, na qual é realizada a limpeza, armazenamento, embalagem e expedição dos cogumelos.

Na produção, são utilizados subprodutos (resíduos finais da agricultura) como substrato base. Na empresa estudada, são aproveitados feno misturado com bagaço de cana e estas matérias primas são estocadas em locais secos para que não embolorem com fungos competidores.

O feno e o bagaço secos são levados de caminhão pelos fornecedores até a empresa e são deixados em área descoberta na propriedade. É usado um trator com uma concha e uma carreta para puxar a matéria prima do campo até o pátio coberto (barracão). O trator consome combustível, emitindo consequentemente gás e também gera ruído.

Após, ocorre a formação do substrato ao decorrer de sete dias, em que os subprodutos (feno e bagaço de cana) são misturados com calcário, farelo de trigo e gesso com o auxílio de um misturador elétrico, que consome energia e gera ruído. Utiliza-se novamente o trator para auxiliar na mistura e organização do composto no pátio, com os mesmos consumos e emissões citados. Essa mistura permanece por uma semana no pátio de compostagem a uma temperatura alta e essa temperatura se dá devido a degradação dos mesófilos na mistura, gerando calor no local pelo vapor. A partir desse momento a água é adicionada para que haja um percentual de umidade de 70%. Umidificar a mistura favorece reações biológicas para os microrganismos aeróbios mesófilos crescerem, começarem a degradar a matéria iniciando a termogênese e consequentemente aumentando a temperatura da massa. Não se pode encharcar o composto para não elevar demais o nível de oxigênio no mesmo e para favorecer organismos termófilos que também farão parte da degradação. Estes organismos irão elevar ainda mais a temperatura do composto.

Por apenas umedecer a mistura, a água no pátio evapora, porém, uma vez por mês é feita a higienização do pátio/“sauna” com água e sabão, gerando efluentes.

O composto é levado por trator para uma esteira elétrica no período da manhã, que alimenta o pasteurizador, onde o composto é submetido a vapor e com pressão homogênea no decorrer de um dia. A massa esquenta de 39° até 65°C, porém não chega na temperatura adequada de pasteurização. Em seguida, ocorre a pasteurização por um dia dentro da “sauna” onde a temperatura continua a 65°C e elimina os microrganismos que são maléficos para o composto.

No terceiro dia ocorre o resfriamento da massa por 12 horas com a ajuda de um ventilador até atingir a temperatura para o desenvolvimento dos microrganismos termófilos, fase essa chamada de condicionamento. Nas outras 12 horas do dia, começa a manobra para chegar a 53°C, não podendo entrar qualquer fluxo de ar de fora para dentro do ambiente. O composto permanece na sala de pasteurização por três dias consecutivos para eliminar outros tipos de microrganismos termófilos em temperatura de 50°C. Ao término desse terceiro dia, ocorre o rebaixamento da temperatura para temperatura ambiente, ou seja, de 22 a 25°C em 24 horas, ocasionando a morte de alguns microrganismos termófilos e inativação de outros, momento que é feita a inoculação do composto. É necessária a utilização de água em vapor nessa etapa, gerando calor e efluentes. Ocorre também o consumo de energia elétrica para o funcionamento da esteira e do gerador de vapor, emissão de ruído devido na esteira e trator, e emissão de gás carbônico pela queima de combustível do trator.

Após a pasteurização, no dia seguinte de manhã, acontece a inoculação de sementes de cogumelo (shimeji cinza, ou shimeji branco ou cogumelo salmão), em que o composto é retirado da sala de pasteurização pelos funcionários com a ajuda de uma pá e é inserido manualmente junto com as sementes em sacolas plásticas furadas. Vale ressaltar que a “sauna” nesse momento já está em temperatura ambiente.

Os sacos, com média de 7 kg de composto tratado por saco, são levados por trator com carreta à sala de cultivo, com consumo de combustível e emissão de gás e ruído. A sala de cultivo possui condições controladas e adequadas de temperatura, umidade e luz. Os sacos são alocados em prateleiras de cultivo verticais, ou de ferro e ou de bambu com madeira. Essa fase é



essencial, pois a partir dela que o composto pode ser colonizado pelo micélio e formar cogumelos. Na inoculação não se usa água, portanto, não gera efluentes, não tem consumo de energia elétrica e não gera calor.

Na incubação, ocorre a expansão do micélio em 17 dias, após isso o substrato estará todo coberto pelo micélio. O micélio libera o gás carbônico e o local fica em uma temperatura de aproximadamente 28°C, importante para continuidade do crescimento micelial e para não aumentar a quantidade de microrganismos durante a incubação. Já a concentração de O₂ no local é baixa e também é utilizada pelo micélio.

Durante a incubação, as salas de cultivo ficam na ausência de luz, condição essencial para determinar a qualidade dos corpos de frutificação (DIAS et al., 1999). Os funcionários podem ficar 15 minutos no máximo nesse ambiente para manejar os sacos e umedecer o chão, devido ao nível de gás. Não se utiliza energia elétrica nessa fase, ocorre emissão de gás carbônico, emite-se um baixo calor e não há emissão de ruído.

A água é utilizada durante essa fase para umedecer o chão três vezes ao dia (o equivalente a 60% da sala umedecida), então não gera efluentes. Porém, para a higienização da sala após a próxima etapa (frutificação) no fim do ciclo produtivo, a água é adicionada com sabão e jogada em todo o ambiente, gerando efluentes.

A frutificação acontece quando o substrato, em sua totalidade, está colonizado pelo micélio. Essa fase é diferente da incubação, porque não há necessidade de ventilação, já que o CO₂ precisa ficar com nível baixo para o micélio não se deformar, o local fica em temperatura ambiente e as salas não ficam totalmente escuras, pois as janelas trazem claridade. A umidade presente na sala é dada pelo próprio cogumelo, não sendo necessária muita água para realizar a nebulização (banho de 80% de vapor), que ocorre com a utilização da bomba de nebulização. Assim que o substrato estiver exaurido e não frutificando, é descartado.

Utiliza-se energia elétrica para o funcionamento da nebulização e iluminação para a colheita a noite, não há emissão de ruído, de calor e de gás carbônico. O diferencial desse processo é que, por ser o último do ciclo, acaba com grande quantidade de composto exaurido e então acumula matéria orgânica seca, também resta matérias inorgânicas (sacos plásticos usadas para envolver o composto). A água é usada para a nebulização e para a higienização da sala, onde é adicionada com sabão e jogada em todo o ambiente, gerando efluentes. No total, são 40 dias de frutificação.

A partir desse processo é realizada a colheita três vezes ao dia dos cogumelos em cestas que, quando cheias, são tapadas com panos e levadas a uma sala de pós-colheita com câmara fria para impedir o contínuo amadurecimento e crescimento dos cogumelos. Depois de algumas horas, os cogumelos são retirados da câmara fria, levados para a limpeza, pesagem, organização dos cogumelos em bandejas de isopor, e em sacolas plásticas de quilo.

As bandejas de isopor são levadas à uma máquina para serem embaladas com plástico filme e então são rotuladas de acordo com a espécie do cogumelo e encaixotadas para comercialização. Essa embaladora gera ruído na sala.

As bandejas de colheita são lavadas frequentemente com água e detergente para manter a higiene necessária e a sala é limpa duas vezes por semana com água e sabão, gerando efluentes. A energia elétrica é usada para manter o refrigerador ligado, e também para o ar-condicionado e iluminação da sala. Não há emissão de calor e de gás carbônico. Ocorre acúmulo de matéria orgânica (cogumelos que estão extremamente maduros e os que caem no chão) e de matéria inorgânica (rolos vazios de etiquetas e embalagens danificadas). As bandejas de cogumelo após serem rotuladas de acordo com a espécie do cogumelo e encaixotadas de acordo com cada destino para comercialização, em veículo, que consome combustível e emite gases.

Caracterização das entradas e saídas

Na Tabela 1 é possível observar os setores da produção de cogumelo e o volume de água consumido no decorrer de um ciclo produtivo, que é equivalente a setenta e um dias.

Preparação do composto (1 ciclo)	Volume consumido (L)
Por composto - confecção	4500
Limpeza do túnel de pasteurização	50
Limpezas em geral na pasteurização	50
Total = 4600	
Sala de cultivo de cogumelos	Volume consumido (L)
Nebulização	3000
Limpeza do chão	50
Total = 3050	
Pós-colheita (1 ciclo)	Volume consumido (L)
Limpeza de vasilhas	60
Limpeza do chão e banheiro	20
Total = 80	

Tabela 1 - Consumo de água em um ciclo produtivo



O uso total de água em todo o processo foi de 7730 litros de água, o equivalente a 5 litros de água por quilo de cogumelo, já que cada sala produz 1.500 kg de cogumelos.

Os dados do consumo de energia elétrica, em kW/hora e em kW de cada setor da empresa estão apresentados na Tabela 2.

Preparação do Composto	Tempo (h)	Consumo diário (kWh)	Consumo por ciclo (kW)
Máquina de virar composto	2	6,615	79,38
Enchimento do Túnel - Esteira	1,5	2,205	3,31
Dentro do Túnel - Ventilador	144	1,47	105,84
Dentro do Túnel - Sauna	48	18	864
Total = 1052,53			
Colheita	Tempo (h)	Consumo diário (kWh)	Consumo por ciclo (kW)
Bomba de Nebulização	150	1,47	220,5
Lâmpadas	15	39,69	238,14
Bomba de alta pressão (limpeza)	2	1,47	2,94
Total = 461,58			
Pós-colheita	Tempo (h)	Consumo diário (kWh)	Consumo por ciclo (kW)
Câmara fria	225	1,47	330,75
Lâmpadas	150	52,92	423,36
Ar-condicionado	12	51,4	616,8
Máquina de embalar bandeja	0,5	25	12,5
Total = 1383,41			
Bombeamento de água	Tempo (h)	Consumo diário (kWh)	Consumo por ciclo (kW)
Bomba do poço	300	1,47	441
Total = 441			

Tabela 2 - Consumo médio de energia nos setores por ciclo produtivo

Constatou-se o consumo de 3338,5 kW nos 71 dias corridos.

Em termos de resíduos sólidos, somando-se a quantidade de cogumelos amadurecidos e de composto exaurido, resulta-se em 4.312 quilos de resíduos sólidos orgânicos, usado em adubação e alimentação de bovinos. Em termos de recicláveis, tem-se, por ciclo, 1290 bandejas e etiquetas; 1 bobina de 1000 metros e 322 sacolas de embalagens de resíduos, devidamente reciclados.

Com o acompanhamento da empresa, foi analisado que os maquinários e automóveis referentes ao setor de armazenamento, mistura e pasteurização do composto não possuem ruídos elevados, bem como na sala de pós-colheita com a embaladora, mesmo sendo um ambiente fechado. De qualquer forma, os funcionários que trabalham nesses locais utilizam EPI's (Equipamentos de proteção individual) por segurança, tais como luvas e protetores auriculares.

A respeito do lançamento de gás carbônico na atmosfera (CO₂) com base nesses veículos, observou-se o uso de diesel como combustível. De acordo com Magalhães e Remédio (2014, p. 110), a emissão mássica de dióxido de carbono do diesel é dada por 3,2 quilos por litro e do etanol 0,56 quilos de CO₂ por litro. Portanto, ao multiplicar o litro total gasto de combustível, o primeiro trator emitiu 416 quilos de CO₂, já o segundo trator 256 quilos de CO₂ e o automóvel refrigerado 280 quilos de CO₂. O total de emissão de gás carbônico na atmosfera, somando o resultado dos três automóveis foi de 952 quilos.

Os cogumelos também liberam CO₂ na pasteurização do composto, incubação a frutificação dos cogumelos, cerca de 8800 ppm (partes por milhão), ou seja, convertendo em quilogramas seria 0.0087899592 quilos de CO₂.

Aspectos e Impactos Ambientais

O Quadro 1 foi elaborado com o intuito de sintetizar as atividades, dos aspectos e dos impactos ambientais da produção, a fim de posteriormente empregar variáveis para a avaliação desses impactos.



Atividade / Meio	Aspecto ambiental	Impacto ambiental	Avaliação dos Impactos					
			Nat	Abran	Grav	Freq	Inten	Sig
Descarregamento e armazenamento de matéria prima	Uso de automóvel - Trator	Emissão de ruídos	A	1	1	1	3	D
	Consumo de combustível	Emissão de gás carbônico	A	3	3	1	3	M
Mistura com nutrientes	Uso de automóvel - Trator	Emissão de ruído	A	1	1	1	3	D
	Consumo de combustível	Emissão de gás carbônico	A	3	3	1	3	M
	Maquinários	Emissão de ruído	A	1	1	1	3	D
	Consumo de energia elétrica	Redução da disponibilidade de recursos naturais	A	3	3	5	5	C
	Consumo de água	Redução da disponibilidade de recursos naturais	A	5	5	1	5	C
	Geração de efluentes	–	A	–	–	–	–	D
Pasteurização	Uso de automóvel - Trator	Emissão de ruído	A	1	1	1	3	D
	Consumo de combustível	Emissão de gás carbônico	A	3	3	1	3	M
	Maquinários	Emissão de ruído	A	1	1	1	3	D
	Consumo de energia elétrica	Redução da disponibilidade de recursos naturais	A	3	3	5	5	C
	Consumo de água	Redução da disponibilidade de recursos naturais	A	5	5	1	5	C
	Geração de efluentes	–	A	–	–	–	–	D
Inoculação	Uso de automóvel - Trator	Emissão de ruído	A	1	1	1	3	D
	Consumo de combustível	Emissão de gás carbônico	A	5	3	1	3	M
Incubação	Consumo de água	Redução da disponibilidade de recursos naturais	A	5	5	5	5	C
Frutificação do micélio	Consumo de energia elétrica	Redução da disponibilidade de recurso naturais	A	3	3	5	5	C



	Emissão de vapor de água	Geração de calor e redução da disponibilidade de recursos naturais	A	5	3	5	5	C
Colheita e pós-colheita	Embalagens plásticas	–	A	–	–	–	–	D
	Maquinários	Emissão de ruído	A	1	1	5	3	M
	Consumo de energia elétrica	Redução da disponibilidade de recursos naturais	A	3	5	5	5	C
	Resíduos sólidos orgânicos	–	A	–	–	–	–	D
	Resíduos sólidos inorgânicos	–	A	–	–	–	–	D
Armazenamento refrigerado	Consumo de energia elétrica	Redução da disponibilidade de recursos naturais	A	3	3	5	5	C
Expedição e vendas	Consumo de combustível	Emissão de gás carbônico	A	5	3	1	3	M
Higienização	Consumo de água	Redução da disponibilidade de recursos naturais	A	5	5	3	5	C
	Geração de efluentes	Alteração da qualidade da água	A	3	3	3	3	M
		Alteração da qualidade do solo	A	3	3	3	3	M
		Sobrecarga do sistema público de tratamento	A	3	3	3	3	M

Quadro 1 - Aspectos e impactos ambientais

Considerações finais

Após a realização de um diagnóstico do sistema de produção da empresa estudada, foi observado que a quantidade gerada de efluentes líquidos é devido a higienização das salas de produção e pós-colheita, por isso foi considerada como não significativa.

Parte dos resíduos orgânicos, que são os cogumelos extremamente maduros, são levados para alimentação de bovinos numa outra propriedade da empresa e a outra parte referente ao composto exaurido, é encaminhado para adubação na plantação de seringueira. Os resíduos inorgânicos, isto é, recicláveis gerados são enviados para reciclagem.

A geração de calor no ambiente interno de trabalho, as emissões de dióxido de carbono e as emissões de ruído foram pouco significativas na atividade produtiva estudada.

O estabelecimento consome grande volume de água. Também há consumo considerável de energia elétrica em várias etapas do processo, para se preparar o composto, pasteurizá-lo e nas salas de produção e pós-colheita.

Sendo assim, em termos de soluções ambientais mais sustentáveis e com custo-benefício atrativo para o empreendimento analisado, seria necessária a substituição de energia elétrica por energia solar, bem como o investimento na construção de cisternas para o acúmulo, armazenamento e futuro uso de águas pluviais.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica da Unesp (PIBIC) – Processo n. 11667/2023 e à Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho pelo apoio financeiro.



Referências Bibliográficas

AMAZONAS, M. A. L. A., SIQUEIRA, P. **Champignon do Brasil (*Agaricus brasiliensis*):** Ciência, Saúde e Sabor. EMBRAPA, Colombo – Paraná, 2003.

DIAS, E. S., GONTIJO, C. R. L. **Cultivo de cogumelos comestíveis (“Shiitake” e “Hiratake”).** UFLA. 35p., 1999.

MAGALHÃES, H. N; REMÉDIO, R. C. Estimativa da emissão anual de CO₂ pela frota da Unicamp e quantidade de árvores necessárias para “compensar” essa emissão. **Revista Ciências do Ambiente On-Line**, v. 10, n. 2, p. 109-110, 2024.

MOREIRA, M. S. 2006. **Estratégia e Implantação do Sistema de Gestão Ambiental:** modelo ISO 14000. 3. ed., Editora de Desenvolvimento Gerencial.

RIEGEL, I. C., STAUDT, D., DAROIT, D. Identificação de aspectos ambientais relacionados à produção de embalagens de perfumaria: contribuição para projetos sustentáveis. **Gestão & Produção**, v. 19, n. 3, p. 633–645, 2012.



ANÁLISE DOS DADOS QUANTO A COLETA E TRATAMENTO DE ESGOTO NO BRASIL

1Gabriel Sousa Prates, 2Marina Gadens Berton Zaika.

1 Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG, e-mail: gabrielsousaprates15@gmail.com; 2 Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG, e-mail:marina_gadens@hotmail.com

Palavras-chave: Esgoto, Coleta, Tratamento, Saneamento Básico.

Resumo

Mundialmente, a Organização das Nações Unidas estima que 4,2 bilhões de pessoas vivem sem saneamento básico, levando à morte de mais de 800 crianças diariamente. No Brasil, a estimativa é que 44% da população viva sem acesso a redes de coleta de esgoto sanitário, contabilizando mais de 89 milhões de habitantes. A falta de coleta e tratamento dos esgotos gerados pode provocar diversos danos ambientais e de saúde pública, aumentando o número de doenças como cólera e diarreia, diminuindo a expectativa e a qualidade de vida da população. O saneamento no Brasil é regido unicamente pelas Leis n.º 11.445:2007 e n.º 11.026:2020, definidas como Marcos Legais de Saneamento, aliado com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Como instrumento norteador, O Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento – SNIS disponibiliza dados ao nível nacional das condições existentes no país. Onde em 2023, o índice de coleta de esgoto total, segundo o SNIS, era de 56%, variando entre as regiões, indo e 14,7% para o Norte, até 80,9% para a região Sudeste, contudo, de todo o esgoto coletado, apenas 52,2% recebe o devido tratamento, o que faz com que 70,77% de todo o esgoto seja descartado de maneira irregular, trazendo grande prejuízo para o meio ambiente, fauna, flora e a própria saúde pública.

Introdução

Mundialmente, estima-se que 4,2 bilhões de pessoas não possuem acesso a saneamento básico, especialmente ao tratamento do esgoto gerado, podendo, em dias de cheias, enchentes e inundações, contaminar poços de água e fontes coletoras de água potável, além de danificar esgotos e fossas, levando dejetos humanos para o meio ambiente, contaminando corpos hídricos, plantações e águas subterrâneas, causando além do prejuízo ambiental, aumento no número contaminações e doenças como a cólera e a diarreia, provocando, segundo as Nações Unidas (2020) a morte de mais de 800 crianças diariamente (FOGAÇA. 2023; NAÇÕES UNIDAS, 2020).

No Brasil, de acordo com dados do Ministério do Desenvolvimento Regional (2023), 44% da população não possui acesso a redes públicas de coleta e tratamento de esgoto (FOGAÇA. 2023), No qual, o esgoto gerado muitas vezes tem como destinação final rios e corpos d'água, tendo tratamento ou não, considerado uma das principais fontes poluidoras dos corpos hídricos, além de comprometer a qualidade da água disponível, também prejudica o equilíbrio ambiental, flora e fauna, disseminando a contaminação, podendo incluir bactérias, vírus e patógenos causadores de doenças nesses ambientes (SNIS, 2023).

Além disso, a falta de saneamento causa problemas para a população de forma geral, expondo principalmente regiões mais vulneráveis, aumentando a exposição e índices de problemas de sociais, impactando a saúde, a educação, força de trabalho e entre outras áreas da sociedade (FOGAÇA. 2023).

Ainda, segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (2023), do esgoto coletado no Brasil, pouco mais da metade, 52,2% recebem o tratamento adequado, mostrando a necessidade de maiores investimentos públicos para a melhora do índice. (SNIS, 2023).

Ademais, vale o destaque que o investimento no saneamento básico é crucial na sociedade, já que cada R\$1 investido em saneamento equivale a uma economia de R\$4 na área de saúde, proporcionando uma melhora na qualidade de vida e uma redução nos impactos ambientais gerados pela humanidade, especialmente a população brasileira (CNBB, 2015).

Assim, este trabalho visa a análise das informações com indicadores históricos e atuais Referentes ao esgotamento sanitário do Brasil, disponibilizados pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS, com vistas ao alcance das metas do Marco regulatório e dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas. Sendo isso, pautado na justificativa da discrepância entre os índices de coleta por macrorregião, buscando apresentar as regiões que mais necessitam de realojamento de recursos, buscando o desenvolvimento sustentável, a redução do impacto ambiental e a melhora da qualidade de vida urbana.

Referencial Teórico

De acordo com NBR 9648 (ABNT, 1986), esgoto sanitário é definido como o “despejo líquido constituído de esgotos doméstico e industrial, água de infiltração e a contribuição pluvial parasitária”. Ou seja, todo o esgoto sanitário é a junção dos esgotos de cada um dos setores contribuintes, sendo:

“esgoto doméstico - despejo líquido resultante do uso da água para higiene e necessidades fisiológicas humanas”; esgoto industrial é o “despejo líquido resultante dos processos industriais,



respeitados os padrões de lançamento estabelecidos”; água de infiltração é “toda água proveniente do subsolo, indesejável ao sistema separador, que penetra nas canalizações”; contribuição pluvial parasitária é “a parcela do deflúvio superficial inevitavelmente absorvida pela rede de esgoto sanitário”.” (ABNT NBR 9648, 1986).

Já rede coletora de esgoto pode ser definida como, de acordo com Sobrinho & Tsutyia (1999):

“Conjunto de canalizações destinadas a receber e conduzir os esgotos dos edifícios; o sistema de esgotos predial se liga diretamente à rede coletora por uma tubulação chamada coletor predial. A rede coletora é composta de coletores secundários, que recebem diretamente as ligações prediais, e, coletores troncos. O coletor Tronco é o coletor principal de uma bacia de drenagem, que recebe a contribuição Dos coletores secundários, conduzindo seus efluentes a um interceptor ou emissário” (SOBRINHO & TSUTYIA, 1999).

Enquanto os sistemas de coleta atualmente utilizados, se dividem em 3 (três) categorias, sendo: separador absoluto, sistema unitário/combinado ou o sistema separador parcial/misto, ligado ou não o sistema as Estações de Tratamento de Esgoto - ETE (MDR, 2021).

O sistema separador absoluto tem como princípio a adoção de rede coletora exclusivamente para esgoto sanitário (residencial e industrial, e águas de infiltração), separando as redes de água pluvial e esgoto. Isso viabilizou alguns projetos em países em desenvolvimento em função do emprego de tubulações com diâmetros menores, implicando em custos mais baixos (SOBRINHO; TSUTYIA, 1999). A opção pelo uso do sistema separador absoluto também é mais compatível em climas tropicais onde incidência e o volume de chuvas é maior, sendo esse o sistema mais empregado no Brasil (SOBRINHO; TSUTYIA, 1999).

Já o sistema unitário é reunir tanto esgoto sanitário (residencial e industrial) como águas pluviais e de infiltração. Também foi adotado como alternativa de drenagem de áreas alagadas e, portanto, prevê a incorporação de água de drenagem do subsolo, esse modelo é adotado majoritariamente em países da Europa e nos Estados Unidos da América (SOBRINHO; TSUTYIA, 1999).

E para o sistema misto/parcial, também conhecido como híbrido, o esgoto é transportado juntamente com uma parcela das águas de chuvas numa canalização única. O sistema separador parcial decorre de junção entre sistemas antigos (unitários) com os sistemas mais recentes (separador), ou seja, adaptações de sistemas conjuntos ou ainda da transição do sistema coletor unitário para o sistema separador absoluto, pode ser também, sistemas que estão sendo atualizados, juntando sistemas antigos com novos (SOBRINHO; TSUTYIA, 1999).

Já quanto ao tratamento, se torna variável a depender da região e ao tipo de esgoto tratado, utilizando 3 etapas de tratamento, primário, secundário e terciário, que englobam métodos físicos e químicos como filtragem, desinfecção e sedimentação demonstrados na Figura 1 (FERREIRA; GARCIA, 2017).

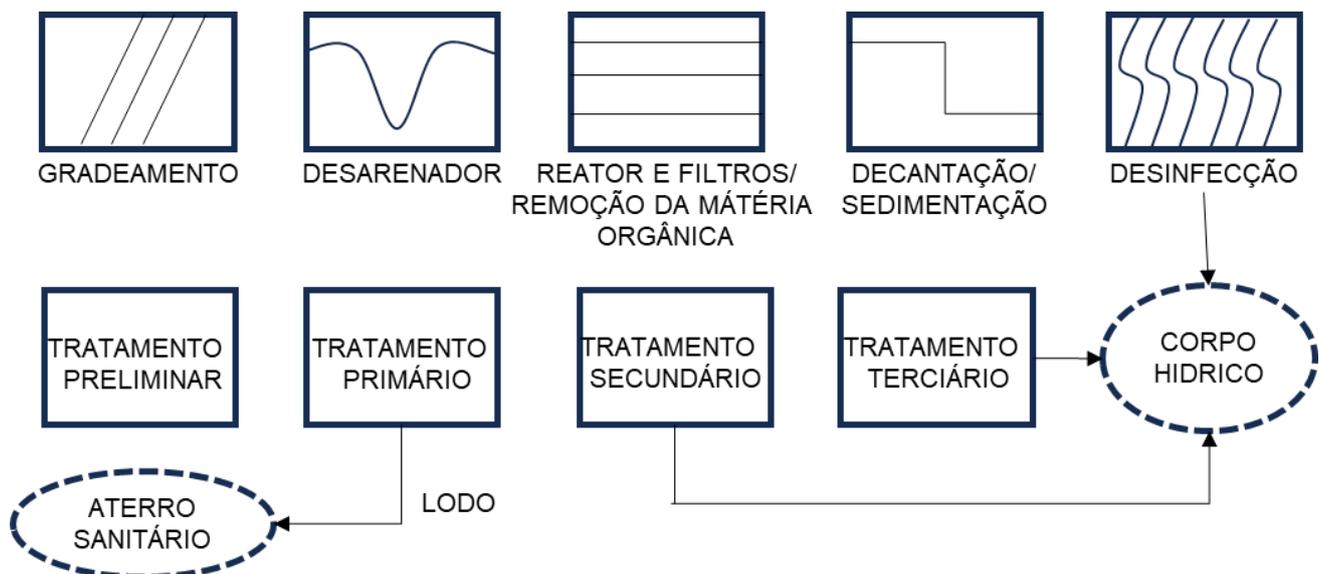


Figura 7 - Etapas de tratamento. Fonte: Ferreira; Garcia (2017). Editado pelo autor (2024).

Regulamentação

Como primeiro marco regulatório, o Plano Nacional de Saneamento – PLANASA em 1971, sustentado e gerido pelo Banco Nacional de Habitação – BNH e comandado pelo Ministério do Interior, visava a criação de campanhas estaduais sobre saneamento básico, estabelecendo pela primeira vez no Brasil, políticas nacionais voltadas para saneamento e definindo regulamentações tarifárias dos serviços, mesmo que de maneira inicial, promovendo a autossustentação financeira



do sistema, buscando alcançar a meta de 50% da população a coleta e tratamento de esgoto, onde o país investiu mais de 4,7 bilhões de dólares para a evolução no setor, durando até o ano de 1986 quando ocorre a extinção do BNH, provocando o fim do financiamento e controle do PLANASA, deixando o país sem regulamentação na questão de saneamento básico (BRASIL, 2008).

Após 21 anos sem um controle regulamentar definido, surge como Marco Nacional Regulatório, a Lei nº 11.445 de 5 de janeiro de 2007, que apresenta definições quanto ao saneamento e estabelece diretrizes para a prestação do serviço, identificando especificações quanto a infraestruturas, instalações operações e o serviço propriamente dito, englobando o abastecimento de água, esgotamento sanitário e manejo de resíduos sólidos urbanos (BRASIL, 2007).

Em seguida, após 6 anos é lançado o Plano Nacional de Saneamento Básico – PNSB ou PLANSAB, ainda regido pela Lei nº 11.445/2007. Documento elaborado pelo Ministérios das Cidades e pela Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental trazendo aprimoramentos Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), tendo como objetivo realizar uma análise situacional no país, elaboração de cenários futuros, metas de curto, médio e longo prazo, necessidades de investimentos, monitoramento e avaliação dos sistemas e entre outros, trazendo dados para consulta pública, e novos dados norteadores do desenvolvimento nacional (BRASIL, 2014). Vale destacar, que segundo o Ministérios das Cidades, o PLANSAB está atualmente em processo de revisão para a atualização das metas, dados e diretrizes, atrasado desde 2019 por conta da pandemia da COVID-19, mas em processo de finalização para o lançamento (BRASIL, 2023).

Já como normativa mais recente, tem-se a Lei nº 11.026 de 15 de julho de 2020, que tem como foco atualizar o Marco Legal de Saneamento Básico e para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para instituir normas de referência para a regulação dos serviços públicos de saneamento básico, para aprimorar as condições de saneamento básico no país, e entre outras diretrizes (BRASIL, 2020).

Histórico

As primeiras redes coletoras de esgoto são datadas do século 6 a.C. na Cloaca máxima em Roma, onde se retiravam os dejetos humanos das áreas centrais da cidade por condutos superficiais, levando os mesmos para uma área mais distante. Com o tempo, os sistemas foram se desenvolvendo conforme as áreas urbanas cresciam, principalmente com a chegada das crises de saúde como a grande peste do século XIV, que fez com que as autoridades tomassem medidas para diminuir a incidência de doenças nas cidades, assim, dando maior atenção para o esgoto (SOBRINHO & TSUTYIA, 1999).

Um dos sistemas mais promissores, surgiu em Hamburgo, na Alemanha, no ano de 1842, que possibilitava a retirada de águas pluviais, domésticas e eventualmente industriais, futuramente chamado de sistema unitário de esgotamento; o sistema foi tão eficiente que foi adotado internacionalmente. Já em 1879, o Eng. George Waring propõe um sistema que separe esgoto e águas pluviais, denominado sistema separador absoluto, fazendo com que os custos de implantação dos sistemas de coleta sejam drasticamente reduzidos (SOBRINHO & TSUTYIA, 1999).

No Brasil, um dos primeiros se estabeleceu no rio de janeiro, antes da distribuição de água, onde em 1863, por concessão firmada, o governo optou por contratar o serviço de limpeza das casas da cidade e do esgoto, dando os primeiros passos para o saneamento básico nacional (MDR, 2021). Onde apenas no início do século XIX, foram implantadas as primeiras canalizações no país, em importantes cidades brasileiras, sendo utilizados os primeiros sistemas separadores no país (MDR, 2021).

O sistema mais empregado, segundo Sobrinho e Tsutiya (1999), no Brasil é o separador absoluto, pois o sistema unitário onera excessivamente o custo de tratamento de esgoto, além de exigir altos investimentos no empreendimento por diversas particularidades construtivas. Em concordância, o Ministério do Desenvolvimento Regional (2021) diz que, no Brasil, geralmente, adota-se o sistema separador absoluto. Com isso, realizam-se obras de menores porte e custo para sua implantação, pois a vazão a ser considerada no projeto é menor (MDR, 2021).

Metodologia

O trabalho foi desenvolvido com base em estudos bibliográficos e dados estatísticos governamentais, para tais dados, foram utilizados os anuários estatísticos do governo federal, com informações oficiais sobre o índice de coleta e tratamento de esgotos no país, englobando as grandes regiões: Norte, Nordeste, Centro-oeste, Sudeste e Sul. Sendo utilizando os últimos dados disponibilizados, em dezembro de 2023 por sistemas oficiais, especialmente o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS, disponível na plataforma do Ministérios das Cidades e administrado pela Secretaria Nacional de Saneamento - SNS do Ministério do Desenvolvimento Regional – MDR.

Os dados disponibilizados no SNIS, foram escolhidos por ser de uma plataforma de domínio público que engloba dados relacionados ao saneamento junto com dados disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, do último Censo, realizado em 2022.

Assim, tornando os dados disponibilizados pelo SNIS, como norteador para a avaliação do desempenho do Saneamento Básico no Brasil, utilizados de forma crítica nesse trabalho. Onde os indicadores foram comparados com vista em identificar os avanços alcançados pelos municípios, tais como: a população efetivamente atendida pelos serviços de esgotamento sanitários, índice de tratamento regional e nacional da população urbana, extensão da rede, quantidade de unidade consumidores e entre outros. Permitindo, dessa maneira compreender a dinâmica do saneamento básico no Brasil, além de oferecer um direcionamento importante para futuros investimentos públicos no setor, comparando as grandes regiões e determinado a de maior necessidade de atenção.



Resultados e Discussão

Utilizando como base os dados disponíveis no site do Governo Federal, sintetizados pelo Sistema Nacional De Informações Sobre Saneamento - SNIS (2023) em parceria com o IBGE (2022), onde foram avaliados 5.150 municípios, um total de 92,5% dos 5.570 existentes no país, e abrangendo uma população amostral de 198,0 milhões, tal qual, representando 97,5% da população total no país, de 203.080.759 milhões em 22 de dezembro de 2023 (IBGE, 2023), distribuídos nas grandes regiões, conforme Figura 2.

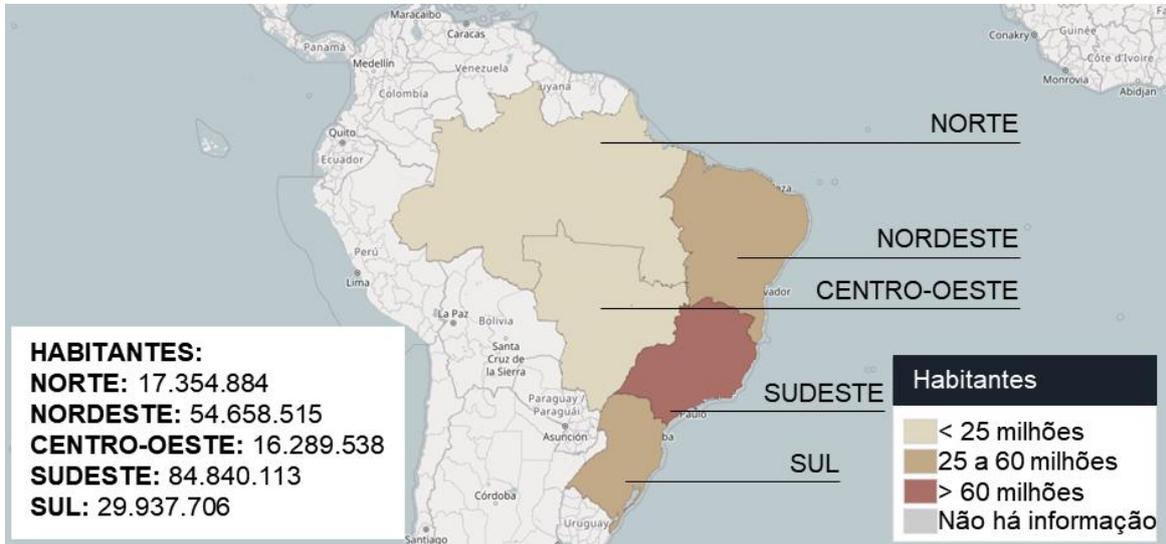


Figura 8 - População Brasileira, Censo de 2022 atualizado em 2023. Fonte: IBGE (2023). Editada pelo autor (2024).

Outro ponto a ser destacado, é que segundo Kawajima Et Al (2020), no quesito saneamento, os municípios se dividem em dois grupos, com população abaixo ou acima de 50 mil habitantes, assim, direcionando a responsabilidade para os órgãos administrativos, seja municipal ou de esferas superiores (KAWAJIMA Et al, 2020). No Brasil, a Fundação Nacional de Saúde, vinculada ao Ministério da Saúde, é encarregada das iniciativas de saneamento em municípios com menos de 50 mil habitantes. Por outro lado, a coordenação das ações de saneamento básico em municípios com mais de 50 mil habitantes é de responsabilidade da Secretaria Nacional de Saneamento, pertencente ao Ministério do Desenvolvimento Regional, estes distribuídos de maneira orgânica pelo território nacional, conforme Figura 3 (KAWAJIMA Et al, 2020).

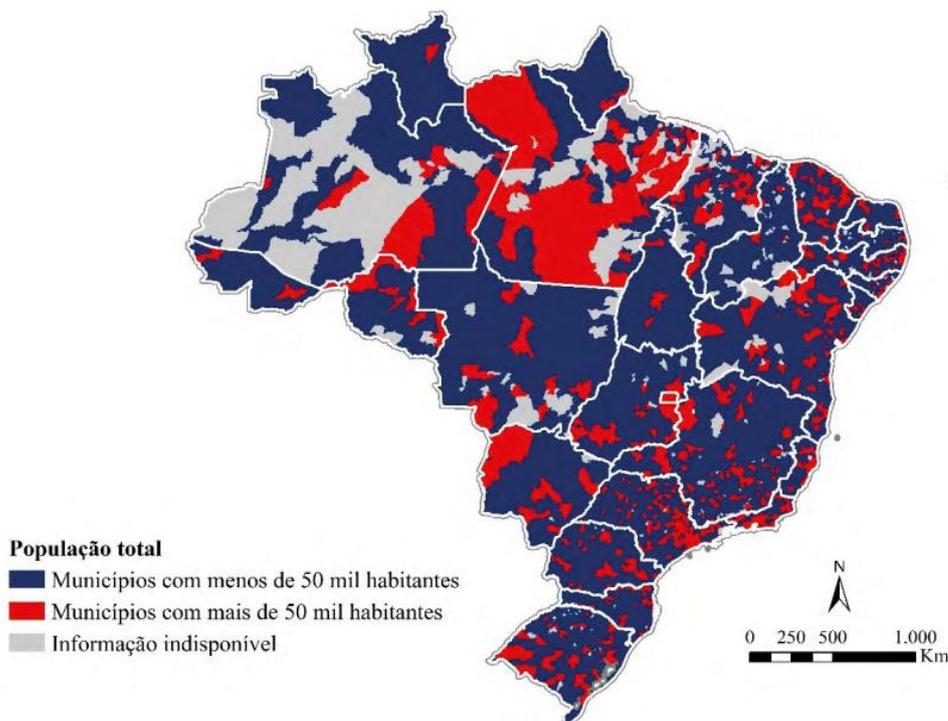


Figura 9 - Municípios classificados em maiores ou menores de 50 mil Habitantes em 2020. Fonte: SNIS, 2019. Adaptado por KAWAJIMA Et Al, 2020.



Onde, no mesmo ano, 650 municípios com mais de 50 mil habitantes representavam 69% da população brasileira, enquanto, 4.625 municípios abrigavam 31% da população total, distribuídos conforme a Figura 4 (KAWAJIMA Et al, 2020).

Além disso, os índices de esgotamento sanitário são menores para o conjunto de municípios com menos de 50 mil habitantes, onde apenas 29% da população apresenta condições de ter esgotamento sanitário, já nos municípios com mais de 50 mil habitantes, a taxa passa para 62,3% de atendimento (KAWAJIMA Et al, 2020).

Atualmente, dos 5.150 municípios estudados em 2023, apenas 56,3% ou 2.902 contam com sistemas públicos de esgotamento sanitário, levando atendimento a mais de 112,8 milhões de habitantes, enquanto 43,7% ou 2.248 municípios utilizam alternativas como a fossa séptica ou rudimentar, valas a céu aberto e/ou lançamentos nos cursos hídricos sem qualquer tipo de tratamento (SNIS, 2023)

Já para o atendimento atual da população, tem-se disponível uma malha com total de 379,3 mil quilômetros, distribuídos nos municípios avaliados pelo SNIS, sendo utilizados para transportar um total de 6,1 bilhões de metros cúbicos de efluente gerado pela população, onde desses, foram tratados 5,0 bilhões de m³ (SNIS, 2023). As redes atualmente possuem em sua totalidade 37,5 milhões de ligações, atendendo 40,9 milhões de economias residências geradoras de esgoto, destes, distribuídos entre as macrorregionais, sendo a menor porcentagem o Norte com 2,3% igual a 8,8 mil km, Centro-Oeste com 10,4% igual a 39,5 mil km, seguido do Nordeste com 12,7% igual a 48,2 mil km, em segundo o sul com 16,6% igual a 63,1 mil km e a maior concentração no Sudeste, com 57,9% igual a 219,7 mil Km, conforme ilustrado na Figura 4 (SNIS, 2023).

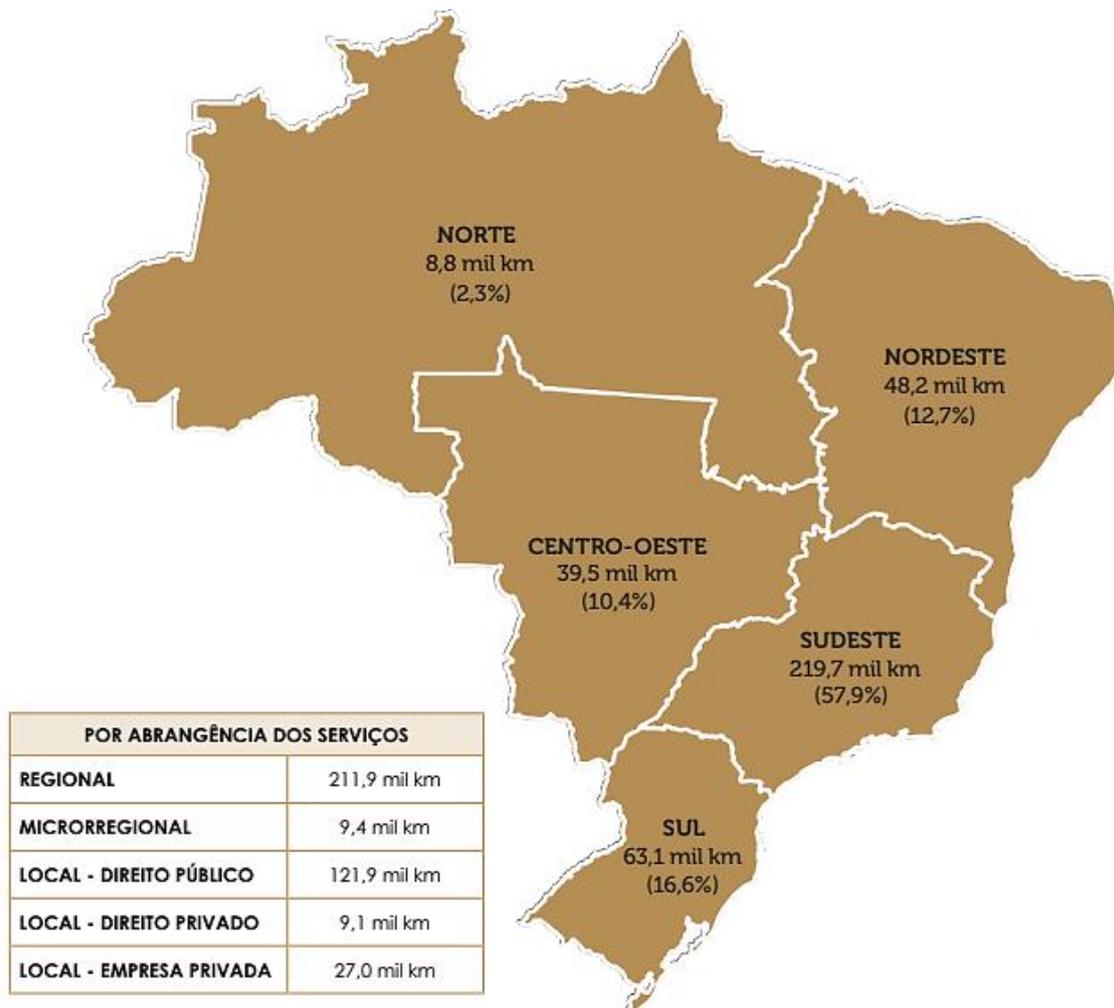


Figura 10 - Extensão das Redes públicas de esgoto no Brasil. Fonte: SNIS, 2023

Por outro horizonte, uma análise que leve em conta a densidade populacional, medida em metros de rede por habitante, revela um panorama distinto. Neste contexto, a região Norte mantém sua posição desfavorável, registrando 0,5 metros por habitante. No entanto, o Nordeste ascende da terceira para a segunda posição, com 0,9 metros por habitante, enquanto o Sul se posiciona em terceiro, com 2,1 metros por habitante. O Centro-Oeste, por sua vez, alcança a segunda posição, com 2,4 metros por habitante, e o Sudeste lidera com 2,6 metros por habitante.

Essa análise evidencia que, embora o Nordeste apresente uma extensão de rede em quilômetros superior à do Centro-Oeste, este último se destaca por uma cobertura mais abrangente de sua população. Ademais. Vale ressaltar ainda a importância de se contemplar a densidade demográfica dessas regiões, destacando-se que o Sul requer uma extensão de rede menor para atender sua população em comparação com o Centro-Oeste, assim justificando o índice menor.



No que diz respeito ao atendimento das redes de esgoto, observa-se um índice de 56,0% da população total do país, totalizando 112,8 milhões de pessoas. Esse índice varia significativamente de acordo com a região, como mostra a Figura 6. A região Norte apresenta o menor índice, atendendo 2,5 milhões de habitantes, o que equivale a 14,7% do total regional. Em quarto lugar está o Centro-Oeste, com 10,1 milhões de habitantes atendidos, correspondendo a 62,3% da região. O Sul, em terceiro lugar, atende 14,9 milhões de pessoas, com um índice de atendimento de 49,7%. O Nordeste ocupa o segundo lugar, com 16,9 milhões de habitantes atendidos, representando 31,4% de sua população. Por fim, o Sudeste lidera o ranking, atendendo 68,5 milhões de habitantes, o que equivale a 80,9% de sua população (IBGE, 2023; SNIS, 2023).

Por outro lado, quando feita a análise a partir do índice de atendimento, percebe-se a mudança de posição das regiões. Iniciando com a região Norte, que apresenta o menor índice de atendimento, cobrindo 14,7% de sua população. Na sequência, o Nordeste se destaca com 31,4% de atendimento, seguido do Sul, que ocupa o terceiro lugar, com 49,7% de sua população atendida. Logo após, o Centro-Oeste registra uma cobertura de 62,3%, e por fim, o Sudeste lidera o ranking com a maior porcentagem de atendimento, atingindo 80,9% de sua população, como ilustrado na Figura 5 (IBGE, 2023; SNIS, 2023).

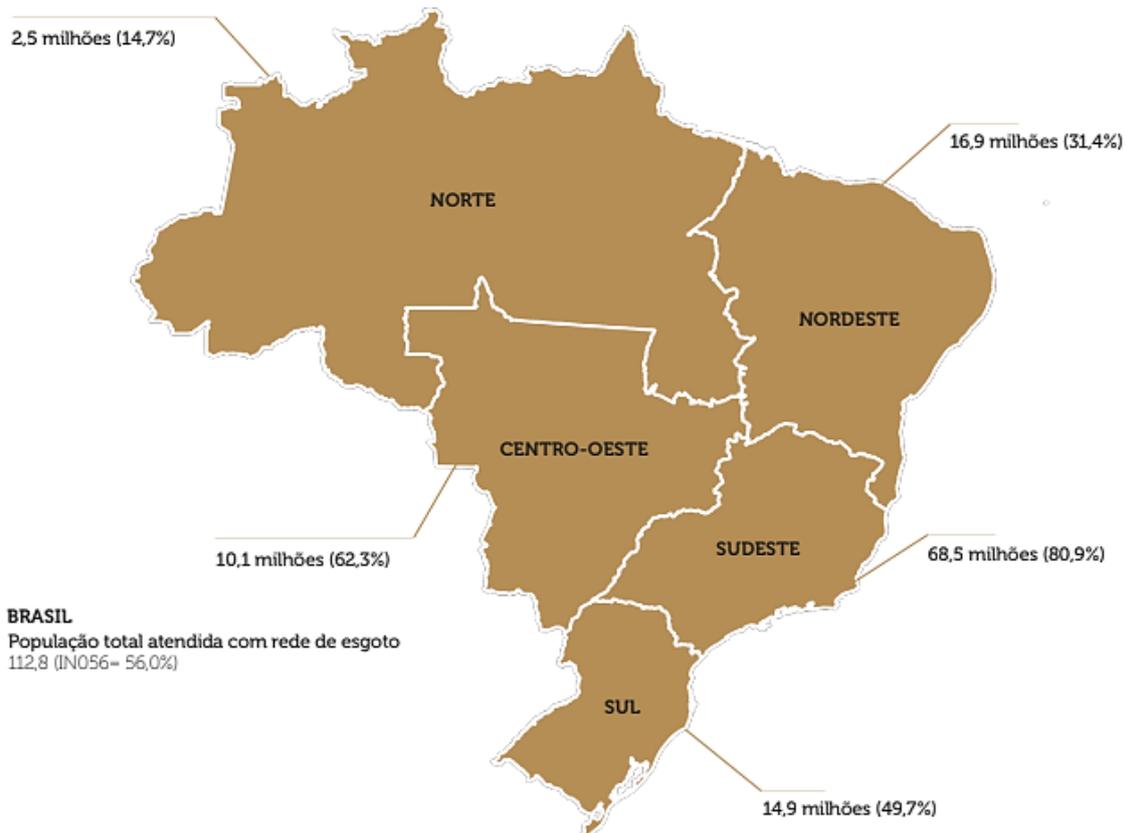


Figura 11 - População Atendida Com Rede Pública de esgoto. Fonte: SNIS, 2023

A afirmativa está em consonância com o estudo de Oliveira, Scazufca e Sayon (2023), que identificou as principais cidades do Brasil em termos de saneamento. O estudo aponta que o estado de São Paulo ocupa as 10 primeiras posições, seguido pelo Paraná nas posições de 11 a 15. Essas regiões apresentam um índice de coleta total de esgoto superior a 99,9%, englobando tanto a região Sul quanto a região Sudeste. Esses resultados corroboram a percepção de que essas regiões estão entre aquelas com os melhores índices de atendimento da população em termos de saneamento (OLIVEIRA; SCAZUFCA; SAYON, 2023).

Por outro lado, o mesmo estudo identifica as posições mais desfavoráveis, destacando o Norte, com as 5 piores cidades apresentando índices de atendimento variando de 0,73% a 17,12%, classificadas nas posições de 95 a 100 do ranking. Em seguida, são mencionadas cidades do Nordeste, Norte e Centro-Oeste, com índices de atendimento que variam de 21,6% a 29,5% em termos de atendimento por esgotamento sanitário (OLIVEIRA; SCAZUFCA; SAYON, 2023).

Em concordância, Kawajima, Santos, Fachine, Santana (2020) afirmam que o Norte e o Nordeste apresentam os menores índices de atendimento e qualidade de atendimento com redes de esgoto sanitário, com a situação mais favorável concentrada na região Sudeste. Além disso, nos municípios com mais de 50 mil habitantes, destaca-se o Centro-Sul do país como tendo os melhores índices de atendimento (KAWAJIMA; SANTOS; FECHINE; SANTANA, 2020)

Já quanto a análise dos índices de tratamento do esgoto gerado em nível nacional, estima-se que apenas 52,2% sejam adequadamente tratados, sendo a região Norte a mais desfavorecida, tratando apenas 19,8% do seu efluente gerado, enquanto o Sudeste lidera com um índice de tratamento de 61,6% (SNIS, 2023).

Em relação ao esgoto total coletado pelas redes, estima-se que 81,6% ou 5 Bilhões de metros cúbicos sejam efetivamente tratados. O Nordeste apresenta o menor índice de tratamento, atingindo apenas 76,3%, enquanto o Centro-Oeste detém o melhor índice, com 94,3% do volume tratado, conforme destacados na Figura 6 (SNIS, 2023).

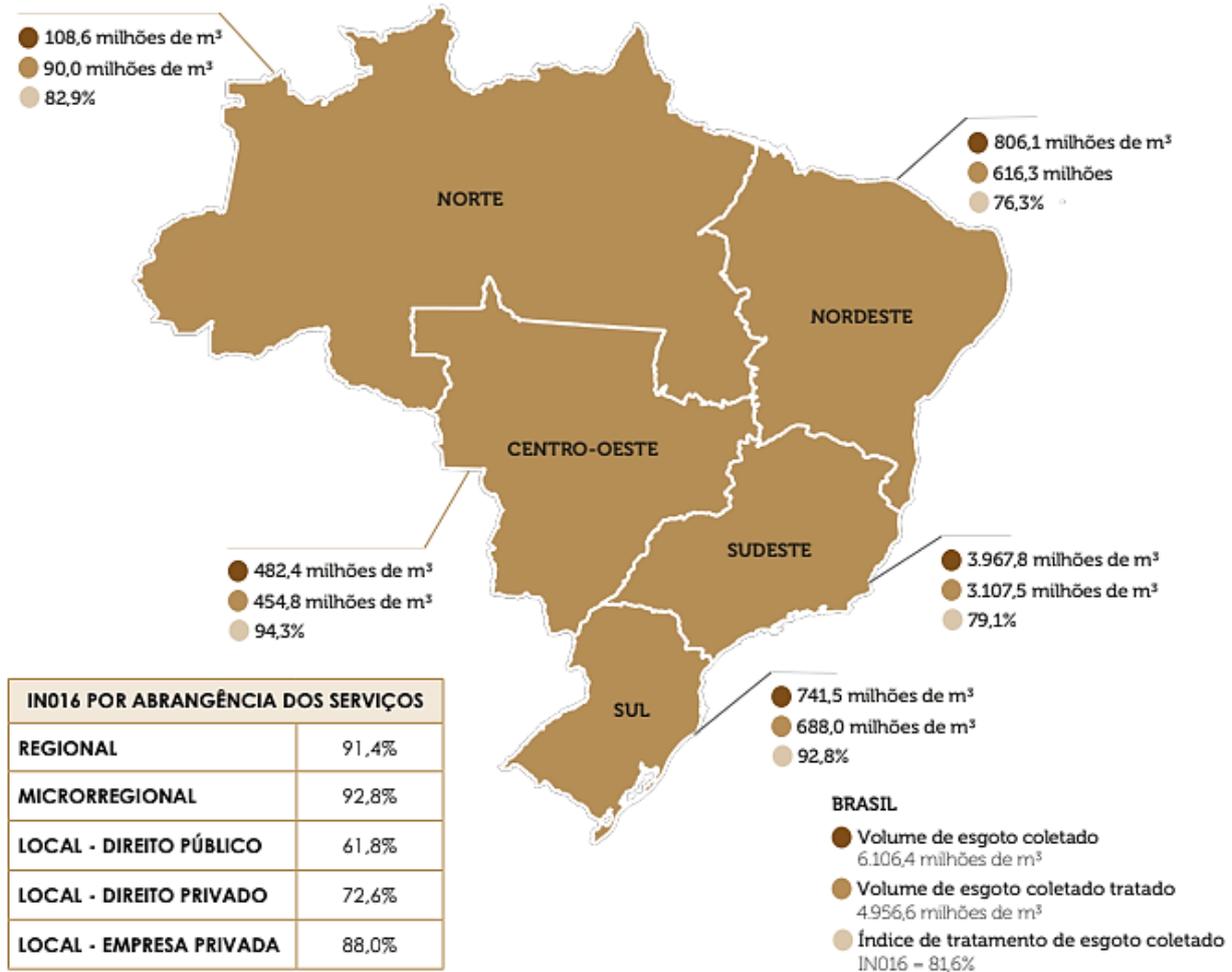


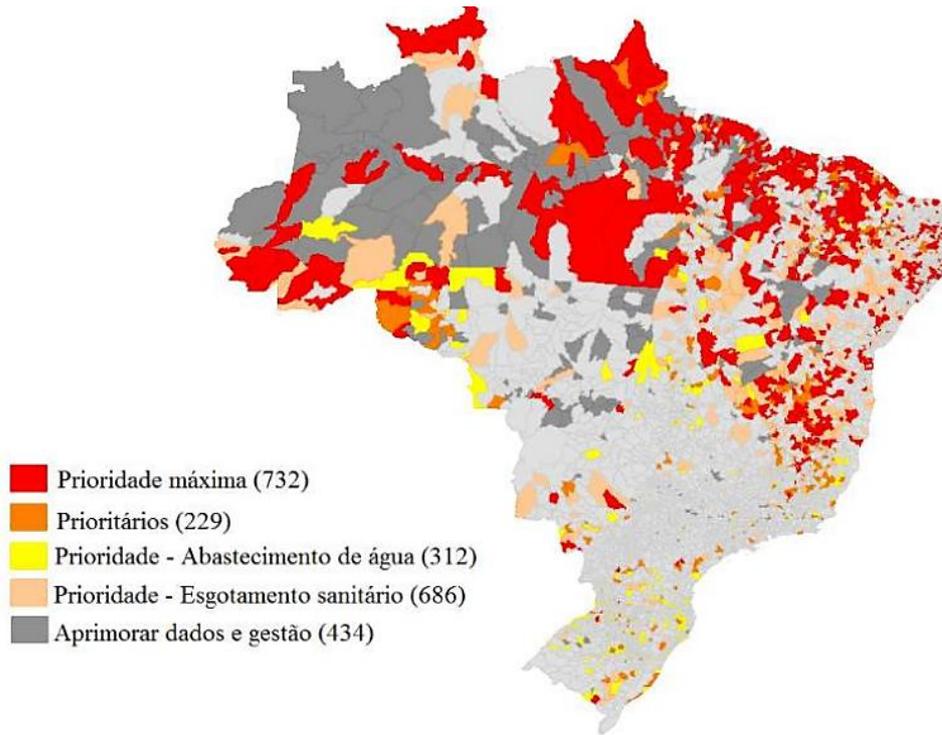
Figura 12 - Volumes de Esgoto Coletado e Tratado Fonte: SNIS, 2023

Os dados apresentados revelam uma variação significativa nos índices de tratamento do esgoto coletado entre as diferentes regiões do Brasil. Iniciando com o Nordeste, onde se registra o menor índice de tratamento de 76,3%, seguido pelo Sudeste, com 79,1%. Na sequência, o Norte apresenta um índice um pouco mais elevado, atingindo 82,9%, enquanto o Sul registra uma taxa de tratamento de 92,8%. No topo do ranking, o Centro-Oeste se destaca com o mais alto índice de tratamento, alcançando 94,3%. Essa ordenação evidencia a necessidade de avaliar e abordar as disparidades na infraestrutura de saneamento básico entre as regiões do país, visando garantir um acesso adequado ao tratamento do esgoto em todo o território nacional.

Além disso, é importante ressaltar que os dados apresentados se referem exclusivamente ao tratamento do esgoto coletado em cada região, sem considerar o universo total da população regional. Por exemplo, embora o Norte possua um índice de tratamento de 82,9% para o esgoto coletado, este abrange apenas 14,7% da população regional. Isso significa que cerca de 85,3% do esgoto gerado na região não recebe tratamento adequado, sendo descartado em sistemas rudimentares, como fossas e esgoto a céu aberto, ou, em situações mais graves, é lançado diretamente no meio ambiente. Essa análise pode ser estendida às demais regiões, sendo o Norte especialmente destacado devido ao seu pior índice de atendimento no país.

Cabe destacar que existe a disparidade na distribuição geográfica do acesso domiciliar aos serviços de saneamento básico em nível nacional, essa mesma disparidade, embora menos pronunciada, é também evidente em escala regional (SILVA; MENDES; SOUSA, 2022).

Em concordância com Kawajima, Santos, Fechine e Santana (2020), apresenta-se uma análise detalhada desses dados para as regiões Norte e Nordeste do Brasil, onde são identificadas com os maiores déficits. É relevante destacar que essas duas regiões juntas abrangem aproximadamente 40,3% dos municípios do país, totalizando 2.244, e representam cerca de 36% da população nacional, equivalente a aproximadamente 75 milhões de habitantes. Nessas áreas, concentra-se a maior parte dos municípios considerados de maior prioridade, sendo selecionados mais de 627 municípios, e que abrangem uma população com mais de 14 milhões de habitantes, devido aos baixos índices de atendimento em saneamento básico, não apenas coleta e tratamento do esgoto, mas dados como coleta de lixo e água tratada também entram em discussão. Tais dados podem ser observados na Figura 7, que apresenta as regiões que mais necessitam de atenção para a melhoria dos índices de saneamento (KAWAJIMA; SANTOS; FECHINE; SANTANA, 2020).



**FIGURA 13 - Regiões que demandam maior atenção para investimento e melhora dos índices de saneamento .
Fonte: Kawajima, Santos, Fecine e Santana (2020).**

De acordo com dados do Brasil (2021), os investimentos em saneamento básico por habitante variam consideravelmente entre as regiões do país. A análise da Figura 8 revela uma disparidade notável, especialmente entre o Norte, o Nordeste e o Sudeste. Enquanto o Sudeste recebeu um investimento significativamente maior, com uma média de R\$ 166,00 por habitante, as regiões Norte e Nordeste foram alocadas com quantias substancialmente inferiores, representando apenas cerca de 4,8% (R\$ 8,00) e 17,5% (R\$ 29,00), respectivamente, dos investimentos destinados ao Sudeste. Essa discrepância evidencia a necessidade urgente de políticas e investimentos mais equitativos para promover o acesso universal aos serviços básicos de saneamento em todo o país (BRASIL, 2021).

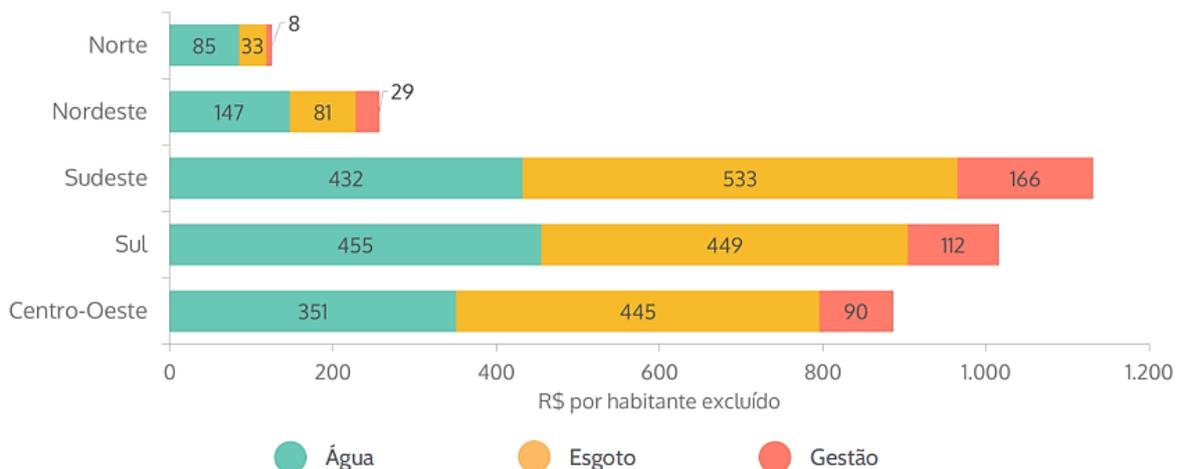


Figura 14 - Investimentos realizados em cada região, no ano de 2021 Fonte: Brasil (2021).

Contudo, Wagelin (2022) apresentou dados no PLANSAB de 2019, que prevê os investimentos necessários para alcançar as metas do Marco Regulatório e dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas. Segundo esses dados, para o atendimento de esgoto em índices satisfatórios, deveriam ser investidos no Norte, Nordeste, Sudeste, Sul e Centro-Oeste o valor total de 185 bilhões de reais (WALEGIN, 2022). Entretanto, em 2021, conforme apontado por Brasil (2021), foram investidos apenas 4,1 bilhões de reais no desenvolvimento da distribuição de água e coleta de esgoto, um valor ainda menor do que os 4,8 bilhões de reais investidos em 2020. Isso demonstra a necessidade urgente de aumentar os investimentos para além de simplesmente ampliar o índice de atendimento, tais investimentos são essenciais para melhorar a qualidade de vida da população, além de contribuir para a redução de gastos com saúde pública e o combate a doenças (BRASIL, 2021).



Em sua conclusão, Kawajima, Santos, Fechine e Santana (2020) destacam a falta de preparo dos dirigentes e políticos locais, juntamente com o baixo nível de receitas operacionais, como obstáculos significativos para a captação de recursos, o aprimoramento dos planos e o compromisso com o saneamento básico. Assim, persiste o desafio de efetivar tais planos, cujo sucesso depende das competências institucionais, parcerias e sustentação financeira das prefeituras e seus sistemas de saneamento, visando uma gestão duradoura e economicamente viável. Esta dificuldade compromete a melhoria dos índices de saneamento e a adequada obtenção de recursos (KAWAJIMA; SANTOS; FECHINE; SANTANA, 2020).

Conclusões

O Brasil enfrenta um desafio considerável no campo do saneamento básico, sendo sua extensão territorial uma das principais barreiras para atender plenamente sua população. Atualmente, apenas 112,8 milhões de habitantes, o equivalente a 56% da população, têm acesso ao esgotamento sanitário. É crucial direcionar investimentos para regiões com índices mais baixos de atendimento, como o Norte e o Nordeste, onde apenas 14,7% e 31,4% da população, respectivamente, têm acesso ao saneamento básico.

Além disso, é preocupante observar que o Sudeste, apesar de ter a maior taxa de habitantes e a maior extensão de redes, possui o segundo pior índice de tratamento de esgoto do país, com apenas 79,1% do esgoto coletado sendo tratado. Isso resulta em um descarte de 860,3 milhões de metros cúbicos de efluente não tratado, destacando um impacto ambiental significativo nessa região.

Outro ponto alarmante é que apenas 52,2% do esgoto coletado no país recebe o devido tratamento, o que corresponde a apenas 29,23% do esgoto gerado. Isso significa que 70,77% do esgoto é descartado de maneira inadequada, causando sérios danos à saúde pública e ao meio ambiente.

Portanto, é imperativo concentrar esforços na melhoria do índice de atendimento da população ao saneamento básico, aumentando tanto o volume de esgoto coletado quanto o devidamente tratado. Isso requer uma ampliação da capacidade das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). A melhoria desses índices não apenas reduzirá os custos com saúde pública, como demonstrado pela CNBB em 2015, mas também contribuirá para o alcance das metas estabelecidas pelo Marco Legal de Saneamento e pelos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, que visam garantir saneamento e higiene adequados até 2030.

Destaca-se, ainda, a disparidade entre os investimentos necessários e os realizados no setor de saneamento básico no Brasil. Enquanto os recursos destinados em 2021 foram significativamente inferiores às estimativas, a necessidade de investimentos para atender às metas de saneamento é urgente. Aliada a falta de preparo dos dirigentes e políticos, bem como os baixos níveis de receitas operacionais, são apontados como obstáculos significativos, sendo necessário aperfeiçoar competências institucionais, parcerias e sustentação financeira para a efetivação dos planos de saneamento e o atingimento das metas.

Referências Bibliográficas

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9648**: Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário - Procedimento. Rio de Janeiro, 1986.

BRASIL. Lei nº 11.026 de 15 de julho de 2020. **Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003, para alterar o nome e as atribuições do cargo de Especialista em Recursos Hídricos, a Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005, para vedar a prestação por contrato de programa dos serviços públicos de que trata o art. 175 da Constituição Federal, a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (Estatuto da Metrópole), para estender seu âmbito de aplicação às microrregiões, e a Lei nº 13.529, de 4 de dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados..** Presidência da República, Secretária-geral. Brasília, 2020.

BRASIL. Lei nº 11.445 de 5 de janeiro de 2007. **Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei no 6.528, de 11 de maio de 1978.** Presidência da República, Casa Civil. Brasília, 2007.

BRASIL – MINISTÉRIO DAS CIDADES, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental: **Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB**: Subsídios para o Projeto Estratégico de Elaboração do PLANSAB, parte 2. Brasília, 2008.

BRASIL – MINISTÉRIO DAS CIDADES, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB**: Mais Saúde com Qualidade de Vida e Cidadania. Brasília, 2014.

BRASIL – MINISTÉRIO DAS CIDADES, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **PLANSAB: Revisão de 2022**. Brasília, 2023. Disponível em < <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e->



programas/saneamento/planobnacional-de-saneamento-basico-plansab/plansab-2013-revisao-de-2022 >. Acesso em 27 de fev. de 2024.

BRASIL – Ministério do Desenvolvimento regional; Secretaria Nacional de Saneamento: **Do SNIS ao SINISA: Informações para o planejar o Sanemaneto Básico**. Brasília, 2021.

CNBB - CONFERÊNCIA NACIONAL DOS BISPOS DO BRASIL. **Casa Comum, nossa responsabilidade**. Texto Base. Editora CNBB, 2015.

FERREIRA, Mateus de Paula; GARCIA, Mariana Silva Duarte. **Saneamento básico: meio ambiente e dignidade humana**. Dignidade Revista, [S.l.], v. 2, n. 3, p. 12, jul. 2017. ISSN 2525-698X. Disponível em: <<https://periodicos.puc-rio.br/index.php/dignidaderevista/article/view/393>>. Acesso em: 28 fev. 2024.

FOGAÇA, Ana Beatriz. Dados da ONU mostram que metade da população mundial não tem acesso à água potável: Mirian Yasmine Niz lamenta realidade que afeta diretamente milhões de brasileiros que não dispõem de redes de água e esgoto. **Jornal da USP**. Ribeirão Preto, 2023. Disponível em < <https://jornal.usp.br/campus-ribeirao-preto/dados-da-onu-mostram-que-metade-da-populacao-mundial-nao-tem-acesso-a-agua-potavel/#:~:text=No%20Brasil%2C%20segundo%20dados%20do,de%2040%20milh%C3%B5es%20de%20brasileiros> >. Acesso em 25 de fev. de 2024.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo 2022: Panorama**. Disponível em < <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/mapas.html?localidade=BR&tema=populacao> >. Brasília, 2023. Acesso em 29 de Fev. de 2024

KAWAJIMA, Julio Issao; SANTOS, Gesmar Rosa dos; FECHINE, Valéria Maria Rodrigues; SANTANA, Adrielli Santos de. **I Indicadores agregados e metodologia para identificar “quem está ficando para trás”: o caso do saneamento no Brasil**. IX Congreso de la Asociación Latinoamericana de Poblacion – ALAP 2020. Rio de Janeiro, dezembro, 2020.

KAWAJIMA, Julio Issao; SANTOS, Gesmar Rosa dos; FECHINE, Valéria Maria Rodrigues; SANTANA, Adrielli Santos de. **Saneamento no Brasil: Proposta de Priorização do Investimento Público**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA, Ministério da economia. Brasília, novembro, 2020.

MDR, Ministério do Desenvolvimento Regional, SNS, Secretaria Nacional de Saneamento. **Panorama do Saneamento Básico no Brasil 2021**. 203 f. Secretaria Nacional de Saneamento do Ministério d Desenvolvimento Regional. Brasília, 2021.

NAÇÕES UNIDAS, BRASIL. **Mais de 4,2 bilhões de pessoas vivem sem acesso a saneamento básico**. Central de Imprensa – Notícias. Brasília. 19 de nov. de 2020. Disponível em < <https://brasil.un.org/pt-br/101526-mais-de-42-bilh%C3%B5es-de-pessoas-vivem-sem-acesso-saneamento-b%C3%A1sico> >. Acesso em 25 de fev. de 2024.

OLIVEIRA, Gesner; SCAZUFCA, Pedro; SAYON, Pedro Levy. **RANKING DO SANEAMENTO DO INSTITUTO TRATA BRASIL DE 2023 (SNIS 2021)**. Go Associados. São Paulo, 2023.

SILVA, Daniel Nogueira; MENDES, Emilio Campos; SOUSA, Rithielly Lira. **Saneamento básico e pobreza na Amazônia: um diagnóstico para a região de Carajás**. Novos Cadernos NAEA, v. 25, n. 4, p. 223-246, dezembro 2022

SNIS. Sistema Nacional De Informações Sobre Saneamento. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos**, Capítulo 2: Esgotamento Sanitário. 27 f. Ministério do desenvolvimento regional. Brasília – DF, dezembro, 2023.

TSUTYIA, Millton Tomoyuki; SOBRINHO, Pedro Alem. **Coleta e transporte de esgoto sanitário**. 2 ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999.

WEGELIN, Maria Julia Castro. **ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DO ACESSO A ABASTECIMENTO DE ÁGUA E ESGOTAMENTO SANITÁRIO DE 2011 A 2020 COM BASE NAS INFORMAÇÕES DO SNIS**. 34 f. Monografia (Especialização em Ciência de dados), Escola Nacional de Administração Pública – ENAP, Salvador, 2022.



REVITALIZAÇÃO DE PUNTOS ADICTOS A LA ELIMINACIÓN IRREGULAR DE RESIDUOS: EXPERIENCIA MUNICIPAL SÃO LOURENÇO DA MATA/PE

1,4Leidson Ramos de Sousa, **2**Ana Carolina da Silva Oliveira, **3**Janine Paola Silva, **4**Felipe Augusto de Santana Macedo, **4D**Jailson Pereira de Oliveira, **1,5**Valderice Pereira Alves Baydum
1 Universidade Católica de Pernambuco, email:leidson_ramos@hotmail.com 2 Secretaria de Saúde, Prefeitura de São Lourenço, Pernambuco, email: karololiveira8842@gmail.com; 3 Secretaria de Educação, Prefeitura de São Lourenço, Pernambuco, email: Janinepe19@hotmail.com; 4 Secretaria de Infraestrutura, Prefeitura de São Lourenço, Pernambuco, email: felipeengenharia88@gmail.com; email:djailsonpo@hotmail.com 5 Companhia Pernambucana de Saneamento, email:valderice@hotmail.com

Palabras-clave: Impacto; Resíduos sólidos; Salud pública.

Resumen

A la medida que crece la población, aumenta el consumo y en consecuencia los residuos generados crecen cada día. La producción de residuos y el desconocimiento y/o desprecio de la población por los impactos ambientales que pueden convertir una incorrecta eliminación, conduce a la formación de puntos basura. Estos puntos son lugares inadecuados para la eliminación, ubicados en calles, terrenos baldíos y riberas de ríos, generando diversos gastos a los municipios en limpieza urbana y provocando diversos efectos negativos en el ámbito social, ambiental y de salud pública. Con base en lo anterior, el objetivo de este trabajo fue identificar los puntos de basura en la ciudad de São Lourenço da Mata, Región Metropolitana de Recife, en Pernambuco, así como sus características e impactos negativos, para presentar la alternativa de educación ambiental para reducir el problema, además de transformar los puntos de basura en zonas habitables y mini plazas, utilizando materiales reciclables que en cambio quedarían en desuso y pueden ser recuperados y reutilizados. Se realizó una investigación bibliográfica sobre los beneficios de la educación ambiental, además de entrevistas a vecinos de la región sobre puntos de recolección selectiva en el municipio. Se concluyó que con la educación ambiental es posible formar comportamientos sustentables en la comunidad y reducir la disposición incorrecta de residuos en las ciudades, contribuyendo a la promoción de la salud y el saneamiento básico.

Introducción

La basura es uno de los mayores problemas de la sociedad actual, ya que se trata de productos de desecho que tardan varios años en descomponerse. Son residuos orgánicos, que incluyen restos de comida, jardinería, heces y residuos de origen industrial. Afirmando lo que se dice sobre la población, y el consumo per cápita, también crece la cantidad de residuos generados (CARDOSO & CARDOSO, 2016).

Comparado con los países latinoamericanos, Brasil es campeón en generación de residuos, representando el 40% del total generado en la región (541 mil toneladas/día, según ONU Medio Ambiente) (AGÊNCIA BRASIL, 2019).

El concepto de “residuo”, tal como lo plantean Vieira y Berríos (2003), está relacionado con productos que han sido desechados y no tienen valor, por lo que, dada la complejidad de los residuos generados, es preferible utilizar la palabra “residuos” como la forma más actual de nombrarse todo tipo de materiales producidos y no utilizados a partir de un producto o proceso establecido. Entre los tipos de residuos existentes, se puede distinguir: los residuos reciclables, que incluyen papel, plásticos, metales y vidrio, que pueden permanecer en el medio ambiente durante miles de años sin descomponerse; y los residuos orgánicos, que incluyen residuos de alimentos, jardinería, heces y residuos de origen industrial.

Afirmando lo que dicen Mucelin y Bellini (2008), la disposición irregular de estos residuos puede provocar contaminación de fuentes y mantos acuíferos, contaminación visual, problemas ambientales, así como la presencia de vectores y la proliferación de enfermedades.

La educación ambiental de los residentes permite la visión que los recursos que proporciona el medio ambiente son finitos, y que el consumo y la eliminación inadecuada son problemas que causan daños irreparables al medio ambiente. Es fundamental comprender que la educación ambiental posibilita un cambio continuo en el comportamiento social, buscando reducir las actitudes de la población hacia los impactos negativos, como el vertido irregular y la creación de puntos de residuos, punto que será estudiado en este artículo.

El estudio fue realizado en la ciudad de São Lourenço da Mata/PE, y el proyecto tuvo como objetivo identificar y analizar los puntos defectuosos, así como la transformación del área elegida a través de la eliminación de los aspectos sucio, discriminado, contaminado y olvidado de la área, transformando un sitio antes mal visto, aportando vida y una nueva perspectiva, a través de acciones intersectoriales para revitalizar y transformar estos lugares en espacios libres para el uso de ocio, constituyendo no sólo bienestar de la población, sino principalmente bienestar ambiental.

Material y métodos

Caracterización de la investigación

El tipo de investigación utilizado fue la investigación-acción, tal como lo propone Thiollent (1986). En su fase exploratoria, se buscó acercar el tema de la basura como objeto de estudio en áreas contaminadas, en comunidades urbanas del municipio previamente determinadas. Esta etapa se realizó a través de estudio bibliográfico y recolección de datos primarios en campo, con entrevistas en la Secretaría de Infraestructura – SMI junto con la Secretaría de Desarrollo Económico, Agricultura y Medio Ambiente – SMDEAMA del municipio y en la comunidad. A partir del diagnóstico obtenido, se definió el problema científico a abordar -los puntos de residuos contaminados- y se propuso el trabajo de educación ambiental como posible método para superarlo.

Caracterización de la zona de estudio

El estudio se realizó en el municipio de São Lourenço da Mata/PE, ubicado en la región metropolitana de Recife, ciudad de 111.249 habitantes. (IBGE/CENSO 2022).

Se identificaron los puntos de basura identificados en la ciudad. Tras una investigación en la ciudad se identificaron 215 puntos defectuosos. Los 25 puntos más críticos están identificados en el siguiente mapa.

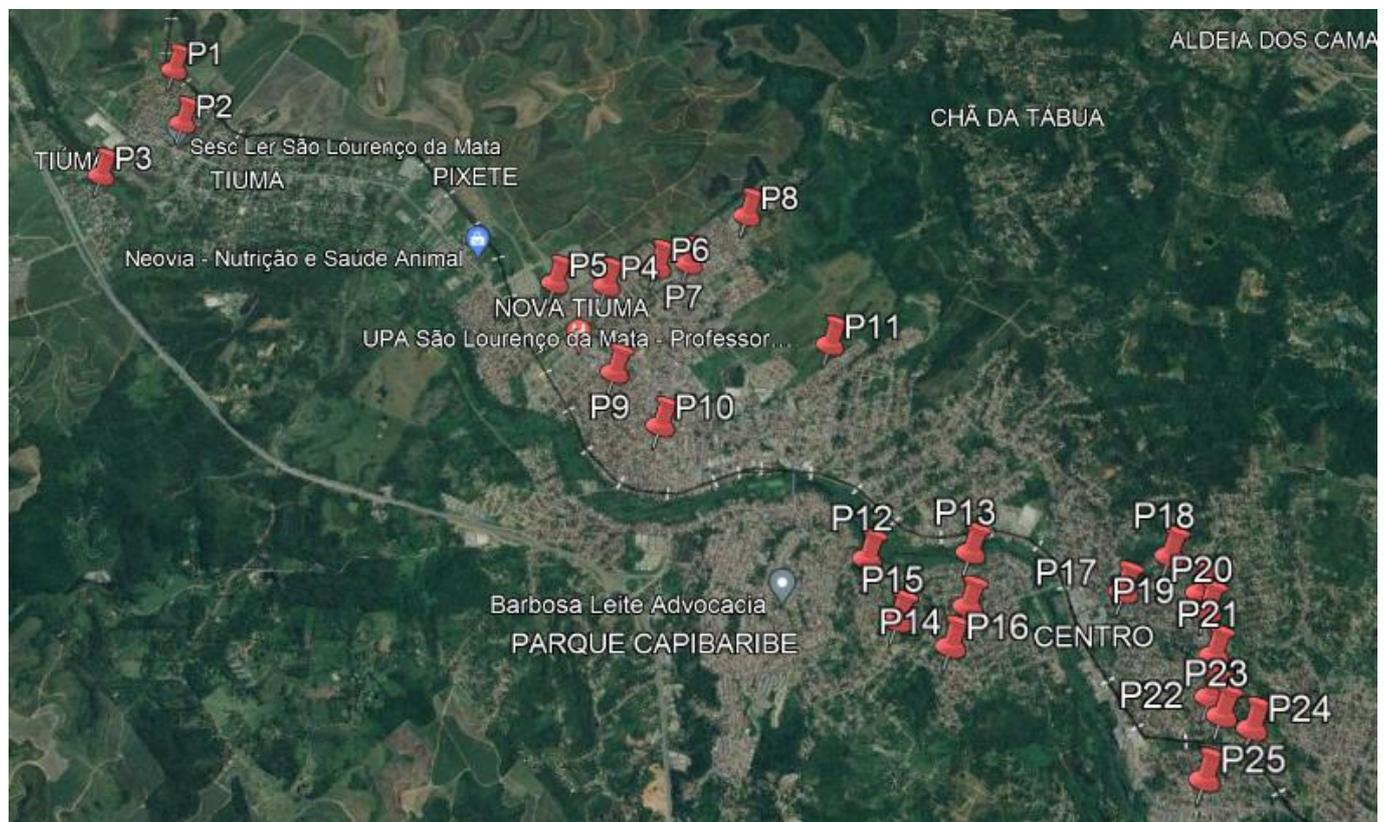


Figura 1 Mapeo de los 25 puntos críticos más críticos del municipio de São Lourenço da Mata, Pernambuco.

El punto 1, ubicado a la izquierda, corresponde al barrio de Tiúma (dirección Calle Nossa Senhora da Conceição, en el fraccionamiento Maria Helena de Morais) mientras que el punto 25, a la derecha, corresponde al barrio de Bela Vista, (en Calle Palmeiras).

Limpieza de los puntos elegidos

Se realizó un análisis del área con el fin de recolectar objetos e instrumentos necesarios para la transformación del lugar, programando primero la limpieza con el almacenamiento de toda la basura en bolsas y cajas y la asignación adecuada para la recolección periódica por parte del servicio de recolección.

Se obtuvieron los materiales indispensables para una buena excavación de hoyos de siembra (pala y azadón), plántulas de diversas plantas (principalmente especies florales), compost, grava para ornamentación, madera y pintura para realizar una placa de concientización. El agua para el riego de las plantas la obtenían los propios vecinos de la zona.

Resultados y Discusión

Luego de realizar investigaciones para ejecutar el proyecto, se pudo comprender la existencia del punto de basura, y se observó que la población necesitaba entender cómo se recolectaba la basura y adaptarse a los horarios de los camiones

recolectores, también se observó la ausencia de puntos de convivencia, por lo que se crearon mini plazas en los lugares donde existían puntos cerrados.

A continuación, se muestra el antes y el después de cada punto de basura y la transformación en zonas de estar y mini plazas:



Figura 2. Antes y Después (P1) Rua Nossa Senhora da Conceição, Subdivisión Matia Helena de Morais, Tiúma - São Lourenço/PE

Además de retirar basura, se construyó una mini plaza y se plantaron árboles, se completó la plantación y toda la ornamentación. Los materiales utilizados en los puntos de experiencia y miniplazas fueron reutilizados ya que estaban en desuso, algunos bancos tenían los pies rotos y las barandillas de concreto fueron reutilizadas provenientes del reemplazo de la acera ubicada en la Avenida Ettore Labanca, en el centro de la ciudad, y fueron llevadas para ser instalados en puntos de residuos antiguos como se muestra en la Figura 2.

Se realizó un breve conversatorio y presentación de los lugares transformados para que los vecinos impulsen la iniciativa de preservarlos limpios y agradables, ambiental y visualmente, con un acercamiento a los impactos negativos que la disposición irregular de residuos puede causar al medio ambiente.



Figura 3. Antes y Después (P9) Rua Nova Esperança A, Escola Municipal Padre João Collignon, Pixete - São Lourenço/PE

Además del problema de los residuos que dañan el medio ambiente, los lugares que recolectan basura desechada incorrectamente brindan condiciones infrahumanas para muchos de los llamados recolectores de basura, quienes recogen parte del material desechado (CARDOSO & CARDOSO. 2016). En la Figura 3, además de las acciones de educación ambiental entre la población, retiro de basura y forestación, se realizaron graffitis en el muro, transformando el espacio con disposición irregular en un espacio revitalizado. Esta iniciativa de graffitis se ampliará a las demás plazas y viviendas.

La mayoría de los residuos que se depositan en los vertederos no se reutilizan: van al vertedero, cuando podrían eliminarse de forma adecuada mediante recogida selectiva, además del impacto negativo en la imagen de la ciudad.



Figura 4. Antes y Después (P10) Rua 15 de Novembro, ETA Várzea do Una, Alto Santo Antônio – São Lourenço/PE.

Otro aspecto relevante de la actuación es evitar la propagación de focos de arbovirus, como criaderos del mosquito *Aedes aegypti*, a través del agua acumulada en recipientes abiertos dispuestos de forma irregular, el mosquito suele esconderse en lugares sombreados y sin circulación de viento.

Pernambuco registró hasta el momento un aumento de más del 538% en el número de casos probables de arbovirus en comparación con el mismo período anterior y el municipio de São Lourenço da Mata. Según el informe epidemiológico del Departamento de Salud del Estado, se registraron hasta Mayo/24, 261 casos de dengue, lo que representa un aumento del 234% respecto al año 2023 (CIEVS, 2024).

Iniciativas similares fueron adoptadas por el Proyecto Cara Nova, creado para recuperar puntos irregulares de disposición de residuos en el Distrito Federal. El proyecto tuvo éxito en su misión: en 2023, más de 8,3 mil toneladas de residuos fueron recolectadas en áreas públicas. En apenas un año de ejecución, la iniciativa transformó áreas de 11 regiones administrativas y se consolidó como más una estrategia del Gobierno del Distrito Federal para combatir el mosquito *Aedes aegypti* (AGÊNCIA BRASÍLIA, 2024).



Figura 5. Antes y Después (P 14) Rua Clodoaldo Gomes de Araújo, Penedo - São Lourenço/PE

Es necesario considerar que la mayoría de los puntos utilizados para la disposición de residuos sólidos contienen restos de construcciones civiles, con baja capacidad de contaminación química, pero con gran potencial para servir como refugio para animales venenosos (ARAÚJO & PIMENTEL, 2016).



Figura 6. Antes y Después (P 15) Escola Municipal Paulo Gomes de Araújo, Rua Esmeraldino Bandeira, Penedo - São Lourenço/PE

En el montaje o construcción de mini plazas y áreas de convivencia se utilizaron materiales que de otro modo habrían sido desechados, como: cercas de concreto retiradas de la acera, bancas de concreto con pies rotos.

Hasta el momento se han completado 20 puntos. El seguimiento de los sitios transformados durante las primeras semanas representó un medio para controlar y evaluar los resultados del proyecto.

Al regresar a los sitios restaurados, fue posible comprender cómo la educación ambiental en la práctica puede romper la cadena de eliminación irregular en un punto determinado. Cuando los residentes ven el sitio restaurado, lo preservan y ya no lo eliminan de manera irregular.

La discusión sobre educación ambiental es importante, debido a que existe una necesidad de cambio en el mundo en que vivimos, y que, debido a las tareas y compromisos diarios, las cuestiones ambientales escapan a la atención de la población (TEIXEIRA; et al., 2017).

La educación ambiental es una alternativa para reducir el problema de los puntos de basura, además de educar a los residentes sobre los impactos ambientales negativos que puede causar la práctica, despierta en los ciudadanos el deseo de preservar el medio ambiente, comenzando por el lugar donde viven.

Consideraciones finales

La ciudad de São Lourenço da Mata cuenta con un sistema estandarizado de recolección selectiva, la existencia de puntos de basura contaminados se vuelve inaceptable. Llevar a cabo un proyecto que pretende transformar un sitio antes mal visto, aportando vida y una nueva mirada al barrio donde se ubica, constituye un bienestar no sólo para la población, sino también para el medio ambiente.

La investigación revela la falta de información e indiferencia de las personas respecto a la preservación del medio ambiente y el compromiso de seguir las normas establecidas para la disposición de residuos en la ciudad. La población alrededor se contagia y se involucra en favor de un medio ambiente mejor y sostenible. Pequeñas prácticas cotidianas pueden aportar conocimiento y calidad de vida a toda la población y representar un beneficio para el medio ambiente y la comunidad.

Este proyecto puede ser ampliado por las autoridades públicas, con la inserción de prácticas sostenibles en las actividades comunitarias, formando personas preocupadas por el medio ambiente y, por tanto, aumentando la calidad de vida.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al ayuntamiento de São Lourenço da Mata/PE por proporcionar datos y alentar el desarrollo del proyecto y a la Universidad Católica de Pernambuco por fomentar la investigación.

Referencias bibliográficas

AGÊNCIA BRASIL.(2019) Brasil gera 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos por ano. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2019-11/brasil-gera-79-milhoes-de-toneladas-de-residuos-solidos-por-ano>

AGÊNCIA BRASÍLIA .(2024). Projeto De Cara Nova une consciência ambiental e combate à dengue <https://www.agenciabrasilia.df.gov.br/2024/02/03/projeto-de-cara-nova-une-consciencia-ambiental-e-combate-a-dengue/>

ARAÚJO, K. K.; PIMENTEL, A. K. A. (2016) Problemática do Descarte Irregular dos Resíduos Sólidos Urbanos nos Bairros Vergel do Lago e Jatiúca em Maceió, Alagoas. Rev. Gest. Sust. Ambient.

CARDOSO, F.C.I.; CARDOSO, J.C. (2016) O problema do lixo e algumas perspectivas para redução de impactos. Cienc. Cult., São Paulo.



IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia (2022). Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/sao-lourenco-da-mata/panorama>

MUCELIN, C. A. BELLINI, M. (2008) Lixo e impactos ambientais perceptíveis no ecossistema urbano. SciELO.

THIOLLENT, M. (1986) Metodologia da pesquisa-ação. Coleção Temas Básicos de Pesquisa Ação. Ed Cortez, 2º Ed, São Paulo SP. 108p.

VIEIRA, E. A.; BERRÍOS, M (2003). Lixo: fato ambiental da modernidade. Ambientes: estudos de Geografia. UNESP.

CIEVS. INFORME EPIDEMIOLÓGICO DE ARBOVIROSES. (2024). Secretaria de Saúde, Pernambuco, SE 01 a 20. Acesso em: https://portalcievs.saude.pe.gov.br/docs/Informe%20Epidemiol%C3%B3gico%20Arboviroses_SE20-2024.pdf.

TEIXEIRA, T. S.; MARQUES, E. A.; PEREIRA, J. R (2017). Educação ambiental em escolas públicas: caminho para adultos mais conscientes. Rev. Ciênc. Ext.



EVOLUÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DE COMUNICAÇÃO E MOBILIZAÇÃO SOCIAL EM PLANOS MUNICIPAIS DE SANEAMENTO BÁSICO - ESTUDO DE CASO

1Maria Teresa Viero Costa Serafini, 2Tiago Panizzon, 3Bianca Breda, 4Juliano Rodrigues Gimenez
1, 2, 3, 4 Instituto de Saneamento Ambiental - Universidade de Caxias do Sul (ISAM/UCS), e-mails:
mtvcserafini@ucs.br; tpanizzo@ucs.br; bbreda@ucs.br; jrgimenez@ucs.br.

Palavras-chave: participação social; mobilização social; Plano Municipal de Saneamento Básico.

Resumo

O Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) é o documento com o desafio de traduzir as diretrizes nacionais de Saneamento Básico em projetos municipais. As estratégias do PMSB precisam eleger ferramentas adequadas e que promovam a adesão popular durante o processo, resultando em melhores diagnósticos, aplicação de projetos e continuidade de ações. Além da melhora na aplicabilidade do próprio PMSB, maiores e mais qualificados níveis de participação social também resultam, a longo prazo, em comunidades mais autônomas e democráticas, como preveem as diretrizes ao orientar pela integração das temáticas ambientais, sociais, educacionais e de saúde. O objetivo deste trabalho foi realizar uma análise da evolução das estratégias de mobilização social nos PMSB elaborados pelo Instituto de Saneamento Ambiental da Universidade de Caxias do Sul (ISAM/UCS), comparando as mudanças desde a versão original, representada aqui pelo município de Garibaldi, até versão atual reformulada, representada pelo município de Gentil, analisando inicialmente o impacto na adesão popular. Comparando as duas versões, observa-se que foram realizadas as seguintes mudanças: o aumento no número de setores municipais de 2 (dois) para no mínimo 3 (três), principalmente em zona urbana, permitindo um maior número de reuniões e maior especificidade no tema tratado; o acréscimo dos segmentos da comunidade escolar e da saúde como agentes multiplicadores, de forma de atingir mais comunidades e levar informações sobre Saneamento Básico para dentro das residências; o melhoramento no questionário de percepção social, que ganhou uma versão on-line e questões mais específicas, passando a ser utilizado como pauta para treinamento de agentes de saúde e gerador de temas ambientais em sala de aula; investimento em comunicação com representantes do poder legislativo e executivo municipal, incentivando sua presença nas reuniões e demais etapas do PMSB, possibilitando a comunicação com demandas comunitárias específicas. Comparando os municípios de Garibaldi e Gentil em relação às mudanças mencionadas, percebeu-se um aumento na adesão popular em relação ao número de respondentes do questionário, que atingiu 38% da população de Gentil, enquanto em Garibaldi atingiu somente 2,5%. Em relação ao número de participantes nas reuniões setoriais, passando de 10 a 18 participantes em Garibaldi para 15 a 25 participantes em Gentil, apesar desta ter uma população 19 vezes menor. Conclui-se que as alterações no Plano de Mobilização Social apresentaram resultados positivos em dois fatores: envolvimento com o questionário e envolvimento da gestão municipal. Todas essas ações somadas geraram maior abrangência e adesão da população para participação durante o processo de desenvolvimento dos PMSB. No entanto, deve-se atentar para o fato da utilização da adesão como único indicador (avaliação qualitativa), por não permitir análises mais profundas a respeito de quais ações são mais eficientes, sendo importante incluir a análise quantitativa por meio de indicadores de desempenho e monitoramento.

1 Introdução

As diretrizes nacionais para o saneamento básico, que abrangem os serviços públicos de abastecimento de água, esgotamento sanitário, manejo de resíduos sólidos e drenagem pluvial, são estabelecidas pela Lei Federal 11.445/2007, posteriormente alterada pela Lei Federal 14.026/2020, conhecida como o Novo Marco do Saneamento Básico (BRASIL, 2007; 2020). Além de definirem os serviços e infraestruturas que compõem o saneamento, essas diretrizes estabelecem princípios fundamentais como a universalização, o controle social, a prestação de serviços adequados, a promoção da qualidade de vida e a proteção do meio ambiente. Para que essas diretrizes sejam efetivadas em nível municipal, é necessário traduzi-las em projetos e ações que correspondam às condutas estabelecidas. O principal instrumento em nível municipal é o Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB), que deve ser capaz de transformar a legislação em atividades concretas que aumentem os níveis de salubridade ambiental para toda a população, observando as necessidades específicas das comunidades envolvidas (BRASIL, 2007; 2020).

A universalização dos serviços, um princípio fundamental da Política Nacional de Saneamento Básico, é também seu maior desafio. Na prática, universalizar os serviços significa adaptar diretrizes nacionais à escala municipal, levando em conta a heterogeneidade da população. Fatores como baixa renda, vulnerabilidades sociais, habitações precárias ou em áreas de risco ambiental, habitações em zonas rurais e a presença de comunidades indígenas e/ou quilombolas podem dificultar ou até impedir o acesso aos serviços de saneamento básico (BRASIL, 2018).

Embora existam elementos mínimos para um PMSB, previstos nas leis citadas anteriormente, eles devem ser elaborados adaptando-se à realidade local, uma vez que informações importantes para sua formulação e aplicação provêm das comunidades que serão seus beneficiários (BRASIL, 2018). Portanto, é coerente iniciar a formulação de um PMSB conhecendo o contexto local e observando suas necessidades em relação ao saneamento, bem como as possíveis deficiências dos serviços e infraestruturas (BRASIL, 2018). Essas são as informações básicas que irão delinear as futuras propostas construídas e apresentadas pelo PMSB.



Essa etapa é chamada de Estratégia de Mobilização, Participação Social e Comunicação, conforme previsto no "Termo de Referência para Elaboração de Planos Municipais de Saneamento Básico" da Fundação Nacional de Saúde - FUNASA (2018). Consiste na fase de diagnóstico participativo de um PMSB, uma vez que apresenta a forma como será realizada a participação social ao longo de todo desenvolvimento do Plano, considerando as percepções e conhecimentos da comunidade. De acordo com a FUNASA, a metodologia adotada para mobilização social deve ser facilitar:

- A sensibilização sobre a relevância do PMSB e a mobilização da população local;
- O amplo acesso à informação;
- A qualificação da participação social;
- A participação de segmentos sociais organizados;
- A participação da população em geral.

A participação social é crucial não apenas para fornecer informações essenciais para um diagnóstico preciso, mas também para garantir que a população se mantenha engajada na manutenção das medidas de saneamento básico, na educação ambiental e no desenvolvimento autônomo de outras políticas públicas e tecnologias sociais. A integração entre as temáticas que envolvem o saneamento ambiental é uma das diretrizes tanto da legislação quanto dos termos de referência (BRASIL, 2007; 2020).

O objetivo deste trabalho é analisar a evolução das metodologias das Estratégias de Comunicação e Participação Social de Planos de Saneamento Básico desenvolvidos pelo Instituto de Saneamento Ambiental da Universidade de Caxias do Sul (ISAM/UCS) por meio de uma avaliação quali-quantitativa. Para isso, foram comparadas as ferramentas aplicadas e o nível de participação social em dois municípios: Garibaldi/RS e Gentil/RS, nos anos de 2020 e 2022, respectivamente.

O ISAM/UCS atua nas áreas de gestão e planejamento ambiental e de saneamento, incluindo a revisão e elaboração de Planos Municipais de Saneamento Básico (PMSB). Baseado em experiências práticas e no compromisso do Instituto com a melhoria contínua da qualidade da participação social nos PMSB, este estudo se propõe a avaliar as ferramentas de mobilização social quanto ao engajamento e envolvimento ativo da população nos municípios. A análise busca identificar quais metodologias são mais eficazes para a elaboração de PMSB bem-sucedidos na aplicabilidade municipal, justificando a relevância desta investigação.

2 Revisão Bibliográfica

Optou-se por um retorno aos autores que foram responsáveis pelas primeiras versões de organização dos conceitos utilizados, como no caso de Cohen and Uphoff (1980) que, uniram todas as utilizações oficiais do conceito de participação social até então, em busca de uma definição mais clara para um termo já tão popular. Também se optou pelo estudo das publicações da área da saúde, área com vasta experiência nos estudos e práticas de participação social.

2.1 O que é participação social?

Segundo Toro e Werneck (1997), mobilização social é um processo que acontece quando um grupo social age quotidianamente em prol de um objetivo comum. O objetivo da mobilização precisa ser coletivo e relacionado a um projeto de futuro, e é esse objetivo que define a qualidade da participação social. Ações com propósitos passageiros resultam em eventos ou campanhas, e não em mobilização; essa última requer dedicação contínua e produz resultados quotidianos. Segundo os autores, “a mobilização ocorre quando um grupo de pessoas, uma comunidade, uma sociedade decide e age com um objetivo comum, buscando, quotidianamente, os resultados desejados por todos.” (TORO E WERNECK, 1997, p. 11).

Eles explicam que a participação social faz parte da mobilização e acontece através de uma **convocação**, e que para que um grupo social possa compartilhar um propósito, precisam compartilhar também interpretações e sentidos.

“A participação é um ato de liberdade. As pessoas são chamadas, mas participar ou não é uma decisão de cada uma. Esta decisão depende essencialmente das pessoas se verem ou não como responsáveis e como capazes de provocar e construir mudanças.” (TORO & WERNECK, 1997, p. 11).

De acordo com a definição dos autores, percebe-se, então, a importância de atentar-se para dois fatores durante a elaboração de uma estratégia de mobilização social: a *identificação de um objetivo comum*, conectado com a realidade social para que possa ser aplicado quotidianamente e a construção de uma comunicação que não só informe a população, mas que a *sensibilize a desejar por mudanças e corresponsabilidade no processo*.

2.2 Quem participa?

Contribuindo com a elucidação do conceito de participação que será utilizado tanto na avaliação de projetos como na construção de seus objetivos, Cohen and Uphoff (1980, p. 12-17) sugerem o uso de três perguntas norteadoras: “quem participará? Como ocorrerá a participação? Para que e para quem servem a participação? (ou, quem se beneficia?)”. Elaborar um plano de mobilização/participação social que responda essas questões evita o uso do termo *participação social* como um conceito único e estático, aproximando-o do contexto em que será aplicado.

Em relação a definição dos agentes sociais, ou seja, quem será convocado a participar, Rozemberg (2002) atenta para a importância de garantir que, ao convocar a sociedade civil, integre-se a participação de “todos os agentes sociais envolvidos no problema em análise, *seja porque realizam, seja porque sofrem com as intervenções ambientais* e os problemas de saúde” (ROZEMBERG, 2002, p. 195).



A autora também destaca sobre o cuidado com o uso do termo, preferindo a complementação social à comunitária ao falar de participação, uma vez que o significado de *participação comunitária* deixa de fora gestores públicos, políticos, empresários e outros atores individuais ou coletivos que podem ter a ver com o problema, *sob a pena de excluir da análise grupos de poder e interesses econômicos*. O uso do termo *participação social* ao invés de *comunitária* também evita que se imputa culpa às comunidades, quando são, na verdade, as maiores vítimas e não devem ser vistas somente *como algo a ser transformado* (ROZEMBERG, 2002, p. 195).

3 Materiais e métodos

Para analisar a evolução das etapas de desenvolvimento e aplicação das Estratégias de Comunicação e Participação Social no processo de revisão do Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB), foram empregadas técnicas de pesquisa qualitativa, quantitativa e estudos de campo em dois municípios: Garibaldi e Gentil, ambos localizados no Rio Grande do Sul, com populações de 34.335 e 1.744 habitantes, respectivamente (IBGE, 2022).

A pesquisa qualitativa investigou os significados, atitudes e relações através de uma revisão bibliográfica sobre os termos "mobilização", "participação" e "comunidade", conforme descrito por Minayo (2002). Este método permitiu uma compreensão profunda dos objetivos das estratégias de mobilização social, sendo um pré-requisito para a criação de indicadores e métricas. A busca conceitual em conjunto com a análise textual da documentação dos Planos de Mobilização Social complementou essa investigação, elucidando os propósitos das estratégias adotadas.

A pesquisa quantitativa e de campo focou na análise das ferramentas de mobilização utilizadas em Garibaldi (2020) e Gentil (2022), com o objetivo de identificar as potencialidades e áreas de melhoria para aumentar o engajamento da participação social durante a elaboração dos PMSB. As ferramentas foram organizadas e interpretadas, permitindo a medição e comparação das estratégias de participação social. O estudo de campo incluiu o acompanhamento de reuniões técnicas e setoriais, audiências públicas, treinamentos, além da formulação e aplicação de questionários, para observar o nível de envolvimento dos gestores públicos e da população. A quantidade de participantes nos eventos foi registrada por meio das listas de presença.

As técnicas de pesquisa foram aplicadas concomitantemente, numa produção de conhecimento denominada práxis, que significa, segundo Paulo Freire (2019), a unidade dialética entre teoria e prática, implicando numa atuação que se inicia informada pela teoria, mas que impacta a realidade de forma a levar novas informações à teoria inicial, sempre reformulando-a ancorada em experiências reais.

Ainda, escolha do método buscou a máxima adequação entre objetivo e objeto da pesquisa. O objetivo era analisar as ferramentas de mobilização social, que visam a mobilização efetiva da comunidade. O objeto de análise incluía não só a documentação física representada pelos PMSB, mas também a compreensão do fator humano. Assim, as estratégias metodológicas e técnicas empregadas não se limitaram à descrição dos fenômenos, mas buscaram entender o sentido e a percepção dos atores, utilizando métodos quantitativos e qualitativos em conjunto (CANO, 2012).

Por fim, o estudo dos conceitos e níveis de participação e mobilização social permitiu uma conclusão mais profunda sobre o processo de participação nos PMSB. Esta abordagem ampliou a visão além da comparação interna entre os documentos do ISAM, reconhecendo os avanços e identificando claramente as fraquezas e possibilidades de melhoria para alcançar os objetivos estabelecidos pela FUNASA (2018).

4 Resultados e Discussão

4.1 Evolução da Estratégia de Comunicação e Mobilização Social do ISAM/UCS

O Termo de Referência para Elaboração de Planos Municipais de Saneamento Básico da FUNASA (2018) é o principal documento utilizado como referência para a elaboração, tanto dos PMSB como dos Plano de Mobilização Social desenvolvidos pelo ISAM/UCS. Inicialmente, os Plano de Mobilização Social foram formulados para atender apenas os requisitos mínimos definidos por este Termo de Referência, como é o caso do PMSB do município de Garibaldi. Com o passar do tempo e com base nas experiências de aplicação, algumas alterações para sua melhoria foram realizadas. Desse modo, elaborou-se uma nova estratégia de mobilização social aplicada no município de Gentil.

Atualmente, conforme o Plano de Mobilização Social desenvolvidos pelo ISAM a participação popular acontece nos seguintes momentos:

- na formação dos Comitês de Coordenação e Executivo, através de membros que representam a sociedade civil, técnicos e gestores da prefeitura, além de outros representantes indicados como atores sociais, que serão responsáveis pela mobilização e convocação da população geral;
- no ato de responderem o questionário de percepção social e canais de ouvidoria, criando a oportunidade de denúncias, reclamações e pedidos, além da oportunidade de contribuir com o diagnóstico;
- através de eventos de educação ambiental e da introdução da temática principalmente nas escolas (onde o questionário pode ser utilizado como ferramenta informativa) e audiências públicas.
- na participação de alguns representantes da sociedade civil em reuniões setoriais (maneira como a cidade é setorizada em relação aos serviços de saneamento) onde acontece a capacitação dos membros presentes;
- divulgação das ações de mobilização, através do desenvolvimento de artes gráficas para impressão de folders e cartazes, além da comunicação em rádios, jornais locais e redes sociais.



Importante lembrar que essas estratégias podem ser adequadas conforme realidade municipal, além de ser possível e desejado que ocorram mais atividades para a educação ambiental em saneamento, a depender da organização municipal em relação à gestão, instituições e sociedade civil.

As mudanças ocorridas entre as duas versões dos PMSB analisadas no presente trabalho não criaram novas formas de participação social, ficando focadas em readequar as ferramentas já existentes, conforme apresenta o Quadro 1. Apesar de não terem sido criadas novas estratégias de participação social entre as versões do PMSB de Garibaldi e Gentil, foram testadas reformulações das mesmas estratégias e avaliadas conforme alteração na adesão.

ESTRATÉGIA	PRIMEIRO PLANO <i>(município de Garibaldi)</i>	PLANO ATUAL <i>(município de Gentil)</i>
SETORES DE MOBILIZAÇÃO	2 setores (rural e urbano)	mínimo 4 setores
QUESTIONÁRIO DE PERCEPÇÃO SOCIAL PARA SANEAMENTO	uma das ferramentas de diagnóstico	reformulado e utilizado como uma das principais ferramentas de diagnóstico, comunicação e educação para saneamento básico
PODER LEGISLATIVO E EXECUTIVO	Não havia participação dos poderes legislativo e executivo	Cartas convite para estimular a participação do poder legislativo durante as etapas do Plano
CAPACITAÇÃO DOS COMITÊS	Não havia reunião com intenção de capacitação	Reuniões com comitês para capacitá-los em relação às temáticas de saneamento básico

Quadro 1 - Evolução das estratégias de mobilização social do ISAM/UCS

A seguir, estão discutidas em maiores detalhes as evoluções implementadas nas quatro estratégias apresentadas no Quadro 1:

I) Setores de Mobilização:

Inicialmente, para fins de mobilização social os municípios eram divididos em dois setores, rural e urbano, resultando em somente duas reuniões setoriais. Atualmente, percebe-se a necessidade de observar a presença de mais setores, principalmente no que diz respeito às características de geração de resíduos. A zona urbana foi mais bem compreendida se dividia em “subsetores” como: comunidade escolar, instituições de saúde, construção civil e grandes geradores de resíduos, gestores dos serviços de saneamento etc. e, a zona rural através de sindicatos e instituições rurais. Qualquer grupo ou local da cidade que possa trazer informações de saneamento específicas tem potencial de ser visto pelo PMSB como um setor.

Desta forma, atualmente os municípios são divididos em no mínimo 4 setores, resultando em mais reuniões setoriais, como uma forma de compreender melhor as particularidades municipais, aumentando também a possibilidade de participação da população. Além disso, as reuniões passaram a ser realizadas preferencialmente em horário pós laboral, para facilitar a adesão.

II) Questionário de Percepção Social sobre Saneamento Básico:

Outra mudança significativa foi o aprimoramento do questionário de percepção social, também previsto pelo TR Funasa como opção de ferramenta para utilização na fase do diagnóstico. Sua versão inicial era sucinta, de aparência confusa, com escrita bastante técnica e perguntas insuficientes para um diagnóstico profundo e que fosse compreendido pela população geral. Atualmente chegou-se a um modelo que, devido às melhorias em seu design e conteúdo, tem capacidade de coletar dados para diagnóstico por bairro além de servir como canal de coleta de informações sobre Saneamento Básico local, incluindo sugestões de melhorias dos serviços (Figura 1). O questionário atual também existe nas versões física e on-line, e recentemente aprimorou-se o acesso digital através do QR Code inserido nos pôsteres e cartazes que ficam expostos no município, além da disponibilização em sites e redes sociais oficiais do município. Para facilitar seu uso como ferramenta também como educação ambiental, o modelo atual do questionário foi pensando para ser utilizado como atividade escolar extraclasse nas instituições de ensino dos municípios, fazendo com que os alunos levem para suas famílias auxiliarem no preenchimento, aumentando assim, o número de respondentes e ampliando o alcance do mesmo. Além do apoio dos professores nas escolas, as Agentes Sanitárias/Endemias também foram incluídas no processo por meio do seu papel junto às famílias, aplicando os questionários durante as visitas nas residências. Ressalta-se no entanto, uma ação que foi muito importante tanto com os educadores, quanto com as Agentes de Saúde, que foi o treinamento pela equipe técnica do ISAM/UCS para aplicação dos questionários, visando capacitá-los e dirimindo possíveis dúvidas no momento do preenchimento por pessoas menos instruídas, considerando alguns termos pouco conhecidos que teriam na ferramenta.

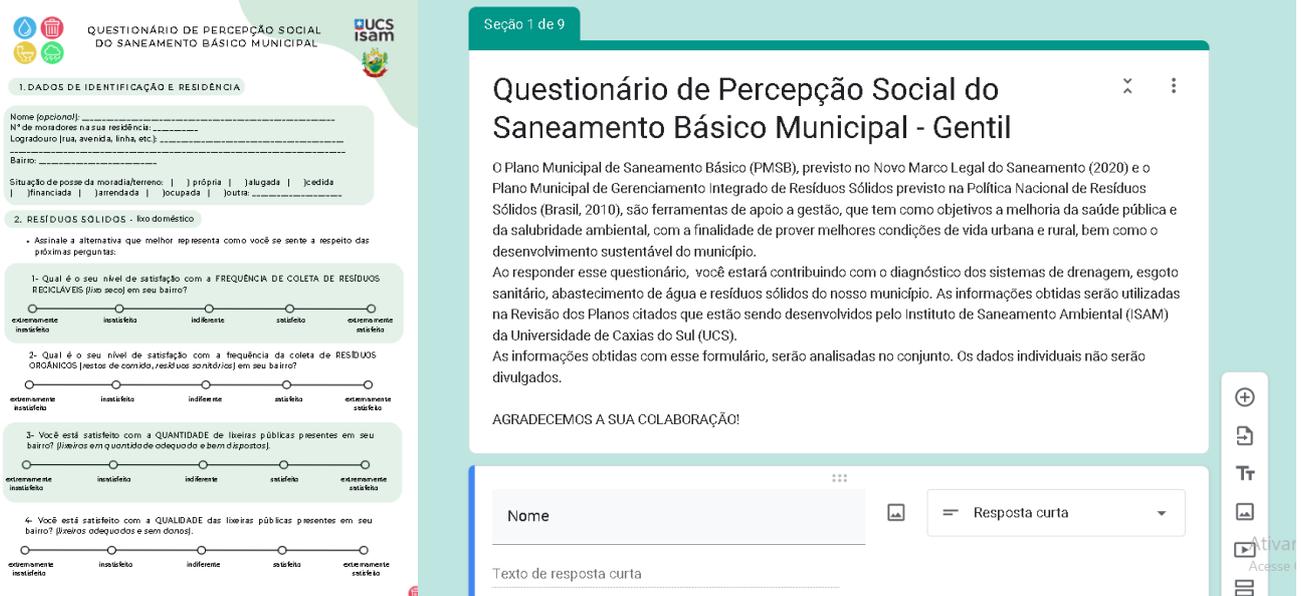


Figura 1 - Exemplo do Questionário de Percepção Social sobre Saneamento Básico, versão física (esquerda) e digital (direita)

III) Poder legislativo e executivo:

Como uma forma de melhorar a proximidade entre a equipe técnica e os gestores municipais, bem como o acesso às pessoas dos bairros e comunidades municipais, atualmente busca-se pela participação dos poderes legislativo e executivo municipal, através da presença dos vereadores, secretários, prefeitos e vice-prefeitos municipais nas capacitações, reuniões técnicas, entrevistas nas rádios, audiências públicas e demais discussões do Plano, considerando suas influências quando se trata de engajar a população local. O PMSB atual prevê a elaboração e entrega de cartas-convite/convocação destinadas às autoridades municipais durante os eventos do Plano, além de serem incluídos geralmente no Comitê de Coordenação para participarem mais ativamente das estratégias de comunicação.

IV) Capacitação dos comitês:

A última mudança em relação aos PMSB iniciais e atuais se deu a partir da necessidade de capacitar os participantes da elaboração do Plano em relação ao Saneamento Básico. Atualmente, é previsto no Plano que as reuniões com os Comitês Executivo e de Coordenação sejam também utilizadas como oportunidades de educação ambiental, uma vez que são os membros dos Comitês que terão mais contato com o desenvolvimento do Plano, com as comunidades e atores sociais. Para tanto, as capacitações passaram a ser uma “atividade de extensão” ofertada pelo ISAM/UCS, gerando inclusive certificados de participação, com o objetivo de cumprir com o papel institucional de formar recursos humanos cada vez mais capacitados, com destaque nesse caso, para os temas ambientais na gestão pública.

4.2 Avaliação da participação popular nos PMSB

Num contexto geral, comparando os dois municípios utilizados como exemplo neste trabalho, Garibaldi e Gentil, em relação às mudanças realizadas nas ferramentas de participação, mobilização social e comunicação do PMSB, observou-se avanço em dois aspectos: maior quantidade de respondentes no questionário e maior adesão nas reuniões setoriais. No caso de Garibaldi, em relação aos questionários, foram preenchidos 285 formulários, atingindo 884 pessoas, o que representa 2,5% da população total envolvida. Em Gentil, 284 formulários foram preenchidos, atingindo 656 pessoas, o que representa 38% da população total envolvida. Em relação à adesão nas reuniões setoriais, no município de Garibaldi a presença popular variou entre 10 e 18 pessoas enquanto no município de Gentil, entre 15 e 25 pessoas, representando um aumento na adesão mesmo com uma população 19 vezes menor.

Os aprimoramentos realizados pelo ISAM em suas ferramentas de mobilização social nos PMSB aumentaram os níveis de participação popular através da adesão e maior envolvimento da gestão municipal. Além disso, os variados usos dados ao questionário permitiram que a ferramenta também cumprisse um papel de divulgação da informação a respeito da realização do PMSB, bem como que servisse como uma introdução da temática do saneamento básico, preparando a população para sua participação na audiência pública. Garantir que a informação chegue ao maior número de pessoas possível é um passo importante rumo à qualificação da participação popular. Além disso, é importante destacar a melhora realizada através da capacitação dos comitês, significando uma oportunidade não só de divulgação do PMSB, mas de educação ambiental para o saneamento diretamente para com a população que os compõem.

Porém, percebe-se que, apesar do aumento, a adesão da população nas reuniões e audiências segue sendo um desafio e, quando acontece, costuma ser impulsionada através da participação da gestão municipal (como foi no caso de Gentil). Apesar



de ser positivo uma maior participação também da gestão municipal, pode tornar-se perigoso se a participação popular *depende* disso, uma vez que maiores níveis de participação social passam a ser possíveis somente em municípios com gestão engajada – sendo preferível que a população possa se organizar e participar em conjunto, sem dependência da proatividade da gestão municipal. A relação entre características da gestão municipal e níveis de participação popular precisa ser olhada com cautela pois, ao mesmo tempo em que merece atenção e incentivo na elaboração da estratégia de mobilização, também se faz necessário planejar ações para além disso, já que não são todos os municípios que terão as mesmas características no seu corpo de gestão.

Desta forma, conforme discutido no capítulo de revisão bibliográfica, e como sugestão às futuras melhorias dos próximos PMSB, é importante destacar que, ao mesmo tempo em que se percebe melhorias nas estratégias de mobilização, principalmente no que diz respeito à evolução de suas ferramentas, também foi percebido uma ausência de objetivos específicos em relação à participação desejada. Uma melhor definição acerca dos objetivos da mobilização social permite não só uma evolução na qualidade da participação, mas também que se possa utilizar outros indicadores para além da adesão, tornando possível avaliar com maiores detalhes a evolução dos PMSB bem como identificar seus erros.

Considerações Finais

As mudanças que ocorreram entre as versões dos PMSB analisados provocaram um aumento na adesão ao questionário e às reuniões setoriais. Destaca-se como positiva, principalmente, a reformulação do questionário de percepção social e o seu uso em diversos momentos do PMSB, tornando-se uma ferramenta capaz de ser utilizada não só para fins de diagnóstico, mas também em fases de educação ambiental. Também se percebeu resultado positivo um maior incentivo à participação da gestão municipal nas etapas do PMSB. Todas essas ações somadas geraram maior abrangência e adesão da população para participação durante o processo de desenvolvimento dos PMSB. No entanto, deve-se atentar para o fato da utilização da adesão como único indicador (avaliação qualitativa), por não permitir análises mais profundas a respeito de quais ações são mais eficientes, sendo importante incluir a análise quantitativa por meio de indicadores de desempenho e monitoramento. Além disso, a ausência de objetivos em relação à participação social desejada impede a criação de novas ferramentas de mobilização social, ou do encadeamento entre elas.

O melhoramento das Estratégias de Comunicação e Participação Social permitem transformá-la em forma de atividades concretas e contínuas, que enxergue a população para além da composição de quórum ou fonte de informação ou fiscalização, aproximando-as, de fato, a usufruírem do seu direito à saúde e saneamento ambiental adequados.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Instituto de Saneamento Ambiental da Universidade de Caxias do Sul/ISAM UCS e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico/CNPq pelo apoio recebido durante a elaboração deste trabalho.

Referências Bibliográficas

BRASIL. Lei Nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2020.

BRASIL. Ministério das Cidades. Caderno metodológico para ações de educação ambiental e mobilização social em saneamento. Brasília, 2018.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Plano de Saneamento Básico Participativo: elabore o Plano de Saneamento de sua cidade e contribua para melhorar a saúde e o meio ambiente do local onde você vive. Brasília, 2011. 2ª edição.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. Termo de referência para elaboração de plano municipal de Saneamento Básico / Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde. –Brasília : Funasa, 2018.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. CataloSan: catálogo de soluções sustentáveis de saneamento – gestão de efluentes domésticos / Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde; Paula Loureiro Paulo, Adriana Farina Galbiati, Fernando Jorge Corrêa Magalhães Filho. –Campo Grande : UFMS, 2018.

CANO, I. Nas trincheiras do método: o ensino da metodologia das ciências sociais no Brasil. Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). 2012.

COHEN, J; UPHOFF, N; 1980. Participation's place in rural development: Seeking clarity through specificity', World Development.

FREIRE, Paulo. Pedagogia da Autonomia. São Paulo: Paz e Terra. 2019.

FREY, K; 1997. Governança Urbana e Participação Pública. Anpad.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Brasileiro de 2022. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.



MINAYO, MARIA CECÍLIA S; 2002. Enfoque Ecológico de Saúde e Qualidade de Vida. Editora Fio Cruz, Rio de Janeiro.

MELO, H.P; 2005. Avaliação de efetividade do programa de educação em saúde e mobilização social (PESMS) para a sustentabilidade das ações de saneamento financiadas pela Funasa, em Nerópolis – GO. Editora Fio Cruz, Rio de Janeiro.

RIFKIN, SUSAN B; 1990. Primary Health Care in Southeast Asia: attitudes about Community participation in Community health programmes. Center for Asian Studies, University of Hong Kong, Hong Kong.

ROZEMBERG, Brani; 2002. Participação Comunitária em Programas de Promoção em Saúde: elementos para uma avaliação crítica de metas e pressupostos. Editora Fio Cruz, Rio de Janeiro, p. 191-199.

TORO, A.; WERNECK, N; 1997. Mobilização Social: um modo de construir a democracia e a Participação. Brasília: Ministério da Justiça, p. 9-55.



PERCEPÇÕES DE ESTUDANTES DE PÓS-GRADUAÇÃO SOBRE AS VULNERABILIDADES AMBIENTAIS NA APA DOS RECIFES DE CORAIS: O CASO DOS PARRACHOS DE MARACAJÁ/RN, BRASIL

1Charliany Silva Araújo, 2Elis Regina Costa de Moraes, 3Pedro Henrique Bezerra da Costa e Silva, 4Maria Amanda Silva do Nascimento, 5Paulo Victor Menezes Vieira.

1 Universidade Federal Rural do Semi-Árido, e-mail: charliany.araujo@alunos.ufersa.edu.br; 2 Universidade Federal Rural do Semi-Árido, e-mail: elisregina@ufersa.edu.br; 3 Universidade Federal Rural do Semi-Árido, e-mail: pedro.silva98453@alunos.ufersa.edu.br; 4 Universidade Federal Rural do Semi-Árido, e-mail: maria.nascimento68930@alunos.ufersa.edu.br; 5 Universidade Federal Rural do Semi-Árido, e-mail: paulomenezes744@gmail.com

Palavras-chave: Vulnerabilidades Ambientais; Percepção Ambiental; Gestão de Áreas Protegidas.

Resumo

Este estudo investiga as percepções de estudantes de pós-graduação sobre as vulnerabilidades ambientais na Área de Proteção Ambiental dos Recifes de Corais (APARC). Utilizando a metodologia de análise de conteúdo de Bardin, foram analisadas as respostas a um questionário aplicado após uma visita de campo aos Parrachos de Maracajaú. Os resultados indicam preocupações significativas com a pressão turística, poluição e pesca predatória, além de um reconhecimento da importância de práticas sustentáveis para a conservação da biodiversidade local.

Introdução

As Áreas de Proteção Ambiental (APAs) representam um componente essencial na estratégia global para a conservação da biodiversidade e dos recursos naturais. Estas áreas, ao abrigarem ecossistemas únicos e biodiversidade rica, fornecem serviços ecológicos essenciais como a regulação climática, a purificação da água e a proteção contra eventos climáticos extremos (BENSUSAN, 2006). Além disso, as APAs são vitais para a conservação de espécies ameaçadas e para a manutenção da diversidade genética, que é crucial para a resiliência ecológica e a adaptação às mudanças ambientais.

Contudo, as APAs enfrentam numerosas vulnerabilidades socioambientais que ameaçam sua integridade e eficácia (SANTOS, 2020). Tais vulnerabilidades incluem a pressão exercida pelo turismo descontrolado, que pode levar à degradação dos habitats naturais e à perturbação da vida selvagem. A poluição, proveniente de fontes terrestres e marítimas, acumula contaminantes nos ecossistemas, afetando tanto a flora quanto a fauna. Ademais, práticas como a pesca predatória e a exploração ilegal de recursos naturais comprometem a sustentabilidade desses ambientes. A expansão urbana e agrícola também contribui para o desmatamento e a fragmentação de habitats, exacerbando a vulnerabilidade dessas áreas à perda de biodiversidade.

Neste contexto, a educação ambiental surge como uma ferramenta crucial para mitigar essas vulnerabilidades. Através da sensibilização e capacitação de comunidades locais, turistas e gestores, a educação ambiental promove uma compreensão mais profunda da importância das APAs e incentiva comportamentos sustentáveis. Além disso, programas educacionais podem fomentar a participação comunitária na gestão dessas áreas, fortalecendo a governança ambiental e incentivando a adoção de práticas de uso sustentável dos recursos naturais (Reis, 2019).

O estudo dos Parrachos de Maracajaú, localizados na Área de Proteção Ambiental dos Recifes de Corais (APARC), oferece um cenário ideal para investigar como as percepções dos futuros gestores ambientais, representados por estudantes de pós-graduação, podem ser moldadas e aprimoradas através de experiências educativas em campo (Oliveira, 2019). Este trabalho analisa essas percepções e discute a importância da educação ambiental como pilar para a gestão sustentável e a conservação de áreas críticas como a APARC.

Material e Métodos

Este estudo adotou uma abordagem qualitativa e quantitativa para examinar as percepções de estudantes de pós-graduação sobre as vulnerabilidades ambientais na Área de Proteção Ambiental dos Recifes de Corais (APARC), especificamente nos Parrachos de Maracajaú. A metodologia empregada combinou técnicas de coleta de dados primários, análise de conteúdo conforme Bardin (1977) e a inclusão de um registro fotográfico para complementar a análise qualitativa.

Os dados foram coletados por meio de um questionário estruturado aplicado a nove estudantes de pós-graduação que visitaram os Parrachos de Maracajaú. O questionário consistia em perguntas fechadas e abertas, projetadas para avaliar o conhecimento prévio dos estudantes sobre a área, suas percepções das vulnerabilidades ambientais e o impacto da visita em sua compreensão sobre conservação ambiental. As questões abertas permitiram aos participantes expressarem em detalhes suas percepções e sugestões.

Após a coleta, as respostas foram transcritas e submetidas a uma análise de conteúdo seguindo a metodologia de Bardin. Este processo envolveu a codificação inicial, a categorização das respostas e a quantificação das frequências de cada categoria. As categorias foram definidas com base nos temas emergentes relacionados às vulnerabilidades ambientais

identificadas pelos participantes, como a pressão turística, a poluição e a pesca predatória.

Todas as atividades de pesquisa foram conduzidas em conformidade com os princípios éticos para a pesquisa com seres humanos, incluindo o consentimento informado dos participantes. A utilização de fotografias foi previamente autorizada pelos participantes, garantindo o respeito à privacidade e à integridade pessoal.

Caracterização da área de estudo

Os Parrachos de Maracajaú, situados a cerca de 50 quilômetros ao norte de Natal, no estado do Rio Grande do Norte, Brasil, são uma das joias naturais mais impressionantes da região (figura 1). Esses recifes de coral são parte integrante da Área de Proteção Ambiental dos Recifes de Corais (APARC) e representam um dos ecossistemas marinhos mais vibrantes e biodiversos do Atlântico Sul.



Figura 1: Vista da praia onde se localiza a Área de proteção Ambiental

Características Ecológicas

Os Parrachos de Maracajaú são compostos por um conjunto de recifes de corais que formam piscinas naturais em maré baixa, estendendo-se por uma área de aproximadamente 13 quilômetros quadrados (figura 2). Estes recifes são lar para uma diversidade notável de vida marinha, incluindo diversas espécies de corais duros e moles, peixes coloridos, moluscos, crustáceos, e uma variedade de algas e esponjas marinhas.



Figura 2: Diversidade de vida marinha nos parrachos de Maracajaú. Fonte:
http://www.braziltravelbuddy.com/Natal/picture/Mergulho_Maracajau_e_Parrachos_de_Pirangi_Picture_1



A complexidade estrutural dos corais proporciona abrigo e recursos alimentares para muitas espécies, algumas das quais são endêmicas da região. Essa rica biodiversidade não só contribui para a saúde ecológica do oceano, mas também atrai turistas de todo o mundo, interessados em mergulho e prática de snorkeling.

Importância Socioeconômica

Além de seu valor ecológico, os Parrachos de Maracajaú têm uma significativa importância econômica para a comunidade local. O turismo baseado nos recifes é uma das principais fontes de renda para a população local, envolvendo atividades como passeios de barco (figura 3), mergulho com snorkel e cilindro e a venda de artesanato e alimentos. A gestão dessas atividades, quando feita de maneira sustentável, não apenas preserva o ecossistema, mas também assegura a viabilidade econômica a longo prazo para a comunidade (OLIVEIRA, 2019).



Figura 3: Atividade turística nos parrachos de Maracajaú.
 Fonte: <https://g1.globo.com/rn/rio-grande-do-norte/noticia/2019/10/09/>

Desafios de Conservação

No entanto, a área enfrenta desafios significativos relacionados à conservação. A pressão turística, especialmente durante a alta temporada, pode levar ao pisoteamento dos corais e à perturbação da vida marinha. Além disso, o aumento dos resíduos sólidos e a poluição da água são preocupações constantes, afetando a qualidade do habitat local.

Os efeitos das mudanças climáticas, como o aquecimento das águas e a acidificação dos oceanos, também representam uma ameaça crescente para os corais, que são especialmente sensíveis às alterações na temperatura e na química da água (INAGAKI, 2020).

Estratégias de Manejo

Para enfrentar esses desafios, várias estratégias de manejo têm sido implementadas, incluindo a limitação do número de visitantes, o desenvolvimento de programas de educação ambiental para turistas e moradores locais e a realização de monitoramentos regulares da saúde dos recifes (figura 4). Além disso, parcerias entre o governo, organizações não governamentais e a comunidade local têm sido fundamentais para fortalecer a conservação e a gestão sustentável dos Parrachos de Maracajaú, (SILVA, 2018).



Figura 4: Projeto Tamar: Soltura de filhotes de tartarugas marinhas.



Resultados e Discussão

A análise de conteúdo das respostas ao questionário revelou uma clara preocupação dos estudantes de pós-graduação sobre diversas vulnerabilidades socioambientais nos Parrachos de Maracajaú. Os principais temas identificados foram a pressão turística, a poluição, a pesca predatória, e as mudanças climáticas, que foram mencionados repetidamente como desafios significativos à conservação da APA dos Recifes de Corais.

Os resultados obtidos através da aplicação do questionário aos estudantes de pós-graduação que visitaram os Parrachos de Maracajaú revelam percepções detalhadas sobre as vulnerabilidades ambientais da área.

Demografia dos participantes:

Os participantes variam significativamente em idade, abrangendo desde jovens adultos até indivíduos em estágios mais avançados de suas carreiras. As idades estão distribuídas da seguinte forma: uma pessoa de 24 anos, duas de 29 anos, e uma de cada nas idades de 30, 36, 39, 40, 42 e 50 anos. Esta ampla faixa etária sugere uma mistura de experiências de vida e perspectivas profissionais, o que pode enriquecer a compreensão e a discussão sobre as vulnerabilidades ambientais enfrentadas pela APA (figura 5).

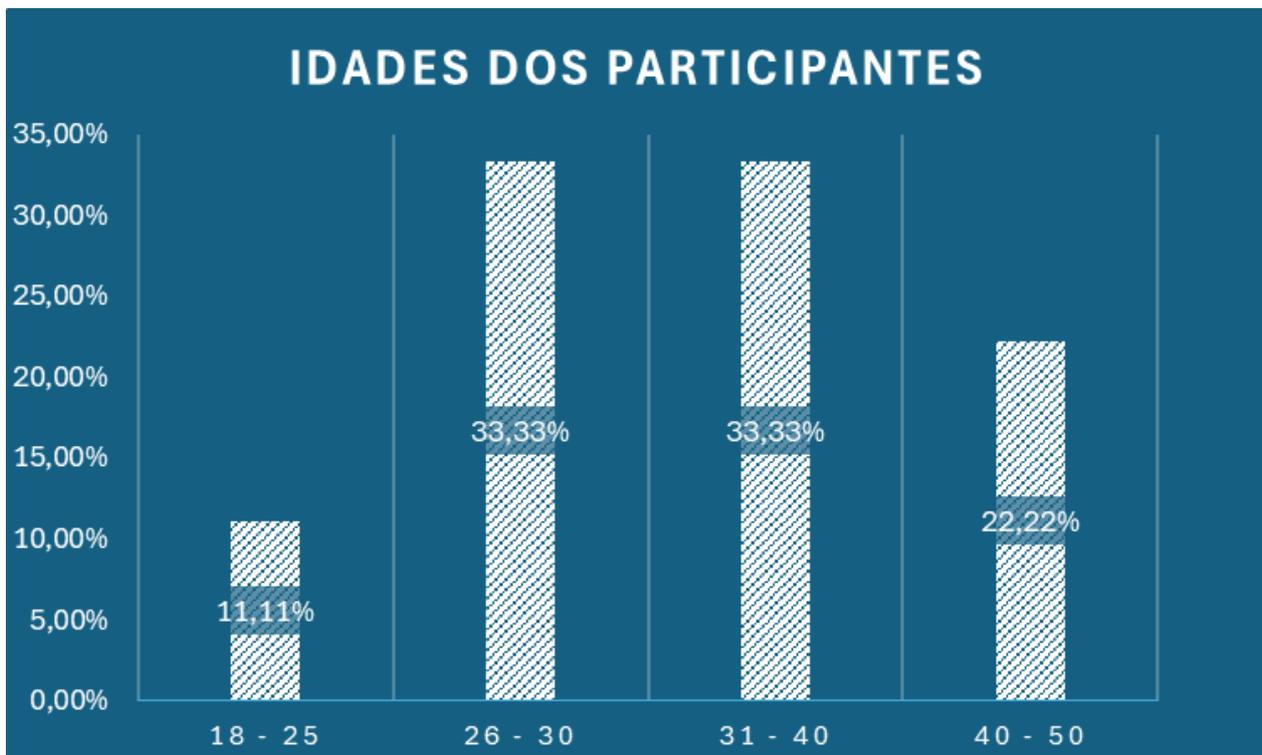


Figura 5: Faixa etária dos entrevistados da visita aos Parrachos de Maracajaú

Formação Acadêmica:

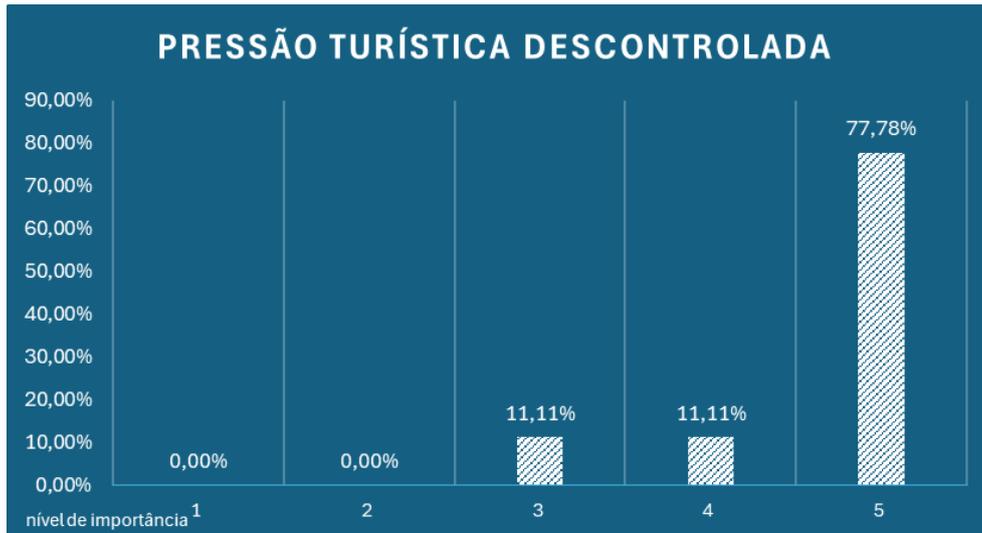
Os cursos de graduação dos participantes são igualmente variados, incluindo áreas como Direito, Ciências Naturais, Tecnologia em Saneamento Ambiental, Engenharia Civil, Geografia, Serviço Social e Enfermagem. Esta diversidade disciplinar é significativa porque traz uma riqueza de perspectivas ao estudo das questões ambientais. Por exemplo, enquanto um engenheiro pode focar em soluções técnicas para problemas ambientais, um profissional do direito pode considerar as implicações legais das práticas de conservação.

A diversidade na demografia dos participantes pode influenciar a forma como eles percebem e priorizam as ameaças ambientais aos Parrachos de Maracajaú. Por exemplo, participantes mais jovens podem ter diferentes níveis de otimismo ou pessimismo em relação à eficácia das medidas de conservação em comparação com participantes mais velhos, que podem ter observado mudanças ambientais ao longo de um período mais longo. Além disso, a interação entre participantes de diferentes áreas de estudo pode promover um diálogo enriquecedor que aborda a sustentabilidade de múltiplos ângulos, potencialmente levando a soluções mais holísticas e eficazes.

A análise de conteúdo baseada na metodologia de Bardin permitiu identificar as principais categorias de preocupações ambientais, quantificadas conforme mencionado pelos participantes:

Pressão Turística Descontrolada:

Um total de 77,8% dos respondentes identificou a pressão turística como a maior ameaça aos Parrachos de Maracajaú. Esta preocupação centrava-se no impacto negativo dos turistas nos recifes de coral, incluindo danos físicos diretos aos corais e perturbação à fauna marinha (figura 6).



Legenda: (1) Menos importante; (2) Pouco importante; (3) Importante moderadamente; (4) Muito importante; (5) Extremamente importante

Figura 6: Vulnerabilidades socioambientais enfrentadas pelos Parrachos de Maracajaú: Pressão turística descontrolada.

Esta categoria foi a mais citada, com estudantes destacando o impacto negativo de um fluxo elevado de turistas, que muitas vezes resulta em danos físicos aos corais e perturbação da vida marinha.

Poluição:

Um total de 66,7% dos participantes destacou a poluição como uma vulnerabilidade crítica, de nível de importância 5, citando especificamente os resíduos sólidos e a poluição da água por esgoto e plásticos, que afetam a qualidade do habitat marinho (figura 7).



Legenda: (1) Menos importante; (2) Pouco importante; (3) Importante moderadamente; (4) Muito importante; (5) Extremamente importante

Figura 7: Vulnerabilidades socioambientais enfrentadas pelos Parrachos de Maracajaú: Poluição por resíduos sólidos.

O resultado que destaca a poluição como uma das principais vulnerabilidades dos Parrachos de Maracajaú merece uma análise mais detalhada devido à sua relevância e impacto no ecossistema de recifes de coral. A preocupação com a poluição, mencionada por 66,7% dos estudantes de pós-graduação, é indicativa das diversas formas pelas quais os resíduos humanos afetam diretamente a saúde dos ecossistemas marinhos.

Os recifes de coral são ecossistemas extremamente sensíveis e a poluição representa uma ameaça significativa à sua saúde e sustentabilidade. A degradação física causada pelo lixo e a alteração química da água podem reduzir a resiliência dos corais a estressores ambientais, como o aquecimento das águas e a acidificação dos oceanos, ambos relacionados às mudanças climáticas. Além disso, a diminuição da qualidade da água pode afetar a reprodução dos corais, comprometendo a regeneração natural dos recifes.



Pesca Predatória:

Um terço dos respondentes (33,3%) identificou a pesca predatória como uma preocupação significativa, com nível de importância 5, destacando práticas como a coleta ilegal de espécies marinhas e o emprego de técnicas destrutivas de pesca. Essas atividades não só violam a legislação ambiental, mas também ameaçam a sustentabilidade dos delicados ecossistemas dos recifes, comprometendo sua capacidade de se regenerar e de sustentar a biodiversidade local (figura8).



Legenda: (1) Menos importante; (2) Pouco importante; (3) Importante moderadamente; (4) Muito importante; (5) Extremamente importante

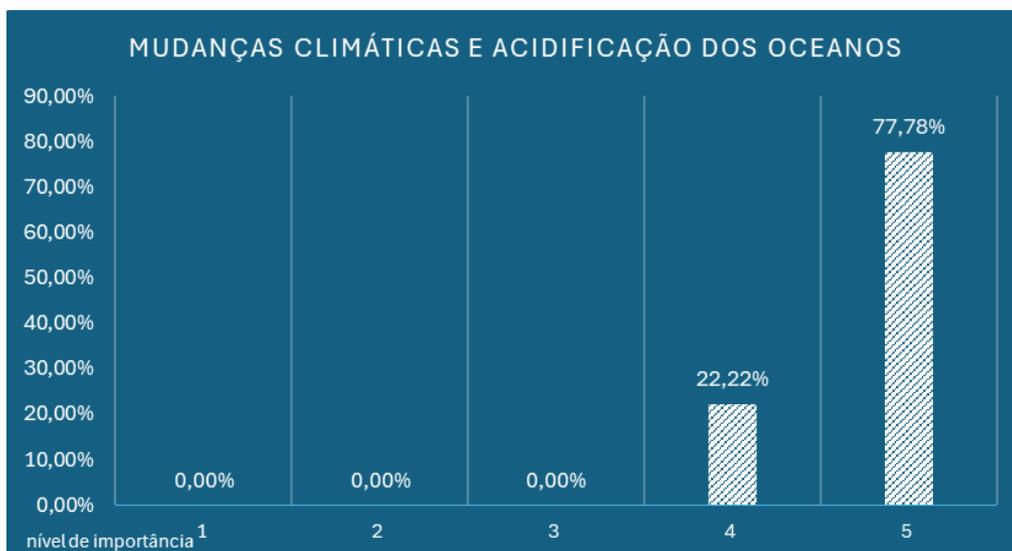
Figura 8: Vulnerabilidades socioambientais enfrentadas pelos Parrachos de Maracajaú: Pesca predatória.

Mudanças Climáticas:

A preocupação com as mudanças climáticas foi destacada por 77,8% dos estudantes, que expressaram alarme sobre os efeitos do aquecimento global e da acidificação dos oceanos no branqueamento de corais e na saúde geral dos recifes (figura 9).

Este dado sugere uma consciência sobre as implicações globais que impactam localmente, apontando para desafios ambientais de longo alcance que ultrapassam as fronteiras locais e exigem atenção internacional.

A menção das mudanças climáticas por uma fração dos participantes indica um entendimento de que os efeitos dessas mudanças são graduais e muitas vezes menos visíveis no curto prazo, mas com consequências devastadoras a longo prazo. Isso inclui o aumento das temperaturas oceânicas que pode levar ao branqueamento dos corais, uma condição que diminui a resiliência dos recifes e compromete sua capacidade de abrigar biodiversidade marinha. Além disso, a acidificação dos oceanos, também uma consequência das mudanças climáticas, deteriora as estruturas calcárias dos corais, essenciais para a manutenção da integridade física dos recifes.



Legenda: (1) Menos importante; (2) Pouco importante; (3) Importante moderadamente; (4) Muito importante; (5) Extremamente importante

Figura 9: Vulnerabilidades socioambientais enfrentadas pelos Parrachos de Maracajaú: Mudanças climáticas.



Vulnerabilidades Mais Difíceis de Mitigar

Os estudantes de pós-graduação que participaram do estudo nos Parrachos de Maracajaú foram questionados sobre quais vulnerabilidades ambientais consideravam mais difíceis de mitigar. As respostas revelaram que as principais preocupações giram em torno de duas grandes áreas: mudanças climáticas e pressão turística descontrolada.

Mudanças Climáticas: Esta foi identificada como a vulnerabilidade mais desafiadora de mitigar devido à sua natureza global e aos impactos abrangentes e de longo prazo. Os estudantes expressaram preocupação com a necessidade de ações globais coordenadas, que são complexas e envolvem negociações internacionais, políticas públicas abrangentes e mudanças nos padrões de consumo e produção. A dificuldade em mitigar os efeitos das mudanças climáticas é uma preocupação global que transcende as fronteiras locais. Este resultado reforça a importância de integrar ações locais de conservação com políticas globais de mitigação das mudanças climáticas. Ele também destaca a necessidade de educar e envolver a comunidade local e os visitantes sobre como suas ações contribuem para problemas globais, incentivando práticas mais sustentáveis.

Pressão Turística Descontrolada: A segunda vulnerabilidade mais citada foi a pressão turística, destacada como particularmente difícil de controlar devido ao conflito entre os benefícios econômicos imediatos do turismo e a necessidade de preservação ambiental de longo prazo. Os respondentes apontaram para a dificuldade em regulamentar e limitar o acesso sem prejudicar a economia local, que depende significativamente do turismo. O desafio de equilibrar a pressão turística com a conservação ambiental reflete um dilema comum em muitas áreas protegidas. Os estudantes reconheceram que, embora o turismo seja uma fonte vital de receita, sua gestão inadequada pode levar a danos irreversíveis ao ecossistema. Este resultado sugere que estratégias como limites de capacidade, educação de turistas, e o desenvolvimento de alternativas sustentáveis de turismo podem ser caminhos viáveis para mitigar essa vulnerabilidade.

Estes resultados destacam a complexidade das questões ambientais enfrentadas pelos Parrachos de Maracajaú e sublinham a necessidade de abordagens multifacetadas que combinem educação, política, e cooperação internacional. As respostas dos estudantes indicam uma clara compreensão das dificuldades associadas à mitigação de impactos ambientais em escala local e global, refletindo a urgência de buscar soluções que sejam tanto pragmáticas quanto sustentáveis.

Considerações Finais

Este estudo sobre as percepções dos estudantes de pós-graduação em relação às vulnerabilidades ambientais nos Parrachos de Maracajaú oferece insights valiosos para a gestão e conservação desses recifes de coral. A análise das respostas ao questionário revelou uma consciência profunda sobre várias ameaças significativas, incluindo a pressão turística, poluição, pesca predatória e mudanças climáticas. Estes resultados não apenas refletem a eficácia da visita educativa como ferramenta de sensibilização, mas também destacam a necessidade urgente de medidas integradas de gestão ambiental.

A predominância da preocupação com a pressão turística descontrolada sublinha a importância de equilibrar as necessidades econômicas locais com a preservação ambiental. Estratégias como a limitação do número de visitantes, a implementação de taxas de conservação, e a educação dos turistas sobre práticas responsáveis podem ajudar a mitigar os impactos negativos.

A poluição foi outro tema crítico levantado, apontando para a necessidade de melhorar as infraestruturas de gestão de resíduos e de tratamento de efluentes na região. Programas de educação ambiental devem ser ampliados para abranger tanto moradores locais quanto visitantes, promovendo uma cultura de responsabilidade e respeito pelo ambiente natural.

A pesca predatória, mencionada por um terço dos participantes, requer uma vigilância e fiscalização mais rigorosas, assim como o apoio a práticas de pesca sustentáveis que não só protejam a biodiversidade marinha, mas também sustentem as comunidades locais que dependem dessa atividade.

Quanto às mudanças climáticas, o estudo confirma a necessidade de incorporar ações de mitigação e adaptação nas políticas de gestão dos recifes. Iniciativas locais devem ser complementadas por esforços globais para combater o aquecimento global, uma vez que os efeitos das mudanças climáticas transcendem as fronteiras locais e têm impactos diretos sobre a saúde dos recifes.

Concluindo, este estudo destaca a importância de uma abordagem holística e integrada na gestão dos Parrachos de Maracajaú, que considere tanto as pressões locais imediatas quanto as ameaças globais de longo prazo. A educação continua a ser uma ferramenta essencial, não apenas para a conscientização, mas como um meio de empoderar os indivíduos para participarem ativamente na conservação deste valioso ecossistema. O compromisso contínuo com a pesquisa e a colaboração entre instituições acadêmicas, gestores de áreas protegidas, comunidades locais e o governo é crucial para garantir a sustentabilidade e resiliência dos recifes de coral de Maracajaú para as gerações futuras.

Referências Bibliográficas

Bardin L. 1977. Análise de conteúdo. Lisboa, Edições 70.

Bensusan, N. 2006. Conservação da biodiversidade em áreas protegidas. FGV Editora.

Inagaki, K. 2020. Interações tróficas irão expandir sua distribuição e diminuir sua intensidade diante das mudanças climáticas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Oliveira, W. A.; Sonaglio, K. E. 2019. Turismo e Inclusão Social: percepção das comunidades locais da Área de Proteção



Ambiental Jenipabu–Rio Grande do Norte (RN), Brasil. Turismo e Sociedade, v. 12, n. 1.

Reis, G. A.; Ribeiro, A. J. A.; Silva, C. A. U. 2020. Diagnóstico de vulnerabilidade socioambiental em áreas urbanas utilizando inteligência geográfica.

Santos, L. B. 2015. Caracterização das comunidades algais na área de preservação ambiental dos recifes de corais (aparc), rn: subsídios para monitoramento e conservação. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Silva, F. C. et al. 2018. Impactos do turismo na dieta de *Haemulon aurolineatum* (cuvier, 1830) em recifes coralíneos do Rio Grande do Norte.



LEVANTAMENTO FITOGEOGRÁFICO DO PARQUE MUNICIPAL TRÊS IRMÃOS, TERRA RICA-PR

1Elissandro Voigt Beier, 2Maria Eugênia Moreira Costa Ferreira

1 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná – IFPR, e-mail: elissandrovoigt@gmail.com; 2 Universidade Estadual de Maringá-UEM, e-mail: eugeniaguart@gmail.com;

Palavras-chave: Vegetação relictual; Paleocondições climáticas; Terra Rica-PR;

Resumo

Ocorrem no estado do Paraná formações vegetacionais xeromórficas de domínios fitogeográficos distintos dos locais em que se encontram inseridos, caracterizados na forma de relictos vegetacionais que ocuparam amplas áreas em períodos recuados quando condições climáticas transformaram a paisagem e permitiram a migração destas espécies de área nucleares, florescendo por longos períodos de retração e expansão destas diferentes formações. Neste estudo pretende-se efetuar o levantamento destas diferentes formações fitogeográficas xerófitas de Savana e Savana-Estépica inseridas na formação fitogeográfica Floresta Estacional Semidecidual contidas no Morro Três Irmãos, no Noroeste do estado do Paraná. O presente trabalho visa avaliar as diferentes formações vegetais que ocorrem no Morro Três Irmãos e áreas próximas, correlacionando a composição atual com pressupostos formulados e consolidados pela Teoria dos Refúgios Florestais com elementos paleobioindicadores como “stone lines”, campos de matações e a própria vegetação de famílias vegetais de cactáceas e bromeliáceas terrícolas, que remetem a climas semiáridos e semiúmidos remanescentes de uma variação climática ocorrida no Pleistoceno tardio. Para a análise da vegetação será implantada a metodologia de transecção, pirâmides fitogeográficas e do caminhamento. O transecto pode ser implantado de tamanhos variados, consistindo na observação das informações sobre os vegetais sobrepostos no alinhamento. Complementando estas informações, devem ser observadas as características ecológicas e ambientais dos locais de implantação por meio do preenchimento das fichas de Bertrand e Kùchler que agregam com as demais metodologias, as informações referentes a sociabilidade, abundância e dominância das espécies, refletindo na fitossanidade do conjunto. Coletas individuais, adotando-se o caminhamento pelos diferentes setores do Morro, plotagem por GPS para as ocorrências de espécimes xerofíticos isolados, coletas dos espécimes, assim como na metodologia do transecto, para tratamento e posterior identificação dos indivíduos; esta etapa contará com o apoio do Laboratório de Biogeodinâmica da Paisagem e do Herbário da Universidade Estadual de Maringá – HUEM, onde serão depositadas as exsicatas. A interpretação destes fragmentos inseridos em contexto vegetais diferentes dos que lhes originaram, exige a análise dos ambientes em que estão instalados, das espécies que ocorrem, seus estágios de adaptação e principalmente sua dispersão e implantação na paisagem do “Morro” para compreender sua resistência nos espaços da atualidade, procedendo-se para leitura fitogeográfica da formação geomorfológica com sua amálgama florística. Busca-se também a identificação dos corredores ou áreas de origem da flora xerofítica encontrada, tendo como hipóteses: a pretérita expansão da vegetação de savana Chaquenha, do Brasil Central ou das caatingas nordestinas e do norte da América do Sul. Observa-se que o Morro Três Irmãos foi decretado Monumento Natural Parque municipal Três Morrinhos pela legislação municipal de Terra Rica, sem até momento haver desenvolvido o plano de manejo ou regularizado elementos essenciais à conservação dos aspectos naturais encontrados; também não há avaliação formal da biodiversidade ou de elementos turísticos negligenciados, endossando-se a discussão quanto à exploração do local sem regulamentação adequada em um ambiente de elevada sensibilidade ambiental, diversificada biodiversidade, palimpsesto histórico, que requer políticas e estratégias específicas de gestão e de conservação. Como resultados preliminares, soma-se a identificação de diferentes espécies de cactáceas terrícolas, bromélias e vegetação de Savana florestal, adaptadas a condições do microclima e pedológicas, respectivamente, inseridas em ambientes que configuram uma pretérita condição de semiaridez, formações essas permeadas por elementos da Floresta Estacional Semidecidual em recuperação e que constitui na atualidade a formação vegetal dominante, na região.

Introdução

A monotonia paisagística do noroeste do Paraná é quebrada pelo avistamento de um morro, especificamente, os Três Morrinhos são elevações anômalas, alongadas e solitárias, que se destacam na paisagem de colinas amplas do Noroeste do Paraná (FERNADES; COUTO; SANTOS, 2012).

Considerando as atuais características da paisagem do morro e seu entorno, que apresenta uma flora com elementos de “enclaves”, surgiu a possibilidade de implantar os pressupostos da teoria dos refúgios e redutos florestais, que Ab’Sáber (2017) coloca como, um dos mais importantes corpos de ideias referentes aos mecanismos padrões de distribuição de floras e faunas da América Tropical. O referido autor reforça que esta teoria, nascida de considerações sobre as flutuações climáticas do Quaternário na América do sul e central, constitui-se numa das mais sérias tentativas de integração das ciências fisiográficas com as ciências biológicas, ocorridas depois do darwinismo (AB’SÁBER, 2017).

Conforme Viadana (2002, p. 20-21), pode-se entender que a Teoria dos Refúgios Florestais alega em síntese a ideia relacionada às flutuações climáticas da passagem para uma fase mais seca e fria durante o Pleistoceno terminal, repercutindo esta transformação na dinâmica biofísica de extensas áreas, fragmentando a formação vegetal a pontos de maior umidade e sendo esta substituída por elementos fitogeográficos de savana e savana estépica, adaptados a condições de escassez hídrica.



Trazendo a discussão para a área de estudo, um enclave fitogeográfico do Morro Três Irmãos, Terra Rica-PR, corresponde a uma fitogeográfica composta de elementos xerofíticos de formação aberta (cactáceas, bromeliáceas e espécies do cerrado), e elementos de formação florestal (Floresta Estacional Semidecidual). Esta “ilha” de vegetação encontra-se inserida no que restou da Floresta Estacional Semidecidual do interior.

O estado do Paraná (PR), uma das últimas regiões em que os ecossistemas naturais foram mais rapidamente degradados foi a região norte. A área ocupada pelo município de Terra Rica era recoberta por uma extensa e fechada mata nativa, fitogeograficamente denominada de Floresta Estacional Semidecidual, o morro fora abraçado pela densa cobertura vegetal do noroeste do estado composta por *Aspidosperma polyneuron* Müll. Arg. (Apocynaceae) sendo a espécie mais característica, assim como Ipê, cedro e outras, tendo como principal característica fisionômica a semidecidualidade, na estação desfavorável (RODERJAN et al, 2002).

Na década de 1950, nos primeiros anos de colonização, houve uma grande extração de madeira que mudou a paisagem original (MAACK, 2002). Atualmente, as formações florestais são representadas por pequenos fragmentos de mata entre áreas cultivadas, em especial em áreas de mata ciliar, em um esquema de mancha e matriz. A Floresta Estacional Semidecidual sofreu, ao longo do tempo, desmatamentos devido à implementação de culturas agrícolas, principalmente do café e na atualidade de cana-de-açúcar (MAACK, 2002).

O remanescente florestal, mesmo tendo sofrido com a antropização, ainda abriga grande biodiversidade, e embora os fragmentos não sejam áreas tão adequadas para a conservação da biodiversidade, dado o forte efeito de borda e demais problemas ambientais observados, têm um papel decisivo como corredores ecológicos, permitindo que organismos se desloquem para áreas próximas (Alves, et. al. 2014).

Caracterização da Área De Estudo

A vegetação é o reflexo da interação de um conjunto de fatores naturais, dentre os quais notadamente altitude, latitude, clima e formação pedológica (PARANÁ, 1987).

O referido trabalho tem como objetivo analisar a composição fitogeográfica e através da espacialização dos indivíduos cartografar os espécimes xerofíticos e a matriz florestal do Monumento natural Morro Três Irmãos (figura 1), através da sistematização espacial dos exemplares na Área de Preservação Permanente (APP) conhecido como parque dos Três morrinhos, resultando em uma dispersão através das espécies coletadas.

Esse remanescente florestal encontra-se inserido na zona rural, próximo ao perímetro urbano de Terra Rica, geograficamente denominada Morro Três Irmãos, situado na

porção noroeste do estado do Paraná, geomorfologicamente falando encontra-se sobre o Planalto de Paranavaí (MINEROPAR, 2006).

A formação geomorfológica apresenta relevo de alta dissecação, com declividade superior a 30°, principalmente no topo de duas das formações, e estão inseridos em uma paisagem de colinas suaves, apresentando relevo regional de baixa dissecação, de topos aplainados, declividade média de 6%, vertentes extensas com predomínio de Latossolos nos topos e argissolos na média vertente (EMBRAPA SOLOS, 2018).

Pela configuração de morro testemunho, revelando um período importante da geologia da Paleobacia Bauru e pelo seu caráter cênico e representativo na paisagem a área está classificada como Sítio Geológico no Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos – SIGEP, tendo sido classificado como Sítio Geológico - Três morrinhos, SIGEP Sítio 058 (FERNADES et al., 2012).

A geologia da área é caracterizada por deposições da paleobacia Bauru, com arenitos da Formação Rio Paraná, do Grupo Caiuá. Apresentam granulação areia muito fina a média, são bem selecionados, com predomínio de grãos de quartzo monocristalino com elevado grau de esfericidade e arredondamento (FERNADES et al., 2012).

São elevações regionais anômalas, sustentadas por arenitos silicificados, preservam ainda como morros-testemunho importante registro da sequência sedimentar neocretácea que preencheu a Bacia, além ainda da importância como testemunho de processos geomorfológicos e geológicos que o originaram (FERNADES et al., 2012).

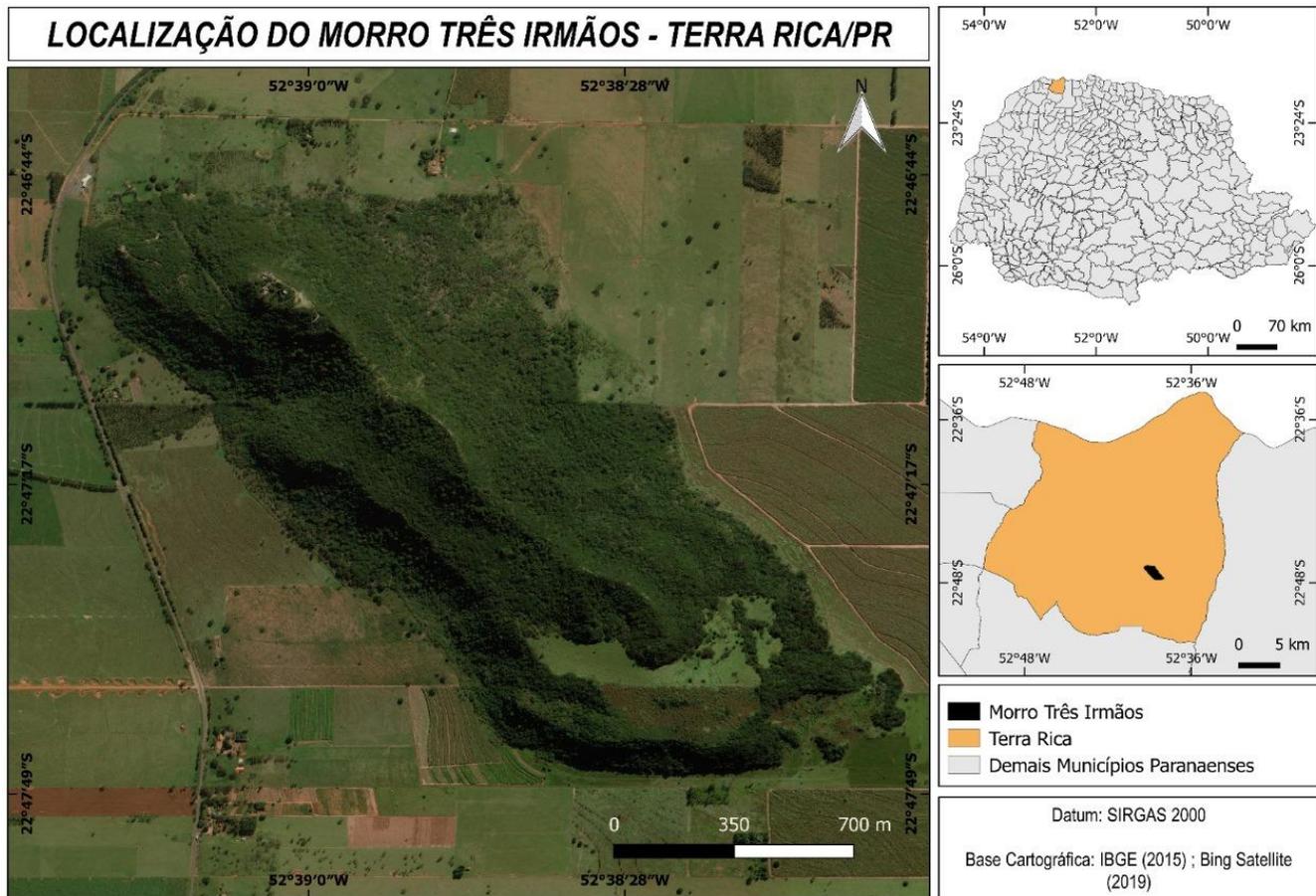


Figura 01: área do Parque Três Irmãos e entorno.

Procedimentos Metodológicos

O levantamento de espécies xerofíticas da savana e savana estépica foi realizado em coletas campais nos meses de inverno (seco) e verão (chuvoso), no território do Parque municipal dos Três Irmãos, no município de Terra Rica-PR, ao longo dos de 2019, 2020, 2021, 2022 e 2023.

Para as coletas no território do parque municipal Três Irmãos, adotou-se o método de caminhamento (FILGUEIRAS et al., 1994), onde foram percorridas linhas horizontais pré-estabelecidas no mapa da área em busca de espécimes xerofíticas. A observação de espécimes fitogeográfica foi realizada a partir do solo em todas as áreas, e quando se fez necessário foi realizada escalada natural do forófito para coleta dos exemplares.

Como a área é composta por um remanescente da Floresta Estacional Semidecidual, exemplares desta formação fitogeográfica foram igualmente coletados uma vez que em certos pontos esta formação fitogeográfica predomina, e em outras encobre as espécies xerofíticas, logo, a fim de representar todo o mosaico vegetal optou-se pela composição geral de espécies.

O material testemunho foi coletado em diferentes fases, reprodutiva e fase não reprodutiva, para preparo de exsiccatas e adequada identificação. A preparação de exsiccatas do material coletado seguiu a metodologia de Mori et al. (2011).

Foi realizada a identificação dos espécimes no laboratório de Biogeografia da Universidade Estadual de Maringá com o auxílio de chaves taxonômicas, bibliografia pertinente (DETTKE et al., 2020), (RAMOS et al., 2015), comparações com exsiccatas, consulta no banco de dados da Lista de Espécies da Flora do Brasil (ZAPPI et al., 2015). Uma vez identificadas as exsiccatas foram armazenadas no Herbário da Universidade Estadual de Maringá, departamento de Biologia onde foram catalogadas e inseridas no acervo do HUEM.

A coleta de material testemunho foi realizada sempre que a espécie era registrada pela primeira vez nos caminhamentos. Quando as espécies se repetiam durante os caminhamentos eram tomados apenas informações quanto a espécie, sem repetição de coletas, sendo realizados registros fotográficos, assim como a tomada de informações através de anotações no caderno de campo, com plotagem da localização dos espécimes.

Para o entendimento da distribuição vertical das espécies, os suportes de apoio para o desenvolvimento das espécies em geral foram divididos conforme sua apresentação: rupestre (ocorrência sobre rocha), terrícola (ocorrência sobre o solo) e epífita (suporte aéreo, tronco ou estrutura de outro vegetal), nas quais foram registradas todas as espécies epifíticas ocorrentes. Observou-se a caracterização ecológica dos espécimes enquanto suporte no momento da sua captura no fragmento florestal, não foram feitas leituras para os indivíduos vegetais quanto as possibilidades de ocorrência comum para outras estruturas que não as observadas.



Resultados e Discussão

O levantamento das espécies no fragmento florestal do Parque Três Irmãos resultou no registro de 53 famílias no total, dentre estas encontram-se espécies exclusivas da formação de savana, espécies de formações de transição e espécies Florestais (Figura 02). Dentre as espécies com caráter relictuais, a família com maior representatividade foi a cactaceae (10 espécies), seguida de Bromeliaceae (06 espécies), Erythroxilaceae (03 espécies), Vochysiaceae (03 espécies), ambas com (04 espécimes cada), correspondendo as demais famílias às formações florestais e de transição.

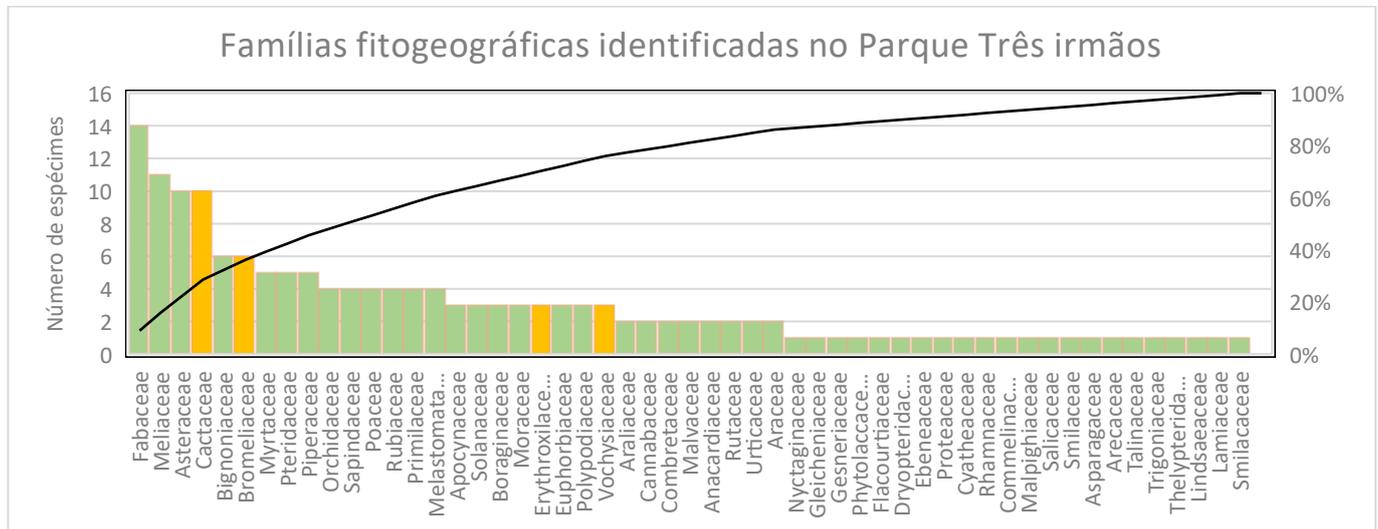


Figura 02: gráfico com a relação das famílias.

Todas as 53 famílias vegetais apresentaram diferentes espécies relacionadas, que não serão descritas neste trabalho por uma questão de didática, sendo apresentadas com mais propriedades em trabalho futuramente apresentado em periódico.

Analisando a flora de cactáceas coletadas, foi realizada por (Soller et al., 2014) levantamento da flora xerofítica da família cactaceae e identificou-se a espécie *Brasilopuntia brasiliensis* (Willd.) A. Berger (figura 3-B), *Pereskia aculeata* Mill., ocorrendo naturalmente na Estação Ecológica do Caiuá no sub-bosque de Floresta Estacional Semidecidual no Paraná. As amostras identificadas para esta espécie observadas no locus deste trabalho assemelham-se em condições ecológicas as descritas por Soller et al (2014) amostra identificada na E. E. Diamante do Norte em Diamante do Norte, PR.

A espécie *Pereskia aculeata* Mill. é (figura 3-C), caracterizada pelo hábito escandente e crescimento indeterminado, em muitas ocasiões tornando o ápice da planta pendente. Ocorre na Floresta Estacional Semidecidual do Paraná e o estado representa o limite sul de ocorrência da espécie no Brasil Soller et al (2014). Observou-se em dois momentos distintos para a área de estudo que a *Pereskia* altera sua fisionomia vegetal, quando no período de chuvas a planta apresenta estrutura foliar extravagante e ocorre também o período de reprodução, retornando no período seco para a região (abril-setembro), a planta resistia sem folhas inteiras e apresentava apenas ramos, em uma condição visual muito distinta da observada no período anteriormente mencionado na E. E. Diamante do Norte em Diamante do Norte, PR.

Cereus hildmannianus K. Schum. Também encontrado para a área de estudo é um cacto colunar de porte arborecente podendo apresentar a base do caule recoberta por periderme. É encontrado no centro e no oeste do Paraná na Floresta Estacional Semidecidual e ocorre geralmente em afloramentos rochosos Soller et al (2014). Para a área de estudo observou-se a presença desta espécie em maior densidade para a face norte (maior incidência solar), eventualmente indivíduos isolados na face sul, sobre solo litólico ou afloramento rochoso amostra identificada em Campo Mourão, PR.

Praecereus euchlorus (figura 3-D), outro exemplar amplamente difundido na região é um cacto colunar de porte arbustivo, ramificado apenas da base dos segmentos caulinares, alcançando até 4 m compr. × 37–45 mm diâm. se diferenciando de *Cereus hildmannianus* que atinge 15 m compr. × 58–165 mm diâm. e possui ramificações ao longo dos segmentos caulinares. Ocorre na parte central e oeste do Paraná na Floresta Estacional Semidecidual Soller et al (2014). Observado na área de estudo com maior densidade no topo, face norte e oeste (maior incidência solar), associados a solos rasos e litólicos, ou diretamente sobre afloramentos rochosos (paredões), não são observados em meio a Floresta estacional Semidecidual estruturada e conservada, ou mesmo na face sul e leste, amostra identificada no Morro do Diabo-SP e na E. E. Diamante do Norte, E.E. Caiuá em Diamante do Norte, PR.

As demais espécies da família das cactáceas corresponde a espécies com hábitos epífitas, e são descritas para diferentes localidades do estado do Paraná por Soller et al (2014).

Epiphyllum phyllanthus é caracterizado pelo caule alado, de crescimento indeterminado, que alcança 1,5 m compr. Ocorre no norte do Paraná, na região da Floresta Estacional Semidecidual, identificada em Campo Mourão-PR, Soller et al (2014).

Lepismium cruciforme (Vell.) Miq. (figura 3-A), é a única espécie do gênero com segmentos do caule completamente cilíndricos e é confundida com espécies de *Rhipsalis*. Ocorre em todas as formações florestais do estado Soller et al (2014).

Hylocereus setaceus pode ser reconhecido por possuir caule com seção trígona. Ocorre naturalmente nos paredões do Rio Paraná, região de Floresta Estacional Semidecidual no Paraná. Difere de *Hylocereus undatus*, não considerado nativo por ser encontrado apenas em áreas antropizadas Soller et al (2014).



Figura 3 - Aspectos da vegetação xerofítica do Morro Três Irmãos

A: *Hylocereus setaceus* (Salm-Dyck) R.Bauer **B:** *Brasiliopuntia brasiliensis* (Willd.) A. Berger
C: *Pereskia aculeata* **D:** *Praecereus euchlorus*

Ainda referente as espécies identificadas, as espécies coletadas e tratadas nas três áreas de coleta, com maior ênfase para o “Morro”, onde foi possível observar uma maior diversidade e densidade de espécies pretendidas. Foram consideradas as espécies exóticas e naturalizadas, conforme identificação, considerando o impacto antrópico na região e principalmente a condição de vulnerabilidade da área pela competição de espécies externas somado aos problemas ambientais presentes.

Quanto às espécies, foram ainda considerados elementos da Floresta Estacional Semidecidual enquanto bioma de inserção da vegetação relictual e como estudo, para registro das espécies identificadas nas áreas em discussão.

Foi realizada uma análise das espécies até o presente momento identificadas para a área em questão, em comparativo com elementos fitogeográficos do cerrado em outros pontos do estado do Paraná (Campo Mourão, Jaguariaíva, interflúvio Bandeirantes/Pirapó), relacionando espécies, ou famílias às encontradas em Terra Rica.

Para Campo mourão (Monteiro, Parolin, Caxambu, 2015), descreve a ocorrência de *Pyrostegia venusta* (Ker Gawl.) Miers, *Austroepatorium inulaefolium* R.M. King & H. Rob., *Coccocypselum lanceolatum* (Ruiz & Pav.) Pers., *Matayba elaeagnoides* Radlk., *Casearia sylvestris* Sw., *Luehea candicans* Mart. & Zucc., *Orthopappus angustifolius* (Sw.) Gleason, *Sinningia carangolensis* Chautems, *Tabernaemontana catharinensis* A.DC., *Vochysia tucanorum* Mart., *Byrsonima intermedia* A.Juss., *Moquiniastrum polymorphum* subsp. *Floccosum* (Cabrera) G. Sancho, espécies comuns a Terra Rica.

Linsingen, et. Al (2006), desenvolveram um estudo nas diferentes formações vegetais do Parque do Cerrado de Jaguariaíva-PR, onde foram identificadas para a formação vegetal cerradão, duas espécies comuns *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg., *Acosmium subelegans* (Mohlenbr.) Yakovlev e duas famílias em comuns (Byrsonima, Qualea), na formação vegetal campo cerrado igualmente são identificadas duas espécies *Byrsonima intermedia* A.Juss., *Bauhinia holophylla* (Bong.) Steud. Para a zona de ecótono foram identificadas as espécies listadas. *Myrcia breviramis* (O. Berg) D. Legrand, *Vochysia tucanorum*



Mart., *Qualea cordata* (Mart.) Spreng. Na Floresta ripária (Floresta de galeria) ocorrem as seguintes espécies, *Myrsine umbellata* Mart., *Casearia sylvestris* Sw. Para a Floresta Higrófila (Floresta Paludosa) *Cecropia pachystachya* Trécul, *Myrcia multiflora* (Lam.) DC., estas foram as espécies vegetais comuns ao levantamento de Terra Rica.

Para o divisor de águas Bandeirantes/Pirapó no estado do Paraná Paula (2008) identificou quatro espécies, (*Byrsonima intermedia* A.Juss), (*Coccocypselum lanceolatum* (Ruiz & Pav.) Pers.), (*Psychotria carthagenensis* Jacq.), *Acosmium subelegans* (Mohlenbr.) Yakovlev; dois gêneros (*Psidium guajava* L.), (*Eugenia uniflora* L.), e duas famílias *Vochysia*, *Piptocarpha*, comuns a flora da Savana identificada no Morro Três Irmãos.

Erythroxylum suberosum A. St. – Hil., *Qualea grandiflora* Mart. (espécie), *Qualea dichotoma* (Mart.) Warm. var. *dichotoma*, sendo conhecida o gênero *Qualea*, *Miconia rubiginosa* (Bonpl.) DC., *Psidium cinereum* Mart. ex. DC., *Vochysia tucanorum* Mart., *Aechmea distichantha* Lem., *Bromelia balansae* Mez, *Bauhinia* sp (gênero), *Sinningia sellovii* (Mart.) Wiehler (aflor. Rochoso), *Myrsine coriacea* (Sw.) R.Br., *Eugenia uniflora* L., (SILVA, 2009), este é outro conjunto de espécimes de formações savanóides encontrados em áreas interioranas do Paraná, cujas espécies também se expressam na área de pesquisa.

Shinobu (2014) identificou as seguintes espécies típicas para a formação fitogeográfica de Savana no Morro Três Irmãos, a constar, *Baccharis dracunculifolia* DC., *Erythroxylum suberosum* A. St. – Hil., *Miconia pohliana* Cogn., *Psidium cinereum* Mart. ex. DC., *Luehea candicans* Mart. & Zucc., *Qualea dichotoma* (Mart.) Warm. var. *dichotoma*, *Vochysia tucanorum* Mart., *Vochysia cinnamomea* Pohl, *Senecio brasiliensis* (Spreng.) Less., *Eremanthus elargnus* Sch. Bip., *Tournefortia breviflora* Eham., *Erythroxylum cuncifolium* (Mart.) O. E. Sherlg., *Alchornea triplinervia* (Spreng.) M. Arg., *Machaerium brasiliense* Vogel, *Banisteriopsis bipetala*, *Mimosa debilis* Humb. & Bonpl. Ex. Willd., *Myrcia rostrata* (Sw.) DC., e os três gêneros *Machaerium* sp., *Sebastiania* sp., *Psidium guajava* L.

Em um grau de refinamento e comparação a espécie *Byrsonima intermedia* A.Juss. é encontrada em âmbito comum para o cerrado de Campo Mourão, Cerrado de Jaguariaíva, Interflúvio do rio Bandeirantes/Pirapó e igualmente para o levantamento de Terra rica.

O gênero *Vochysia* é comum para as quatro áreas, com especificidades quanto as espécies que diferenciam, porém o gênero é encontrado simultaneamente, a exemplo de *Vochysia tucanorum* Mart., encontrada nas diferentes parcelas acima apresentadas.

Luehea candicans Mart. & Zucc., *Coccocypselum lanceolatum* (Ruiz & Pav.) Pers., são encontradas em âmbito comum para o cerrado de Campo Mourão, Interflúvio do rio Bandeirantes/Pirapó e igualmente para o levantamento de Terra rica em levantamento realizado pelo autor.

Acosmium subelegans (Mohlenbr.) Yakovlev outra espécie identifica para o Interflúvio do rio Bandeirantes/Pirapó, para o cerrado de Jaguariaíva e igualmente para o levantamento de Terra rica.

Casearia sylvestris Sw. espécie identificada para Campo Mourão, Jaguariaíva e igualmente para o levantamento de Terra rica.

Ratter et al. (2003) distribuem o cerrado no Brasil em seis províncias florísticas: Sulinas, Centro-oeste, Central, Sudeste, Extremo-Oeste e Nordeste e disjunções amazônicas. Apenas da heterogeneidade natural, cinco províncias (excetuam-se as disjunções amazônicas) compartilham 25 espécies mais frequentes (BRIDGEWATER; RATTER; RIBEIRO, 2004) os quais podem ser considerados como espécies características que definem o bioma.

Reafirmando que se propôs aqui apenas comparar as espécies encontradas pelo autor em Terra Rica, com as demais pesquisas de outras áreas, e da mesma área em outro período por Paula (2014). Ocorrem diversas outras espécies comuns para as referidas áreas, porém não abarcam o escopo do levantamento do autor, até o presente momento, podendo esta comparação ser alterada em razão de novas coletas e identificações.

Ratter et al. (1996), realiza a análise das espécies mais características do cerrado, tomando como base 98 locais de coleta e identificação, formulando desta forma, por meio da análise estatística, agrupa em áreas comuns pelo território brasileiro a disposição dos exemplares. Resulta deste agrupamento que as espécies encontradas no estado do Paraná, porção mais meridional do cerrado, têm grande similaridade com o núcleo sulista-São Paulo.

Paula (2008), p. 57, afirma que o cerrado do Morro Três Irmãos pode estar relacionado aos cerrados de Mato Grosso e da região Chaquenha do centro sul do continente Sul-Americano, visto a ocorrência frequente de cactáceas. Embora a vegetação típica do semiárido, como as cactáceas, possa refletir especialidades dos solos e/ou aos afloramentos rochosos, como os que ocorrem no morro Três Irmãos.

Como ainda existem elementos paleobioindicadores a serem trazidos à discussão, seria prematuro afirmar qualquer relação específica quanto a proximidade vegetacional, ou afirmar quais as condições que permeiam a manutenção das espécies xerófilas no “Morro Três Irmãos”.

O que se pode inferir, principalmente às espécies acima evidenciadas e comparadas às espécies levantadas por Ratter et al. 1996 para a Southern sites em seu estudo, é a similaridade de espécies. O estudo evidencia a proximidade de espécies com a área core do cerrado, tendo a área Southern (região que compreende ao noroeste de São Paulo, Sul de Mato Grosso do Sul e parte sul de Minas Gerais), podendo ser a região do que outrora fora o Noroeste com sua flora xerofítica como um desdobramento derivativo deste, em comparação às espécies.

Considerando o estudo de Ratter et al. (1996), este, identificou 28 espécies comuns a todas as áreas do estudo, e para Terra Rica também se fez esta relação, sendo identificadas três espécies *Erythroxylum suberosum* A. St. – Hil, *Roupala montana* Aubl., *Qualea grandiflora* Mart., e os quatro gêneros, *Byrsonima coccolobifolia*, *Verbascifolia*, *Astronium*, *Machaerium*.

Desta forma este estudo buscou por meio da identificação de espécies ligadas a padrões xerofíticos e principalmente a formações vegetais abertas uma similaridade em espécies e similaridade nos padrões de distribuição dos mesmos.



Comentários finais

Considera-se um grande avanço aos resultados obtidos, considerando o grau de fragilidade e de ameaça que ocorre na área de pesquisa.

Os resultados acima discutidos apontam uma relação clara para uma área geograficamente próxima que ao longo do processo migratório forneceu os genes e os espécimes para a variação dos indivíduos austrais desta formação fitogeográfica, considerando as espécies encontradas na área de estudo e as espécies da região sudeste, mais proximal geograficamente.

Deste mosaico de riqueza gênica surge a eminente urgência da preservação da riqueza, assim com as espécies florestais identificadas, mas não referidas, que permeiam a maior parte das coletas e da composição fitogeográfica do Morro Três irmãos.

Agradecimentos

Os Autores agradecem a CAPES, pela concessão da bolsa de pesquisa, Ao Programa de Pós-graduação em Geografia-PGE pela oportunidade do doutoramento e ao Herbário da UEM pela salvaguarda das exsicatas e auxílio na identificação de espécies.

Referências Bibliográficas

AB'SABER, A. N.; 2017. Brasil: paisagens de exceção: o litoral e o Pantanal Mato-Grossense: patrimônios básicos. [S.l: s.n.], 4ª Edição, Ateliê Editorial.

DETTKE, G. A., et al. Diversidade polínica de plantas da Floresta Estacional Semidecidual do Paraná. Presidente Prudente: Gráfica CS, 2020.

DETTKE, G. A.; ORFRINI, A. C.; MILANEZEGUTIERRE, M. A. Composição florística e distribuição de epífitas vasculares em um remanescente alterado de Floresta Estacional Semidecidual no Paraná, Brasil. Rodriguésia, v. 59, n. 4, p. 859 - 872, 2008.

FERNANDES, L. A.; COUTO, E. V.; SANTOS, L. J. C.; 2012. Três Morrinhos, Terra Rica, PR. Arenitos silicificados de dunas do Deserto Caiuá testemunham nível de superfície de aplainamento K-T. Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil – SIGEP.

FILGUEIRAS, T. S.; NOGUEIRA, P. E.; BROCHADO, A. L.; GUALA II, G. F. Caminhamento – Um método expedito para levantamentos qualitativos. Cadernos de Geociências, Rio de Janeiro, v. 12, p. 39 - 43, 1994.

FIDALGO, O.; BONONI, V. L. R., (Coords.). Técnicas de coleta, preservação e herborização de material botânico. São Paulo: Instituto de Botânica, 1984.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA / INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. 2018. Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica - período 2016-2017. Relatório Técnico. 63p. São Paulo. Disponível em: Acesso em: Dez/2021.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA / INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. 2009. Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica — período 2005-2008. Relatório Técnico. São Paulo: Fundação SOS Mata Atlântica/INPE. Disponível em: Acesso em: Dez/2021.

IBGE - FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2012. Manual Técnico da Vegetação Brasileira. Séries Manuais Técnicos em Geociências. 2 eds. revisada e ampliada. Rio de Janeiro: IBGE.

MAACK R. 2002. Geografia Física do Estado do Paraná. Curitiba: Imprensa Oficial, 440 p.

MINEROPAR. Minerais do Paraná: Atlas Geomorfológico, 2006.

MORI, S. A.; BERKOV, A.; GRACIE, C. A. & HECKLAU, E. F (eds). 2011. Tropical plant collecting: from the field to the internet. TECC Editora, Florianópolis. 332p.

PARANÁ. Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento. Instituto de Terras, Cartografia e Florestas. Atlas do Estado do Paraná. Curitiba: [s.n.], 1987. 73 p., il.

RAMOS, V. S.; DURIGAN, G.; FRANCO, G. A. D. C.; SIQUEIRA, M. F. a de; RODRIGUES, R. R. Árvores da Floresta Estacional Semidecidual: guia de identificação de espécies. [S.l: s.n.], 2008.

SANTOS, Humberto Gonçalves dos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 5 Brasília: EMBRAPA, 2018, 356 p.



SOLLER, A., P. SOFFIATTI, A. CALVENTE, AND R. GOLDENBERG. 2014. A Família Cactaceae Juss. No Estado do Paraná, Brasil. *Rodriguesia* 65: 201–219.

SOARES-SILVA, L.H. 1990. Fitossociologia arbórea da porção norte do Parque Estadual Mata dos Godoy, Londrina-Pr. 196 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Botânica do setor de Ciências Biológicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

VIADANA, A. G. 2002. A Teoria dos Refúgios Florestais Aplicada ao Estado de São Paulo. Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, 165p. (Tese de Livre docência em Geografia).

ZAPPI, D., TAYLOR, N., SANTOS, M.R., LARROCCA, J. 2015. Cactaceae in Lista de Espécies da Flora do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/jabot/floradobrasil/FB70>, (acesso em 10-10-2021).

ZAPPI, D., TAYLOR, N., SANTOS, M.R., LARROCCA, J. 2015. Cactaceae in Brazilian Flora Species List. Rio de Janeiro Botanical Garden. Available in: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/jabot/floradobrasil/FB70>, (access in 10-10-2021).

ÁREA TEMÁTICA 4

ENERGIAS RENOVÁVEIS



3º CONGRESSO INTERNACIONAL DE
**ENGENHARIA
AMBIENTAL**



POBREZA ENERGÉTICA E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA. CONSIDERAÇÕES SOBRE A REGIÃO NORTE DO BRASIL, ONDE SE LOCALIZA A AMAZÔNIA

1Nathalia Ribeiro de Assis

1 Graduada em Engenharia Ambiental, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE), e-mail: n.assis@unesp.br

Palavras-chave: Pobreza energética. Energias Renováveis. Transição Energética.

Resumo

A pobreza energética, um desafio complexo, permeia vastas regiões do mundo, incluindo a Amazônia brasileira. Este texto discorre sobre as interseções entre pobreza energética, desigualdade socioeconômica e avanços rumo a fontes de energia mais limpas, com comentários sobre a América Latina e regiões rurais do Brasil. O acesso limitado a fontes de energia limpa representa um dilema significativo para grande parte da população brasileira, resultando na disseminação do uso de combustíveis poluentes, em detrimento de alternativas mais sustentáveis e menos nocivas à saúde pública e ao meio ambiente. A desigualdade socioeconômica exerce um impacto severo, dificultando ainda mais a participação ativa das comunidades vulneráveis na transição energética em curso. A falta de recursos econômicos e condições dignas de vida impede a adoção de soluções mais limpas e eficientes. Nesse contexto, a energia proveniente do biogás emerge como alternativa viável, especialmente para as comunidades rurais que habitam a maior floresta tropical do mundo. Estudos recentes, que utilizam o Índice de Pobreza Energética Multidimensional (IPME), destacam a precariedade dos serviços energéticos na região Norte do Brasil, onde a Amazônia se situa. Esses estudos sublinham a urgência de buscar soluções acessíveis e eficazes para essas comunidades vulneráveis. Em resumo, a pobreza energética nessa região reflete não apenas um problema local, mas um desafio global que exige ação imediata e coordenada. Investir em fontes de energia mais limpas e acessíveis é crucial não apenas para mitigar os efeitos adversos da pobreza energética, mas também para promover o desenvolvimento sustentável e a equidade socioeconômica em regiões isoladas e socialmente vulneráveis.

Introdução

Mais de 2,1 bilhões de pessoas em todo o mundo, aproximadamente um terço da população global, cozinham utilizando lareiras ou fogões ineficientes alimentados por querosene, biomassa (como madeira, estrume animal e resíduos agrícolas) e carvão (Tracking SDG7, 2022). Essa prática gera poluição atmosférica doméstica prejudicial, responsável por cerca de 3,2 milhões de mortes por ano em 2020, incluindo mais de 237.000 mortes de crianças com menos de 5 anos. Os efeitos combinados da poluição atmosférica ambiental e da poluição atmosférica doméstica estão associados a 6,7 milhões de mortes prematuras anualmente (OMS, 2023).

A conexão entre poluição do ar domiciliar e saúde humana é um tema crucial e complexo que merece uma análise detalhada. Estudos mostram que essa forma de poluição está intrinsecamente ligada a doenças crônicas que têm impactos devastadores na qualidade de vida e nas atividades diárias, especialmente para mulheres e crianças. Esses grupos demográficos são os mais vulneráveis e sofrem o maior impacto da exposição prolongada à poluição do ar dentro de suas próprias casas (OMS, 2023).

A magnitude desses impactos é alarmante, com estimativas sugerindo que até 82 milhões de anos de vida saudável são perdidos a cada ano devido a essa exposição (Tracking SDG7, 2022). Logo, mulheres e crianças, frequentemente responsáveis pelas tarefas domésticas, como cozinhar e recolher lenha, suportam o maior ônus de saúde devido à utilização de combustíveis poluentes em suas residências.

É importante destacar as notáveis disparidades de acesso a combustíveis e tecnologias de culinária limpa entre áreas urbanas e rurais em todo o mundo. Em 2020, enquanto 86% da população urbana desfrutava desse acesso, apenas 48% da população rural tinha a mesma oportunidade (Tracking SDG7, 2022). Isso ressalta a necessidade urgente de expandir o uso de alternativas energéticas limpas não apenas para combater a crise ambiental e pobreza energética, mas para fomentar um ambiente mais saudável e equilibrado para todas as comunidades. Nesse contexto, a transição energética emerge como uma prioridade crucial.

No Brasil, devido à sua rica diversidade cultural e climática, o uso de combustíveis energéticos como a lenha é amplamente difundido e ocorre em diversos contextos. Nas regiões do sul do país, é comum o emprego desse combustível sólido para aquecimento durante os meses de inverno. Enquanto isso, nas áreas rurais, a lenha é utilizada ao longo de todo o ano, seja para cocção ou para a iluminação das residências, sendo frequentemente substituída pelo querosene nesse último caso.

A lenha mantém sua relevância como o principal combustível nas áreas rurais de todo país, servindo como fonte de energia primária no preparo dos alimentos, especialmente em domicílios habitados por famílias de baixo poder aquisitivo. Além da cocção de alimentos, a lenha também é empregada para aquecer água destinada ao banho e à lavagem de roupas. Em regiões mais frias, é comum seu uso em lareiras para o aquecimento interno das residências (Schaeffer *et al.*, 2003).



Esse hábito, de modo geral, está associado à pobreza energética, um conceito abrangente que trata da situação em que uma família ou indivíduo não possui condições mínimas de adequação energética e enfrenta algum grau de privação nessa dimensão. Sob a ótica da abordagem tecnológica, uma das mais difundidas sobre o tema, a definição de pobreza neste contexto abrange famílias que não têm acesso adequado a serviços energéticos, como combustíveis limpos para cocção e eletricidade. Essa abordagem diferencia famílias pobres das não pobres com base no uso de combustíveis (Foguel; Ulyssea, 2007).

Portanto, o acesso a serviços energéticos modernos, economicamente viáveis, é um elemento essencial para impulsionar o desenvolvimento socioeconômico das comunidades sociais em todo o mundo. Quando nos referimos a serviços energéticos modernos, estamos falando sobre a aplicação prática da energia para satisfazer diversas necessidades dos consumidores, desde transporte até iluminação e aquecimento do ambiente. Desse modo, vale destacar que os recursos energéticos contemporâneos se baseiam em fontes de energia avançadas e eficientes, em contraste com fontes tradicionais, como lenha ou estrume animal.

Essa distinção implica em levar em consideração não apenas na maior comodidade na obtenção desses serviços, mas também a sua contribuição para a preservação do meio ambiente, promoção da sustentabilidade e bem-estar social. Entretanto, apesar de serem considerados garantidos em muitos países industrializados, esses serviços energéticos modernos continuam inacessíveis para uma grande parcela da população mundial. Essa falta de acesso cria uma barreira significativa para o desenvolvimento humano, afetando diretamente diversas áreas da vida cotidiana, desde a saúde até o acesso à educação e oportunidades de trabalho (Nussbaumer *et al.*, 2013).

Além disso, afeta a própria urgência de se transitar para energias limpas, pois em países como o Brasil, em desenvolvimento, a transição energética tem ainda de enfrentar os problemas relacionados à pobreza e desigualdade social. Porém, talvez a própria transição energética seja capaz de atenuar a desigualdade por meio de novos investimentos e geração de empregos. Ou seja, diante do cenário desafiador, uma solução plausível para impulsionar o progresso socioeconômico seria o próprio processo de transição energética, o qual é um processo complexo que envolve mudanças tecnológicas, comportamentais, econômicas, éticas, políticas, institucionais, demográficas, ecológicas e socioculturais.

Essa transição é essencial para promover um uso mais sustentável e limpo da energia, especialmente nas residências, onde o consumo energético desempenha um papel indispensável no dia a dia das pessoas (Motz, 2021). Logo, trata-se de uma estratégia que não apenas promove a viabilidade ambiental, mas também abre novas oportunidades de desenvolvimento econômico e social. Em resumo, ao investir em infraestrutura sustentável e eficiente, podemos melhorar a qualidade de vida das comunidades socialmente vulneráveis, garantindo acesso confiável e acessível à energia, ao mesmo tempo em que reduzimos as disparidades socioeconômicas.

Por meio do Índice de Pobreza Energética Multidimensional (MEPI) como referência para entender e quantificar as várias facetas que delineiam a pobreza energética em uma região (Mazzone; Cruz; Bezerra, 2021), este artigo tem por objetivo abordar as interações entre a pobreza energética e a transição energética. E utilizamos a ferramenta mencionada (MEPI), com base em pesquisa bibliográfica, visando apreender questões de pobreza energética no país, com um foco particular nas áreas que englobam a Floresta Amazônica brasileira.

No Brasil, tem-se observado notáveis avanços na ampliação do acesso à energia elétrica, alcançando uma cobertura populacional de 99,8%, conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018, p. 6). Contudo, apesar desses avanços, persiste o desafio da pobreza energética, especialmente em áreas rurais e remotas das regiões Norte e Nordeste. Nestas localidades, por exemplo, ainda não se atingiu níveis de eletrificação universal devido à falta de interligação ao sistema nacional e ao isolamento geográfico de algumas áreas, com destaque para a região Amazônica.

Logo, é essencial destacar que, na região em questão, 96,4% dos domicílios dependem da rede principal de energia, enquanto 98,9% também utilizam fontes alternativas, como lenha, carvão e outras opções poluentes. Isso evidencia uma relação significativa entre o uso da rede principal e das fontes alternativas, indicando que a maioria dos que dependem da rede principal também recorre às alternativas (IBGE, 2018, p. 6). Desse modo, a pobreza energética vai além da simples presença de eletricidade nas residências, estando profundamente interligada ao desenvolvimento socioeconômico e a aspectos culturais. Por sua vez, a transição para fontes de energia mais limpas e renováveis não apenas poderá reduzir a dependência de recursos finitos e poluentes como estimulará a inovação tecnológica e a criação de empregos, movimento essencial para garantir um acesso sustentável à energia e promover um desenvolvimento socioeconômico equitativo e duradouro.

Embora a América do Sul seja frequentemente mencionada como uma possível líder na transição energética, devido à abundância de recursos naturais e ao progresso significativo na implementação de energias renováveis, é importante destacar um desequilíbrio avassalador na realidade cotidiana das populações vulneráveis que habitam regiões remotas e de difícil acesso. Portanto, políticas governamentais eficazes e parcerias entre o governo, a sociedade civil e o setor privado são essenciais para promover a equidade e a sustentabilidade energética dessas regiões. Somente por meio de um compromisso coletivo com o desenvolvimento sustentável, poderemos garantir que todas as comunidades, independentemente de sua situação econômica, tenham acesso à energia limpa e segura.

Dessa forma, o objetivo principal deste trabalho é discorrer sobre a condição da pobreza energética no Brasil, tendo em vista, principalmente, comunidades isoladas localizadas na Amazônia brasileira. O escopo deste artigo se estende além da simples análise da pobreza energética, abarcando também as interações complexas entre este fenômeno, a desigualdade socioeconômica e os avanços em direção à adoção de fontes de energia limpas. Além disso, busca-se indicar o impacto desses fatores na qualidade de vida das comunidades afetadas.



Metodologia

A metodologia adotada neste artigo foi embasada em uma abordagem de dados secundários, utilizando amplamente referências bibliográficas para fundamentar a análise da pobreza energética em comunidades isoladas, com destaque para a região amazônica brasileira.

Para assegurar a seleção dos registros e materiais destinados à revisão sistemática da literatura, foram implementados procedimentos específicos. A escolha das bases de dados foi direcionada para aquelas que fornecem metadados detalhados, contemplando informações essenciais como ano de publicação e título do periódico. Nesse contexto, optou-se principalmente pela *Web of Science* e *ScienceDirect*, dada sua vasta aceitação e uso difundido na comunidade acadêmica. Contudo, é importante ressaltar que outros mecanismos de busca, incluindo o Google Acadêmico, também foram considerados e utilizados durante a o levantamento de dados relevantes para a revisão bibliográfica.

Adicionalmente, integramos o Índice de Pobreza Energética Multidimensional (MEPI) como uma ferramenta analítica crucial para avaliar a extensão e as características dessa problemática em nível nacional. O MEPI calculado para o período de 2002 a 2018 por pesquisadores que destacaram, com base nos dados obtidos, a significativa carência de serviços energéticos nas áreas isoladas da região Norte do Brasil (Mazzone *et al.*, 2022). A utilização desse índice proporcionou uma compreensão mais abrangente e detalhada da situação da pobreza energética nas comunidades das áreas rurais dos Estados do Piauí, Amazonas, Maranhão e Pará, revelando de forma mais evidente a presença de lares carentes em todas as dimensões, permitindo identificar áreas prioritárias de intervenção e desenvolvimento de políticas.

Foi realizado inicialmente uma revisão bibliográfica, explorando artigos científicos, relatórios de organizações internacionais, análises de estudos de caso e dados governamentais relacionados à pobreza energética, com foco especial nas comunidades isoladas do Norte do Brasil. Essa revisão permitiu uma compreensão aprofundada das origens, impactos e dinâmicas desse fenômeno, enriquecendo teoricamente a análise. A coleta de dados foi conduzida no sentido da obtenção de informações estatísticas disponíveis em órgãos governamentais e instituições de pesquisa, proporcionando uma compreensão abrangente da realidade da pobreza energética em comunidades isoladas/vulneráveis.

Por fim, os resultados foram interpretados à luz da literatura revisada e das teorias existentes sobre pobreza energética e transição energética. A partir dessa análise, foram delineadas conclusões e formuladas recomendações voltadas para o desenvolvimento de políticas públicas e iniciativas sociais direcionadas à mitigação da pobreza energética e à promoção do acesso universal a serviços energéticos limpos e sustentáveis na região amazônica brasileira.

PANORAMA DA POBREZA ENERGÉTICA

A pobreza energética muitas vezes é vinculada ao uso de lenha em comunidades isoladas, uma percepção que não é infundada, mas que também requer uma análise sociocultural mais aprofundada. Enquanto reconhecemos os graves riscos à saúde e ao meio ambiente associados ao uso da lenha, evidenciados pela Organização Mundial da Saúde (OMS, 2023), é intrigante observar um aumento significativo no número de domicílios que ainda dependem desse método no Brasil. Em 2019, mais de 14 milhões de famílias brasileiras utilizavam lenha para cozinhar, muitas combinando seu uso com o gás de cozinha (IBGE, 2020), isso sugere que os riscos para a saúde podem não ter sido totalmente compreendidos ou que as campanhas educativas e governamentais podem não ter sido suficientemente eficazes, ou simplesmente que os indivíduos não têm alternativa.

No entanto, apesar de haver inúmeras definições para pobreza energética, a maioria concorda que ela se refere à incapacidade de um agregado familiar alcançar determinados níveis de serviços energéticos, também conhecida como privação energética (Bouzarovski; Petrova, 2015). A carência de energia em países em desenvolvimento é frequentemente marcada pela falta de acesso à eletricidade e pela dependência significativa do uso de biomassa para cozinhar. Isso significa que muitas pessoas em regiões isoladas e marcadas pela vulnerabilidade socioeconômica não têm acesso confiável à rede elétrica e precisam recorrer a fontes de energia tradicionais, como lenha ou carvão vegetal, para preparar alimentos (González-Eguino, 2015).

Esse cenário se encaixa perfeitamente com as comunidades rurais isoladas dentro da maior floresta tropical do planeta, onde muitas situações complexas dificultam o bem-estar social em um contexto mais amplo, especialmente quando se trata do acesso a necessidades básicas como iluminação, transporte e tecnologias para o preparo de alimentos. Essa perspectiva revela a interconexão entre fatores socioeconômicos, culturais e ambientais na compreensão da privação energética. Logo, é crucial adotar uma abordagem multidimensional ao desenvolver políticas de mudança no setor de energia, levando em consideração não apenas os aspectos econômicos, mas também os contextos culturais e sociais específicos de cada comunidade.

Portanto, em meio à transição energética em curso, é essencial analisar a amplitude do Índice Multidimensional da Pobreza Energética (MEPI) no país, esta análise é pertinente para garantir que as políticas de transformação no setor energético sejam implementadas com precisão, considerando todas as dimensões da pobreza energética. Compreender essa questão em sua totalidade requer uma abordagem mais holística (Pachauri; Spreng, 2011), nesse contexto, o MEPI surge como uma alternativa produtiva. De acordo com a abordagem de Nussbaumer; Bazilian; e Modi (2012), o MEPI desempenha a função de identificação dos diversos aspectos nos quais uma família pode enfrentar escassez de energia em diferentes contextos.

Essa ferramenta contribui para uma adaptação mais eficaz das políticas energéticas residenciais, conforme destacado por Kowsari e Zerriffi (2011). Diante de um contexto desafiador, essa métrica foi adaptada à realidade brasileira, com o intuito de mensurar tanto a abrangência quanto a severidade da privação energética (Bezerra *et al.*, 2022). Os resultados obtidos revelaram uma realidade complexa: embora o país apresente uma média de 11,4% da população vivendo em situação de pobreza energética, as disparidades regionais são significativas, variando de 9,7% no Centro-Oeste a 18,5% no Norte, e atingindo alarmantes 33,8% nas áreas rurais do Norte (Bezerra *et al.*, 2022).



Vale ressaltar que devido à turbulência econômica antes e durante a pandemia de Covid-19, juntamente com o aumento dos preços do Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), muitas pessoas recorreram novamente a combustíveis energéticos mais acessíveis, porém mais poluentes, como lenha, carvão vegetal e outros materiais de cozinha prejudiciais ao meio ambiente e à saúde pública (IBGE-SIDRA, 2020). Ademais, com a pandemia houve um agravamento ainda mais expressivo sobre esta situação ao evidenciar que os problemas persistentes da pobreza energética ultrapassam o acesso físico. Já que ela também está vinculada a restrições no pagamento de serviços energéticos, denominada como insegurança de combustível (Bouzarovski; Petrova, 2015), e não imprescindivelmente devido às limitações de infraestrutura (Guzowski; Martin; Zabaloy, 2021).

Além disso, a constatação de que muitas famílias brasileiras enfrentam atrasos no pagamento das contas de serviços básicos, como água e luz, especialmente na região Norte (Bezerra *et al.*, 2022), destaca a grave dificuldade financeira enfrentada por muitos lares para custear esses serviços essenciais. Assim sendo, a probabilidade de as famílias não conseguirem pagar por esses serviços deve ser levada em consideração, destacando a necessidade de políticas e medidas para enfrentar a pobreza energética e garantir o acesso justo e adequado à energia para todos os cidadãos brasileiros. A disparidade no acesso aos serviços energéticos, como evidenciado neste contexto, está intimamente relacionada às múltiplas dificuldades enfrentadas por aqueles que lidam com a escassez de energia.

Como enfatizado no artigo "A Multidimensionalidade da Pobreza Energética no Brasil: Uma Análise Histórica", famílias em regiões carentes, que também enfrentam carência de serviços básicos como água potável, estão mais propensas à pobreza energética (Bezerra *et al.*, 2022). Deste modo, investimento em infraestrutura e programas de acesso à energia desempenham um papel importante na redução estrutural da pobreza energética, especialmente em áreas desfavorecidas, como as regiões rurais do Norte e Nordeste. Isso ocorre porque as pessoas que residem nessas localidades têm uma maior tendência a viver em condições de pobreza energética do que aquelas nas áreas urbanas do Sul ou Sudeste (Bezerra *et al.*, 2022).

Em resumo, ao analisarmos as condições econômicas precárias da região Norte, percebemos que o acesso físico à energia não é suficiente para mitigar a privação de serviços energéticos essenciais. Isso se deve, em parte, às barreiras econômicas enfrentadas pelas famílias de baixa renda nessa região. As despesas relacionadas à energia ainda representam uma parcela expressiva do orçamento dessas famílias, o que pode ser atribuído à falta de recursos financeiros para arcar com esses custos. Além disso, a impossibilidade de pagar pelas contas de energia ou adquirir eletrodomésticos modernos e eficientes agrava ainda mais a situação. Como resultado, muitas famílias são obrigadas a recorrer à energia tradicional para cozinhar, o que não só afeta negativamente a qualidade de vida e o meio ambiente, mas também contribui para a perpetuação do ciclo de pobreza energética na região.

DESAFIOS E OPORTUNIDADES: RUMO À TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NA AMÉRICA LATINA COM O BIOGÁS COMO PROTAGONISTA:

No cenário dos desafios contemporâneos relacionados à transição energética, reside a urgente necessidade de abordar as crescentes preocupações ambientais e socioeconômicas decorrentes do uso generalizado de combustíveis poluentes. Como mencionado por Stoner (Stoner *et al.*, 2021), uma parcela significativa da população global continua a depender desses recursos para as suas necessidades de cocção, uma realidade que se projeta a persistir até 2030. No entanto, à medida que nos aproximamos deste momento, torna-se cada vez mais imperativo direcionar esforços substanciais para incentivar a adoção de fontes de energias renováveis, não só como um meio de mitigar as emissões domésticas, mas também como parte integrante dos esforços globais para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Nesse contexto, a transição das famílias para fontes de energia renovável surge como uma estratégia de grande relevância. Essa mudança não apenas se destina a preservar a saúde, o clima e o meio ambiente como também está em consonância com a necessidade de promover uma melhor qualidade de vida para a vida em sociedade, ao mesmo tempo que visa alcançar o objetivo de emissões líquidas zero. É importante notar que a transição energética é um conceito multifacetado, como delineado por diversos acadêmicos. Enquanto alguns, como Hirish e Jones (2014), a concebem como uma alteração na fonte e tecnologia de energia, outros, como Sovacool (2016), ampliam essa definição, englobando mudanças em padrões de uso de energia e aspectos socioeconômicos.

Adicionalmente, uma descrição comum encontrada na literatura é a identificação da transição energética como uma troca de um tipo de combustível por outro (Elasu *et al.*, 2023). Observou-se que vários estudiosos exploraram essa transformação por diferentes óticas conceituais. No entanto, de maneira geral, essa transição é percebida como uma modificação na fonte de combustível e nas tecnologias associadas.

Neste contexto, a mudança energética na região Norte (também Nordeste) representa um marco decisivo não apenas na busca por fontes mais limpas e sustentáveis de energia, mas também na redefinição dos paradigmas socioeconômicos e ambientais que moldam o cenário energético dessa região, onde se encontra a floresta amazônica. Conforme destacado por Guimarães (2020), essa transição vai muito além da simples substituição de combustíveis fósseis por energias renováveis. Ela implica uma reestruturação profunda em diversas dimensões, que abrangem desde aspectos sociais, dimensões financeiras até culturais e ambientais.

Uma das principais vantagens dessa transição é a redução da dependência energética dos países latino-americanos, especialmente para aqueles que são importadores líquidos de petróleo e produtos petrolíferos, conforme apontado por (Henderson; Sen, 2021). Ao diversificar suas fontes de energia e adotar recursos renováveis, esses países podem aumentar sua segurança energética e reduzir sua vulnerabilidade a flutuações nos preços das commodities no mercado global.



Os impactos dessa iniciativa são vários, desde trazer benefícios significativos para a estabilidade macroeconômica até combater a pobreza energética e reduzir a desigualdade na região. Hampl (2022) destaca que essa mudança pode diminuir a vulnerabilidade dos países latino-americanos aos choques externos, como oscilações nos preços das matérias-primas, ao mesmo tempo em que fortalece a resiliência do sistema energético por meio da diversificação do mix de fontes de energia.

Além das vantagens socioeconômicas, a mudança em direção às energias renováveis na América Latina abre portas para a captação de investimentos estratégicos, no sentido do fomento do crescimento econômico sustentável. Como salientado por Hafner e Luciani (2022), o vasto potencial de energia renovável nessa área pode atrair a atenção de empresas multinacionais e investidores privados, estimulando a inovação, a geração de empregos e a ampliação das oportunidades econômicas.

No entanto, apesar das possibilidades, diversos desafios precisam ser enfrentados para garantir uma transição energética eficaz e viável. A dependência contínua das receitas do petróleo, a restrição fiscal devido ao peso da dívida pública e subsídios aos combustíveis fósseis representam obstáculos significativos que podem retardar o progresso em direção a uma matriz energética mais limpa e diversificada (Fattouh *et al.*, 2019; CEPAL, 2022). Superar esses desafios exigirá políticas públicas eficazes, investimentos em infraestrutura e tecnologias inovadoras, além do engajamento de todos os setores da sociedade civil.

O cenário atual destaca a grande importância dos combustíveis fósseis para a economia latino-americana. Em 2022, a região arrecadou uma receita expressiva, na ordem de US\$ 300 bilhões de dólares, proveniente da exploração e fornecimento desses recursos (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023). O petróleo e o gás natural dominam essa paisagem energética, respondendo por quase a totalidade desses ganhos financeiros. Além disso, a América Latina exporta uma parte substancial dessa produção para os principais mercados globais, estabelecendo vínculos comerciais significativos com países como os Estados Unidos, China, União Europeia e Índia (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023).

Até 2030, a transição energética na América Latina vislumbra mudanças marcantes no horizonte da produção de combustíveis fósseis (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023). Apesar da continuidade do papel do petróleo e do gás natural, antevê-se uma redução em sua relevância, impulsionada por fatores como a diminuição dos preços e a demanda global em declínio. Um movimento amplo, alinhado à tendência mundial, visando gradativamente abandonar os combustíveis fósseis, ganha forma na região, embora apresente nuances distintas.

Enquanto Brasil e Guiana testemunham um crescimento na produção de petróleo, Venezuela e México encaram declínios. Paralelamente, observa-se um esforço em ampliar a capacidade de refino e investir na indústria do gás natural, com ênfase na atração de investimentos privados e no aumento da capacidade de processamento e liquefação. No entanto, esses empreendimentos enfrentam desafios relacionados à competitividade de custos e aos riscos de ativos não rentáveis.

Nesse contexto, o “gás de digestão”, amplamente chamado como biogás, emerge como uma alternativa promissora entre as fontes de energia limpa. Com as crescentes preocupações ambientais e a busca por soluções sustentáveis, essa forma de energia renovável se destaca como um protagonista cada vez mais relevante, especialmente no Brasil, país reconhecido como líder na produção e consumo de biocombustíveis, desempenhando um papel crucial nesse cenário em evolução (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023). Com políticas proativas e iniciativas como o Programa RenovaBio, o país está na vanguarda do desenvolvimento e utilização de biocombustíveis, incluindo o biogás.

No horizonte futuro, prevê-se um crescimento contínuo na demanda por biocombustíveis na América Latina, com destaque para o biodiesel. Apesar das flutuações nos custos de produção, o bioetanol está se tornando cada vez mais competitivo em termos de custo, superando até mesmo a gasolina em alguns países da região. Entretanto, o potencial do biogás e do biometano na América do Sul permanece subexplorado, mas promissor.

Uma análise geoespacial revela vastas quantidades de resíduos agrícolas na América Latina, Brasil em especial, indicando a viabilidade de produção em larga escala. A exploração desse potencial pode aumentar significativamente a produção de biogás, contribuindo para a diversificação da matriz energética e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis. Para alcançar esse aumento na produção do “gás de digestão”, é essencial investir em infraestrutura e políticas de apoio. Países como Brasil e Argentina já estão avançando nesse sentido, implementando estratégias nacionais para aumentar a disponibilidade de matéria-prima e promover a produção de biogás. (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023).

Em suma, o “gás de digestão” emerge como uma peça fundamental no quebra-cabeça da transição energética na região, oferecendo uma alternativa ecológica e promissora para impulsionar o desenvolvimento econômico e mitigar os impactos ambientais, além de contribuir na redução das emissões de gases de efeito estufa e na mitigação das mudanças climáticas. Com investimentos adequados e políticas eficazes, essa fonte de energia renovável tem o potencial de transformar o panorama energético da região e impulsionar um futuro mais limpo e sustentável. Ao utilizar resíduos orgânicos para a produção de energia, o biogás contribui para a redução da dependência de combustíveis fósseis e para a promoção de uma economia circular e de baixo carbono. Em resumo, o biogás representa uma oportunidade única para a América Latina diversificar sua matriz energética, reduzir sua pegada de carbono e promover o desenvolvimento sustentável.

INVESTIGAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS TECNOLÓGICAS PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA EM COMUNIDADES ISOLADAS:

No Brasil, a energia é majoritariamente proveniente de fontes renováveis, representando 84% da matriz energética nacional, conforme relatório da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) de 2021. Apesar disso, mesmo com um sistema elétrico interligado abrangente, conhecido como Sistema Interligado Nacional (SIN), algumas regiões remotas, como partes da Amazônia, ainda enfrentam desafios de acesso à energia. Nestas áreas, os chamados Sistemas Isolados (SISOL) entram em operação, nos quais a energia é gerada localmente para abastecer comunidades próximas. Dado que as atividades econômicas na



região amazônica estão intimamente ligadas ao agronegócio, o aproveitamento de resíduos orgânicos, como esterco animal, para a produção de biogás surge como uma alternativa promissora ao diesel.

O biogás, resultante da digestão anaeróbia de matéria orgânica, é uma fonte de energia renovável e sustentável, com potencial para atender às necessidades energéticas das comunidades rurais (GOULD, 2020). Essa transição para o biogás não só reduziria a dependência de fontes convencionais prejudiciais ao meio ambiente e à saúde, mas também está alinhada com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas, em particular os objetivos 1 e 7, que visam reduzir a pobreza e promover o acesso à energia limpa e eletricidade (DMEO, 2002). A tecnologia de produção de biogás é acessível e eficiente, especialmente em comunidades rurais e afastadas (Chau, 1998). Os biodigestores de pequena escala são simples de instalar e operar, podendo ser facilmente adaptados às condições locais. Além disso, o acesso a resíduos orgânicos, como esterco, facilita a adoção do biogás nessas áreas.

O biogás, composto principalmente por metano, é uma fonte versátil de energia, adequada para diversas aplicações, desde cozinhar até gerar eletricidade (DMEO, 2002). Além disso, o calor produzido pelo biodigestor pode ser utilizado para aquecer água, atendendo às necessidades diárias das famílias locais. Isso não apenas economiza tempo e recursos, mas também reduz a dependência de combustíveis fósseis e lenha, muitas vezes escassos nessas regiões. No entanto, é importante considerar que, em algumas regiões, condições climáticas adversas, como temperaturas extremamente baixas, podem afetar o desempenho do biodigestor durante o inverno. Embora este não seja um problema relevante na região amazônica, onde as temperaturas permanecem relativamente altas ao longo do ano, é necessário fornecer educação e recursos adequados para aumentar a adoção do biogás nas comunidades rurais em geral (DMEO, 2002).

Inspirados pelo estudo econômico e financeiro realizado em Santo Antônio de Jesus, na Bahia, que analisou a viabilidade da implementação de um projeto de recuperação de biogás no aterro sanitário, fica evidente que o biogás pode ser uma fonte de energia promissora. A partir das projeções de recuperação do biogás, foram delineadas as taxas de recuperação, permitindo estimar a quantidade de energia elétrica gerada pelo metano em diferentes cenários. A análise contemplou diversos cenários de recuperação do biogás, ressaltando a viabilidade econômica especialmente quando houve uma recuperação de 90% e 75% do projeto financiado. Com capacidade para abastecer anualmente cerca de 1,5 mil famílias, essa iniciativa não apenas contribui para o desenvolvimento, local e regional, como fomenta práticas sustentáveis e reduz as emissões de CO₂ (Martins; Carneiro; Silva, 2017).

Portanto, parece-nos plenamente viável adaptar essa estratégia para outras regiões rurais do Brasil, abrangendo especialmente as comunidades remotas da Amazônia. Com o devido aporte de investimentos e uma execução metódica, podemos desvendar todo o potencial do biogás como uma fonte de energia limpa e renovável, alavancando o acesso à energia nessas localidades. Ao implementar essa solução, não apenas conseguimos atender às demandas energéticas dessas comunidades de forma mais acessível, mas também conseguimos mitigar significativamente a pobreza energética. Isso ocorre ao oferecer uma alternativa mais econômica e sustentável em comparação aos combustíveis fósseis convencionais, os quais são tanto dispendiosos quanto prejudiciais ao meio ambiente.

Considerações Finais:

À medida que buscamos mitigar os impactos das mudanças climáticas e promover o desenvolvimento socioeconômico, a necessidade de adotar fontes de energia mais limpas e sustentáveis torna-se cada vez mais premente. Nesse contexto, o biogás emerge como uma alternativa promissora e protagonista nessa jornada rumo a um futuro energético mais verde.

Os desafios que enfrentamos são diversos, desde a dependência contínua de combustíveis fósseis até a pobreza energética em comunidades remotas, logo, há obstáculos significativos para superar. No entanto, esses desafios também representam oportunidades para inovação e mudança positiva, o biogás, por exemplo, surge como uma fonte de energia renovável e sustentável, oferecendo uma solução viável para muitos desses desafios. O potencial dessa alternativa na América Latina é vasto e multifacetado, com resíduos agrícolas abundantes na região, há uma oportunidade única de produzir biogás em larga escala, contribuindo para a diversificação da matriz energética e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis.

Estudos de viabilidade e projetos piloto demonstraram a viabilidade econômica e ambiental do biogás, como exemplo, o artigo citou o projeto realizado em Santo Antônio de Jesus, Bahia, o qual destacou o potencial do biogás para atender às necessidades energéticas locais e promover o desenvolvimento sustentável. Esse exemplo ampliou a percepção sobre como podemos impulsionar a adoção generalizada do biogás em comunidades isoladas em outras regiões do Brasil.

Olhando para o futuro, é crucial aumentar os investimentos e o comprometimento com a transição energética na região. Isso inclui não apenas a expansão da produção de biogás, mas também o desenvolvimento de políticas de incentivo, educação e conscientização pública. Com o apoio adequado, o biogás pode desempenhar um papel fundamental na transformação do panorama energético da América Latina.

Referências:

Bezerra, P., Cruz, T., Mazzone, A., Lucena, A. F., De Cian, E., & Schaeffer, R. (2022). The multidimensionality of energy poverty in Brazil: A historical analysis. *Energy Policy*, 171, 113268.

Bouzarovski, S., & Petrova, S. (2015). A global perspective on domestic energy deprivation: Overcoming the energy poverty–fuel poverty binary. *Energy Research & Social Science*, 10, 31-40.



- CEPAL, N. (2022). *Latin American Economic Outlook 2022: Towards a Green and Just Transition*. CLAC.
- Chau, L. H. (1998). Biodigester effluent versus manure from pigs or cattle as fertilizer for production of cassava foliage (*Manihot esculenta*). *Livestock Research for Rural Development*, 10(3).
- DMEO - Evaluation study on National Project on Biogas Development (NPBD), renewable energy, domestic biogas. Monitoring & evaluation, New Delhi, India, pp 1–105
- Elasu, J., Ntayi, J. M., Adaramola, M. S., & Buyinza, F. (2023). Drivers of household transition to clean energy fuels: A systematic review of evidence. *Renewable and Sustainable Energy Transition*, 3, 100047.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados – Ciclo 2020. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-614/EPE-NT-Planejamento%20SI-ciclo_2020.pdf. Acesso em: 17 fev.2024.
- Fattouh, B., Poudineh, R., & West, R. (2019). The rise of renewables and energy transition: what adaptation strategy exists for oil companies and oil-exporting countries?. *Energy transitions*, 3(1-2), 45-58.
- Foguel, M. N., & Ulyssea, G. (2007). Desigualdade de renda no Brasil: uma análise da queda recente. *Brasília: Ipea*, 2.
- González-Eguino, M. (2015). Energy poverty: An overview. *Renewable and sustainable energy reviews*, 47, 377-385.
- Gould, M. C. (2015, January). Bioenergy and anaerobic digestion. In *Bioenergy* (pp. 297-317). Academic Press.
- Guimarães, L. N. (Ed.). (2020). *The regulation and policy of Latin American energy transitions*. Elsevier.
- Hafner, M., & Luciani, G. (2022). *The Palgrave handbook of international energy economics* (p. 770). Springer Nature.
- HAMPL, N. (2022). Equitable energy transition in Latin America and the Caribbean: Reducing inequity by building capacity. *Renewable and Sustainable Energy Transition*, 2, 100035.
- Henderson, J., & Sen, A. (2021). *The Energy Transition: Key challenges for incumbent and new players in the global energy system* (No. 01). OIES Paper: ET.
- Hirsh, R. F., & Jones, C. F. (2014). History's contributions to energy research and policy. *Energy Research & Social Science*, 1, 106-111.
- IBGE, 2018. Características gerais dos domicílios e dos moradores 2017. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua**. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com_mediaibge/arquivos/86c0dd01f1cf800ec59fff4e059cdbc.pdf. Acesso em: 23 fev. 2024.
- IBGE, 2020. “SIDRA: Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua - PNAD Contínua Tabela - Domicílios e Moradores, por tipo de combustível utilizado na preparação de alimentos”.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Latin America Energy Outlook 2023**, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/latin-america-energy-outlook-2023>. Acesso em: 14 fev. 2024.
- Kowsari, R., & Zerriffi, H. (2011). Three dimensional energy profile: A conceptual framework for assessing household energy use. *Energy Policy*, 39(12), 7505-7517.
- Martins, L. O. S., Silva, L. T., & Carneiro, R. A. F. (2017). Análise da viabilidade econômica e financeira da implantação de usina de geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos no município de Santo Antônio de Jesus–BA. *Revista Livre de Sustentabilidade e Empreendedorismo*, 2(2), 142-166.
- Mazzone, A., Cruz, T., & Bezerra, P. (2021). Firewood in the forest: Social practices, culture, and energy transitions in a remote village of the Brazilian Amazon. *Energy Research & Social Science*, 74, 101980.



- Mazzone, A., Cruz, T., Bezerra, P., Rathmann, R., Lucena, A. F., Schaeffer, R., & Szklo, A. (2021). A multidimensionalidade da pobreza no Brasil: um olhar sobre as políticas públicas e desafios da pobreza energética. *Revista Brasileira de Energia*.
- Motz, A. (2021). Consumer acceptance of the energy transition in Switzerland: The role of attitudes explained through a hybrid discrete choice model. *Energy Policy*, 151, 112152.
- Nussbaumer, P., Bazilian, M., & Modi, V. (2012). Measuring energy poverty: Focusing on what matters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 231-243.
- Nussbaumer, P., Fuso Nerini, F., Onyeji, I., & Howells, M. (2013). Global insights based on the multidimensional energy poverty index (MEPI). *Sustainability*, 5(5), 2060-2076.
- OMS, 2023. Household air pollution: key facts. In: OMS. **Household air pollution: Key facts**. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health?> Acesso em: 2 fev. 2024.
- Pachauri, S., & Spreng, D. (2011). Measuring and monitoring energy poverty. *Energy policy*, 39(12), 7497-7504.
- Schaeffer, R., Cohen, C., Almeida, M. A., Achão, C. C., & Cima, F. M. (2003). Energia e pobreza: problemas de desenvolvimento energético e grupos sociais marginais em áreas rurais e urbanas do Brasil.
- Sovacool, B. K. (2016). How long will it take? Conceptualizing the temporal dynamics of energy transitions. *Energy research & social science*, 13, 202-215.
- Stoner, O., Lewis, J., Martínez, I. L., Gumy, S., Economou, T., & Adair-Rohani, H. (2021). Household cooking fuel estimates at global and country level for 1990 to 2030. *Nature communications*, 12(1), 5793.
- Tracking SDG7. The Energy Progress Report 2022. Disponível em: <https://trackingsdg7.esmap.org/downloads>. Acesso em 03/03/2024. Acesso em: 02 fev. 2024. o X ENES, pp.10-16.



ANÁLISE DE VAZÃO MÍNIMA DIÁRIA E MENSAL EM LOCAIS COM APROVEITAMENTO HIDRELÉTRICO

1Cláudia Weber Corseuil, 2Álvaro José Back, 3Bruno Gabriel Ronchi, 4Amarfelina Fernandes de Oliveira de Aguiar, 5Marcos Ricardo Giehl

1 Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) (Epagri), e-mail: claudia.weber@ufsc.br; 2 Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri), e-mail: ajb@epagri.sc.gov.br; 3 Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e-mail: brunogabrielronchi@gmail.com; 4 Engenheira Ambiental, e-mail: marfaaguiar@gmail.com; 5 Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e-mail: mrgiehl@gmail.com

Palavras-chave: curva de permanência; disponibilidade hídrica; regionalização de vazão

Resumo

O crescimento populacional, a industrialização e as alterações climáticas têm contribuído para o aumento no consumo de água doce na última década. O aumento da população demandará mais alimentos e energia, pressionando os recursos hídricos na bacia hidrográfica, seja ela urbana ou rural. A demanda por mais água impactará diretamente a quantidade e a qualidade da água dos rios e, consequentemente, a manutenção e a conservação dos ecossistemas. Neste aspecto, conhecer a disponibilidade de água da bacia hidrográfica é fundamental para a gestão e o gerenciamento dos diversos usos dos recursos hídricos. Essa disponibilidade pode ser avaliada com base nas frequências das vazões médias e mínimas, por meio do método de curva de permanência. No Brasil, o modelo de gestão dos recursos hídricos é baseado na Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei Federal 9.433/1997). Para a execução dessa política, um dos instrumentos mais importantes é a outorga de uso da água, que tem como objetivo assegurar o controle qualitativo e quantitativo dos usos dos recursos hídricos, bem como os direitos de acesso à água para todos. No processo de outorga toma-se como referência as vazões mínimas, ou vazões com alta probabilidade de superação. Esses valores podem ser obtidos pela curva de permanência. Assim, o presente trabalho teve por objetivo avaliar as vazões mínimas de referência Q_{90} , Q_{95} e Q_{98} , diárias e mensais, bem como nos locais onde existem pequenos aproveitamentos hidrelétricos em operação. A área de estudo é a bacia hidrográfica do rio Tubarão, sul de Santa Catarina. Foram utilizados os dados diários de vazão de 16 estações fluviométricas de responsabilidade da Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA), distribuídas ao longo dos rios da bacia, com registros superiores a 10 anos de dados. Desta forma, pode-se estabelecer as curvas de permanência para vazões mensais e diárias. Adicionalmente, essas vazões foram regionalizadas utilizando 6 equações de regressão e a área de drenagem das estações fluviométricas da ANA, e também as áreas correspondentes às 27 Centrais Geradoras Hidrelétricas e às 4 Pequenas Centrais Hidrelétricas, determinadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Foi verificado o erro relativo entre as vazões Q_{90} , Q_{95} e Q_{98} estimadas e observadas (diárias e mensais). Os resultados mostram que, a utilização da curva de permanência diária superestima em 44% a vazão Q_{90} e 50% as vazões Q_{95} e Q_{98} . Enquanto que, a curva de permanência mensal a superestimativa foi maior, ou seja, de 62,5% para as vazões Q_{90} e Q_{95} e 56% para Q_{98} . Ainda verificou-se que, nas vazões de referência mais restritivas os erros são maiores, tanto para dados diários, quanto para mensais. Com dados diários o ER% para a vazão Q_{98} foi maior do que a Q_{95} (diferença de 69,07%), evidenciando a importância de adotar valores diários nos processos de outorga de uso da água, principalmente em locais onde há muita demanda de água para várias atividades na bacia. Nos locais onde estão instalados os empreendimentos hidrelétricos os resultados mostraram que as vazões de permanência Q_{90} , Q_{95} e Q_{98} mensais foram superestimadas em relação às diárias, apresentando um ER% < - 40%. Desta forma, o presente estudo mostrou a importância da regionalização para a extrapolação das vazões Q_{90} , Q_{95} e Q_{98} , para locais com escassez de dados, e pode contribuir para estudos hidrológicos que necessitam dessas informações, bem como para a gestão dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Tubarão. Por meio da comparação dos valores obtidos e suas limitações é possível encontrar uma metodologia mais adequada para determinar as vazões mínimas de referência Q_{90} , Q_{95} e Q_{98} , em rios na região de estudo. Esses resultados podem ser úteis para a gestão integrada de bacias, avaliação dos recursos hídricos, estudos de aproveitamento hidrelétrico a fio d'água ou nos casos de captação d'água sem reservatórios. Então, a escolha de metodologias para a determinação das vazões mínimas de referência, com base no presente trabalho, certamente facilitará futuros trabalhos que necessitam dessas informações na região.

Introdução

O crescimento populacional, a industrialização e as alterações climáticas têm contribuído para o aumento no consumo de água doce na última década (He et al., 2021). De acordo com a Organização da Nações Unidas (ONU), a população mundial passou de 2,5 bilhões para 7,8 bilhões desde 1950 a 2022. As últimas projeções sugerem que poderá crescer até 8,5 bilhões em 2030 e 9,7 bilhões em 2050 (UN, 2022). Além desse fato, há uma forte tendência de urbanização das cidades em todo mundo. A previsão é que até 2030 a população urbana corresponda a 60% e, que uma em cada três pessoas viva em cidades com pelo menos meio milhão de habitantes (UN, 2018). O Brasil segue a mesma tendência mundial, no último censo demográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) as concentrações urbanas atingiram 61% da população do país (IBGE, 2022).

O aumento da população demandará mais alimentos e energia, impactando diretamente o consumo de água. Assim, a pressão nos recursos hídricos, para atender a demanda populacional será maior, impactando a quantidade e a qualidade da água dos rios e, consequentemente, a manutenção e a conservação dos ecossistemas.



Kobiyama et al. (2008) comentam que, o planejamento e o gerenciamento dos usos dos recursos hídricos são fundamentais, sendo necessário para isso realizar a quantificação da disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica.

Visando proporcionar meios para que a água seja utilizada de forma racional e justa, no Brasil o modelo de gestão é baseado na Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei Federal 9.433/1997), a qual está fundamentada em princípios que consideram a água como um bem de domínio público, limitado, com valor econômico e, em situações de escassez, o consumo humano, a dessedentação animal e agricultura são prioridades (Brasil, 1997). Na execução dessa lei um dos instrumentos mais importantes é a outorga de uso da água, que tem como objetivo assegurar o controle qualitativo e quantitativo dos usos dos recursos hídricos, bem como os direitos de acesso à água para todos (ANA, 2024). A outorga depende de uma série de análises técnicas realizadas pelos órgãos gestores de recursos hídricos. No modelo de gestão brasileiro, cabe ao poder público administrar alocação da água na bacia (ANA, 2024).

A análise da outorga é realizada com base no uso racional da água e na disponibilidade hídrica da bacia (ANA, 2024). Essa disponibilidade pode ser determinada com base nas frequências das vazões medidas, usando funções de probabilidade de ocorrência das vazões médias e mínimas ou por meio da curva de permanência (Back et al., 2019). As vazões médias envolvem os processos associados ao escoamento superficial direto e subterrâneo, e permitem caracterizar a disponibilidade hídrica potencial da bacia (Pruski et al., 2012). Já as vazões mínimas, representam a condição crítica da bacia, uma vez que ocorrem no período de estiagem, quando a oferta de água está comprometida (Schreffler, 1998). Essas vazões estão relacionadas diretamente ao escoamento subterrâneo e a capacidade de produção de água da bacia (Pruski et al., 2012).

Ainda, de acordo com Galatto e Back (2023), as vazões mínimas correspondem a um valor que representa um limite superior de utilização da água do rio que, normalmente é baseado em vazões de estiagens ou com alta probabilidade de superação. Entretanto, somente um percentual dessas vazões pode ser usado, sendo o restante destinado à manutenção do meio biótico. Essas vazões servem de garantia para a preservação dos recursos hídricos, tanto para a quantidade como a qualidade. Com relação à quantidade, permitem avaliar o risco de estiagem em projetos de navegação e de geração de energia elétrica, na outorga do uso da água para irrigação, abastecimento urbano e etc. (Oliveira, 2013; Gasques et al., 2018).

No Brasil, para fins de outorga de uso da água de acordo com ANA (2019), o critério mais utilizado é a vazão mínima de referência de cada bacia, as quais normalmente correspondem às vazões com permanência de 90% e 95% do tempo (Q_{90} e Q_{95}). No entanto, se os usos da água requerem mais garantias, utilizam-se vazões mais restritivas, como a Q_{95} e a $Q_{7,10}$ (vazão mínima de 7 dias e período de retorno de 10 anos). Para o Estado de Santa Catarina, onde está a bacia hidrográfica do rio Tubarão (objeto de estudo) a vazão mínima de referência adotada é a Q_{98} , sendo o limite máximo outorgável 50% desta (SDE, 2008a e 2008b).

As vazões mínimas de referência podem ser determinadas pelo método da curva de permanência (Back et al., 2019), que representa a relação entre a magnitude e a frequência das vazões diárias, semanais ou mensais, de uma determinada seção de controle do rio, indicando o percentual de tempo com que determinada vazão é igualada ou superada num período de tempo definido (Tucci, 2013). A curva de permanência pode ser vista como uma assinatura das vazões, uma vez que, caracteriza o regime hidrológico da bacia, sendo amplamente utilizada na avaliação de vazões altas, médias e baixas (Burgan et al 2022).

Diversas aplicações estão associadas aos valores extraídos da curva de permanência, dentre as quais destacam-se: avaliação de disponibilidade hídrica, cálculo do potencial hidrelétrico e operação de reservatórios, calibração de modelos chuva-vazão, (Pinheiro e Naghettini, 2010; Back et al., 2019). No entanto, as curvas obtidas com base em vazões diárias são mais realistas, pois há uma tendência de que os valores mensais e anuais sejam superestimados (Collischonn e Dornelles, 2023).

Na literatura, trabalhos têm avaliado a diferença na estimativa das vazões mínimas obtidas por meio da curva de permanência, usando dados diários e mensais. Por exemplo, Costa e Santos (2018) verificaram que, o cálculo da potência instalada em um aproveitamento hidrelétrico pode ser superestimado em 25%, quando se utiliza vazões médias mensais, em relação às diárias. Back et al. (2019), ao avaliarem curvas de permanência no rio Timbó (SC), observaram que, para frequências de permanência superiores a 20%, os dados mensais superestimam a vazão em relação aos diários.

Cabe ressaltar que, a quantificação das vazões de referência é possível por meio de séries históricas medidas em estações fluviométricas. No entanto, a falta de estações em muitos locais de interesse e a disponibilidade de séries históricas longas de vazões e confiáveis é um dos principais problemas em projetos e estudos hidrológicos (Melati, 2016; ANA, 2019).

Assim, com a finalidade de suprir essa deficiência de dados foram desenvolvidos vários métodos de regionalização de vazões (Tucci, 2002; ANA, 2019; Collischonn et al., 2023), entre os quais destacam-se modelos de regressão, vazão específica, interpolação geoestatística, modelagem hidrológica, etc. (Collischonn et al., 2023). Entre esses métodos, um dos amplamente utilizados é o Método Tradicional. Esse método consiste no ajuste de equações de regressão entre a vazão e as características físicas e climáticas de bacias hidrologicamente homogêneas (ELETROBRAS, 1985; Tucci, 2002; Pruski et al., 2012). Na bacia do rio Taquari-Antas (RS), Bazzo et al. (2017) avaliaram a acurácia na estimativa da Q_{95} , calculada pelos métodos Tradicional e Conservação de Massa e, verificaram que ambos resultados foram satisfatórios. Matugama (2019) estimou a Q_{98} para a bacia do rio Braço do Norte (SC) usando 4 métodos de regionalização, obtendo melhores resultados com o método Tradicional, com erro relativo entre as vazões observadas e estimadas < a 9%. Cecílio et al. (2018) avaliaram 5 métodos de regionalização para estimar as vazões $Q_{7,10}$ e Q_{90} para a bacia do rio Itapemirim (ES) e, encontraram resultados mais satisfatórios com o método Tradicional.

No sul de Santa Catarina, onde está a bacia do rio Tubarão há poucos estudos que avaliam as vazões mínimas de referência diárias e mensais, para fins de aproveitamento hidrelétrico. Assim, o presente trabalho objetivou avaliar as vazões mínimas de referência Q_{90} , Q_{95} e Q_{98} , diárias e mensais, para sub-bacias da bacia rio Tubarão, bem como nos locais onde existem pequenos aproveitamentos hidrelétricos em operação.



Material e Métodos

A área de estudo é a bacia hidrográfica do rio Tubarão (47060 km²), localizada no sul de Santa Catarina, entre 27,736° S- 28,698° S e 48,629° W - 49,568° (Figura 1). O rio Tubarão nasce nas encostas da Serra Geral e percorre 120 km até a foz, onde está localizada a Lagoa de Santo Antônio, próximo ao litoral. Os principais rios formadores dessa bacia são os rios Braço do Norte e Capivari. Na bacia do rio Tubarão (BHRT), atualmente estão instaladas 27 Centrais Geradoras Hidrelétrica (CGH) e 4 Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), distribuídas ao longo dos rios, gerando cerca de 73490,00 kW (ANEEL, 2024). Esse aspecto mostra que a BHRT tem um alto potencial hidrelétrico, contribuindo significativamente para a economia da região sul de Santa Catarina.

Nas partes mais altas (1000 m) da BHRT predomina-se o tipo de clima temperado mesotérmico úmido, com temperatura média no mês mais frio < 18°C e com verões frescos, temperatura média no mês mais quente < 22°C (Cfb), e nas partes mais baixas (40 m) o subtropical mesotérmico úmido, com temperatura média no mês mais frio < 18°C e a média no mês mais quente > 22°C (Cfa) (Alvares et al., 2013; Pandolfo et al., 2002). A chuva média anual varia de 1100 a 1900 mm (Aguiar, 2020) e a umidade relativa do ar é de 81,5% (Pandolfo et al., 2002).

O relevo da BHRT caracteriza-se por ser 26,4% suave ondulado a plano, 67% ondulado a forte ondulado e 6,6% montanhoso (SDS, 2018). Esse tipo de relevo favorece o aproveitamento hidrelétrico na bacia.

Dados hidrológicos

No presente trabalho, para análise das vazões de referência Q₉₀, Q₉₅ e Q₉₈ foram utilizados dados das estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), obtidos no Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWEB), disponível em <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Na BHRT foram identificadas 18 estações fluviométricas com séries históricas de vazão. No entanto, de acordo com Cupak (2017) e Molina et al. (2014), para estudos que envolvam análises estatísticas é recomendado que a série histórica de dados hidrológicos tenha no mínimo 10 anos de observações e no máximo 10% de dados faltantes. Assim, no presente trabalho foram selecionadas 16 estações fluviométricas (Tabela 1) que atendem a esses requisitos. As Figuras 1a e 1b mostram a localização das estações fluviométricas e das PCHs e CGHs.

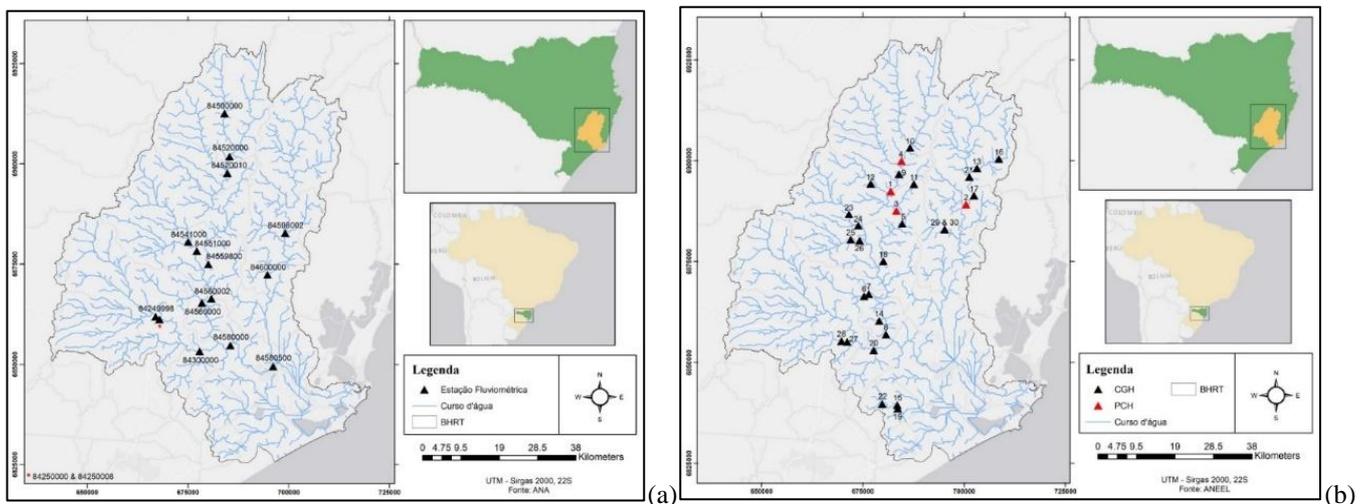


Figura 1: Localização das estações fluviométricas (a), e das CGH e PCH em operação na BHRT (b).

No presente trabalho, a partir das curvas de permanência diárias e mensais foram calculadas as vazões Q₉₀, Q₉₅ e Q₉₈, devido ao fato de serem utilizadas para o cálculo da disponibilidade hídrica e do potencial hidrelétrico de uma bacia hidrográfica (ANEEL, 2000; ANA, 2019 e SDE, 2008a e 2008b).

Desta forma, a metodologia para a determinação da curva de permanência foi baseada em Tucci (2013), porém utilizando valores individuais de vazões mínimas de referência, em vez de agrupá-las em intervalos de classes. Com esses dados, as curvas de permanência foram determinadas, ordenando as vazões (médias mensais e diárias) em ordem decrescente e calculando as frequências acumuladas dos valores iguais ou superiores ao valor da vazão considerada (Q_i). A probabilidade (P_j) de valores de vazão maiores ou iguais a Q_i foi calculada por:

$$P_j = \frac{Fac}{N} \cdot 100 \quad (1)$$

Em que P_j é a probabilidade de uma vazão ser igualada ou superada (em %); Fac é a frequência acumulada dos valores de vazão; e N é o número de dados de vazões observados para o período considerado.

O número de dados (N) mensais e diários utilizados no presente estudo correspondem aos períodos de observações dessas estações, conforme mostra a Tabela 1. Deste modo, as curvas de permanência foram determinadas por meio de um gráfico colocando os valores de P_j na abscissa e Q_j na ordenada.



Tabela 1: Estações fluviométricas localizadas na bacia hidrográfica do rio Tubarão, Santa Catarina.

Código*	Nome da estação	A (km ²)	Latitude	Longitude	Período (anos)
84598002	São Martinho Jus**	620	-28.1656°	-48.9717°	1978 - 1989
84600000	Armazém Capivari	770	-28.2606°	-49.0147°	1981 - 2014
84300000	Pedras Grandes	822	-28.4347°	-49.1831°	1942 - 2014
84500000	Povoamento	139	-27.8989°	-49.1297°	1986 - 2014
84520000	Divisa de Anitápolis	380	-27.9956°	-49.1161°	1942 - 1967
84520010	Santa Rosa de Lima	676	-28.0331°	-49.1186°	1944 - 2014
84541000	Grão Pará	158	-28.1889°	-49.2153°	1986 - 2014
84551000	Rio Pequeno	379	-28.2094°	-49.195°	1945 - 1967
84559800	Braço do Norte Mont**	1515	-28.2389°	-49.1631°	1942 - 2014
84560000	São Ludgero I	1690	-28.3258°	-49.1792°	1946 - 1988
84560002	São Ludgero II	1560	-28.3161°	-49.1556°	1986 - 2017
84250008	Orleans I	606	-28.3656°	-49.2858°	1939 - 2014
84250000	Orleans II	606	-28.3656°	-49.2858°	1939 - 1954
84580000	Rio do Pouso	2740	-28.4206°	-49.1064°	1950 - 1981
84580500	Tubarão	2840	-28.4700°	-48.9917°	1939 - 2014
84249998	Orleans - Montante	599	-28.3586°	-49.295°	1984 - 2014

*código ANA. **Jus. (Jusante). **Mont.-Montante. A= área de drenagem
 Fonte: ANA (2020)

Para avaliar a propagação do erro na estimativa das vazões regionalizadas, no presente trabalho foram calculadas as Q_{90} , Q_{95} e Q_{98} (diárias e mensais) utilizando as Equações 2 a 7 (Tabela 2) determinadas por Aguiar (2020), que aplicou o método Tradicional de regionalização. Esse método consiste no ajuste de regressões múltiplas entre a vazão e as características físicas e climáticas de bacias hidrologicamente homogêneas. De acordo com Bazzo et al. (2015) podem ser consideradas regiões homogêneas àquelas onde os coeficientes de regressão (β_i) são próximos, o R^2 e $R^2_a \geq 0,70$ e $\sigma F < 1,0$. Para a BHRT, Aguiar (2020) verificou que a área teve uma forte correlação entre as vazões Q_{90} , Q_{95} e Q_{98} , confirmada por um coeficiente de correlação de Pearson ($r > 0,86$ (para vazões diárias) e $> 0,88$ (para vazões mensais)). Neste caso, a áreas de drenagem utilizadas foram das estações da ANA (2020). Ainda, no estudo de Aguiar (2020), a equação potencial forneceu os melhores resultados para as vazões Q_{90} , Q_{95} e Q_{98} , tanto para dados diários ($R^2 > 0,86$, $R^2_a > 0,74$ e $\sigma F < 0,531$), quanto mensais ($R^2 > 0,91$, $R^2_a > 0,83$ e $\sigma F < 0,409$). Adicionalmente, a fim de avaliar as vazões Q_{90} , Q_{95} e Q_{98} (diárias e mensais) nos locais onde estão as PCHs e CGHs da BHRT (Figura 1b), foram utilizadas as áreas de drenagem (km²) extraídas da ANEEL (2024) e as Equações 2 a 7 (Tabela 2). Essas áreas também foram delimitadas usando o modelo digital de elevação (MDE) com resolução 30 x30 m da EPAGRI/CIRAM (2024) utilizando como referência o local do barramento, para fins de comparação com a ANEEL (2024).

Tabela 2. Equações para regionalização de vazões (m³.s⁻¹) diárias e mensais para a bacia do Rio Tubarão

Tipo	Permanência	Equação
Diária	90	$Q = 0,009. (A)^{0,983}$ (2)
	95	$Q = 0,008. (A)^{0,978}$ (3)
	98	$Q = 0,006. (A)^{0,989}$ (4)
Mensal	90	$Q = 0,014. (A)^{0,972}$ (5)
	95	$Q = 0,012. (A)^{0,969}$ (6)
	98	$Q = 0,011. (A)^{0,955}$ (7)

Fonte: Aguiar (2020)



Resultados e Discussão

Comparação entre as vazões de permanência (diárias e mensais), observadas e regionalizadas.

As Tabelas 3 e 4 mostram o erro relativo (ER%) entre as vazões mínimas de referência (Q_{90} , Q_{95} e Q_{98}) diárias e mensais regionalizadas (Equações 2 a 7) e as observadas nas estações fluviométricas da Tabela 1.

Os valores positivos de ER%, indicam que as vazões regionalizadas foram subestimadas em relação às observadas. A subestimativa pode representar os recursos hídricos estão sendo explorados abaixo do potencial da bacia, ou, na fase de estudo de viabilidade implicar na conclusão da inviabilidade de um empreendimento. Já ER% negativos, mostram que as vazões regionalizadas foram superestimadas em relação às observadas. Esse resultado pode causar conflitos entre os usuários da água e os órgãos gestores, responsáveis pela alocação dos recursos hídricos, pois não correspondem à realidade das vazões que naturalmente ocorrem na bacia. Também observa-se que nas Tabelas 3 e 4 as vazões Q_{90} , Q_{95} e Q_{98} estimadas para a estação 84250008 (606 km²) apresentaram as maiores subestimativas. Neste caso, para as vazões diárias os ER% foram -132,91% (2,8 m³.s⁻¹), -153,65% (2,55 m³.s⁻¹) e -222,72% (2,34 m³.s⁻¹) para Q_{90} , Q_{95} e Q_{98} , respectivamente. Já para as vazões mensais Q_{90} , Q_{95} e Q_{98} o ER% foi -102,59% (3,6 m³.s⁻¹), -161,49% (3,7 m³.s⁻¹) e -120,10% (2,73 m³.s⁻¹), respectivamente. Novais et al. (2007) e Bazzo et al. (2017) comentam que, o ER% tende a ser maior para vazões menores. Ainda, nas bacias onde as diferenças entre as vazões observadas e estimadas são muito grandes (ER% < -100), uma das hipóteses é que pode haver problema com a curva-chave. Para Santos et al. (2001), valores altos de ER%, normalmente estão associados à curva-chave, pois ela é obtida por uma relação entre o nível de água (m) e vazão (m³.s⁻¹), com base em dados medidos simultaneamente dessas duas variáveis. No entanto, vazões mínimas e máximas precisam ser extrapoladas (estimadas), uma vez que, o número de medições de eventos extremos é menor. A extrapolação de dados pode levar a estimativas erradas e, conseqüentemente, propagar incertezas nas vazões Q_{90} , Q_{95} e Q_{98} . Além disso, equações de regionalização que utilizam somente a área como variável independente, segundo Pruski et al. (2015), podem não refletir o efeito da variabilidade espacial das chuvas, implicando em superestimava das vazões regionalizadas em relação às observadas, quando a área do local de interesse é muito pequena.

Tabela 3. Comparação entre as vazões de permanência diárias, observadas e regionalizadas para BHRT e erros relativos.

Código*	A (km ²)	Vazão Estimada (diária)								
		Q ₉₀			Q ₉₅			Q ₉₈		
		Obs. (m ³ .s ⁻¹)	Est. (m ³ .s ⁻¹)	ER (%)	Obs. (m ³ .s ⁻¹)	Est. (m ³ .s ⁻¹)	ER (%)	Obs. (m ³ .s ⁻¹)	Est. (m ³ .s ⁻¹)	ER (%)
84598002	620	8,12	5,00	38,40%	7,15	4,31	39,78%	6,36	3,47	45,50%
84600000	770	8,55	6,19	27,61%	7,19	5,32	25,98%	5,81	4,29	26,09%
84500000	139	1,71	1,15	32,73%	1,53	1,00	34,80%	1,32	0,79	40,16%
84520000	380	4,72	3,09	34,50%	4,05	2,67	34,13%	3,32	2,14	35,67%
84520010	676	8,17	5,45	33,34%	7,00	4,69	33,06%	6,20	3,78	39,11%
84541000	158	1,23	1,30	-6,08%	0,97	1,13	-16,57%	0,73	0,90	-22,83%
84551000	379	2,81	3,08	-9,73%	2,25	2,66	-18,25%	1,42	2,13	-50,02%
84559800	1515	13,28	12,04	9,35%	11,37	10,32	9,27%	9,37	8,39	10,50%
84560000	1690	16,64	13,40	19,44%	12,12	11,48	5,28%	9,48	9,34	1,43%
84560002	1560	11,84	12,39	-4,65%	9,22	10,62	-15,14%	7,58	8,63	-13,89%
84249998	599	4,35	4,84	-11,16%	3,73	4,16	-11,61%	3,08	3,35	-8,76%
84250008	606	2,10	4,89	-132,91%	1,66	4,21	-153,65%	1,05	3,39	-222,72%
84250000	606	3,36	4,89	-45,57%	2,42	4,21	-73,99%	1,83	3,39	-85,17%
84580000	2740	20,90	21,56	-3,13%	16,19	18,42	-13,75%	12,09	15,07	-24,64%
84580500	2840	38,61	22,33	42,17%	34,64	19,07	44,94%	29,22	15,61	46,57%
84300000	822	6,710	6,600	1,64%	5,390	5,670	-5,260%	4,330	4,580	-5,80%

Est. - estimada. Obs.- observada. Fonte: Aguiar (2020)

Ressalta-se que, as estações 84250008 (Orleans I) e 84250000 (Orleans II) estão localizadas na mesma sub-bacia, próximas uma da outra (Figura 1) e possuem a mesma área de drenagem (606 km²). No entanto, os ER% entre as vazões observadas e regionalizadas da estação 84250008 foram maiores do que a estação 84250000. Essa diferença pode estar relacionada a problemas na curva-chave, conforme comentado anteriormente.



Tabela 4. Comparação entre as vazões de permanência mensais, observadas e regionalizadas para BHRT e erro relativo.

Código*	A (km ²)	Vazão Estimada (mensal)								
		Q ₉₀			Q ₉₅			Q ₉₈		
		Obs. (m ³ .s ⁻¹)	Est. (m ³ .s ⁻¹)	ER (%)	Obs. (m ³ .s ⁻¹)	Est. (m ³ .s ⁻¹)	ER (%)	Obs. (m ³ .s ⁻¹)	Est. (m ³ .s ⁻¹)	ER (%)
84598002	620	9,25	7,25	21,62%	8,31	6,10	26,65%	7,45	5,11	31,46%
84600000	770	10,06	8,95	11,04%	8,67	7,52	13,27%	7,23	6,28	13,13%
84300000	139	2,26	1,69	25,01%	1,98	1,43	27,71%	1,60	1,22	23,47%
84500000	380	5,60	4,50	19,56%	4,94	3,79	23,22%	4,34	3,20	26,28%
84520000	676	10,14	7,89	22,23%	8,87	6,63	25,27%	8,05	5,55	31,10%
84520010	158	1,65	1,92	-16,34%	1,30	1,62	-24,66%	1,10	1,38	-25,81%
84541000	379	4,14	4,49	-8,53%	3,14	3,78	-20,49%	2,34	3,19	-36,39%
84551000	1515	15,92	17,28	-8,53%	14,11	14,49	-2,68%	12,53	11,99	4,34%
84559800	1690	18,87	19,21	-1,83%	15,96	16,11	-0,92%	13,26	13,31	-0,34%
84560000	1560	14,58	17,78	-21,92%	10,85	14,90	-37,37%	9,01	12,33	-36,80%
84560002	599	5,60	7,01	-25,20%	4,85	5,90	-21,55%	4,26	4,94	-15,99%
84250008	606	3,50	7,09	-102,59%	2,28	5,96	-161,49%	2,27	5,00	-120,10%
84250000	606	4,99	7,09	-42,10%	3,81	5,96	-56,48%	2,93	5,00	-70,52%
84580000	2740	27,47	30,73	-11,88%	21,59	25,73	-19,15%	16,71	21,11	-26,32%
84580500	2840	50,55	31,82	37,04%	45,26	26,63	41,15%	37,80	21,84	42,21%
84249998	822	9,18	9,54	-3,88%	7,24	8,01	-10,65%	6,40	6,68	-4,45%

*Código das estações da ANA. Est. – estimada. Obs.- observada. Fonte: Aguiar (2020)

As Figuras 2a e 2b mostram a relação entre a área de drenagem e o ER% das vazões Q₉₀, Q₉₅ e Q₉₈, observadas e estimadas, para cada estação fluviométrica (Tabelas 3 e 4). Observa-se que, nas vazões de referência mais restritivas os erros são maiores, tanto para dados diários, quanto para mensais. Com dados diários o ER% para a vazão Q₉₈ foi maior do que a Q₉₅ (diferença de 69,07%), evidenciando a importância de adotar valores diários nos processos de outorga de uso da água, principalmente em locais onde há muita demanda de água para várias atividades na bacia. Assim como nas Tabelas 3 e 4, verifica-se que, quanto menor a área de drenagem, maior o erro na estimativa das vazões mínimas de referência

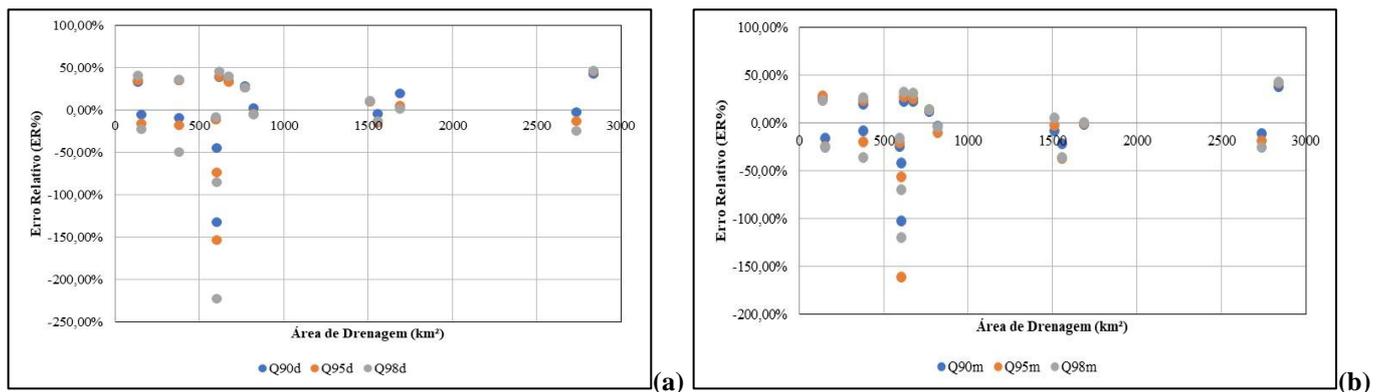


Figura 2. Relação entre a área de drenagem e o erro relativo para as vazões de permanência diárias (a) e mensais (b) para vazões de permanência diárias e mensais regionalizadas para os locais onde estão as PCHs e CGHs em operação na BHRT.

A Tabela 5 apresenta os erros relativos (ER%) entre as vazões de referência (Q₉₀, Q₉₅ e Q₉₈) diárias e mensais regionalizadas para as usinas hidrelétricas em operação na BHRT.



Tabela 5. Comparação entre vazões ($m^3.s^{-1}$) Q_{90} , Q_{95} e Q_{98} regionalizada diárias e mensais, e respectivos erros relativos (ER%) das usinas hidrelétricas da BHRT.

Usina		Vazão Estimada ($m^3.s^{-1}$)									
		Q_{90}			Q_{95}			Q_{98}			
Id*	Nome	A (km^2)	Diária	Mensal	ER%	Diária	Mensal	ER%	Diária	Mensal	ER%
Pequena Central Hidrelétrica (PCH)											
1	Barra do Rio Chapéu	673,00	5,42	7,85	-44,80	4,67	6,60	-41,46	3,76	5,52	-46,92
2	Capivari	448,00	3,63	5,29	-45,45	3,13	4,45	-41,98	2,51	3,74	-48,97
3	Rio Fortuna	886,00	7,11	10,26	-44,37	6,10	8,61	-41,11	4,93	7,18	-45,56
4	Santa Rosa	378,50	3,08	4,49	-45,72	2,66	3,78	-42,20	2,13	3,19	-49,83
Erro médio					-45,09	-41,69			-47,82		
Central de Geração Hidrelétrica (CGH)											
5	São Maurício	976,00	7,81	11,27	-44,21	6,71	9,46	-40,99	5,43	7,88	-45,08
6	Pinheiros II	84,14	0,70	1,04	-48,15	0,61	0,88	-44,13	0,48	0,76	-57,69
7	Rio das Furnas	88,60	0,74	1,09	-48,07	0,64	0,93	-44,07	0,51	0,80	-57,41
8	Daltro Bianchini	1758,68	13,94	19,97	-43,28	11,94	16,74	-40,24	9,72	13,82	-42,20
9	Nova Fátima	459,00	3,72	5,41	-45,41	3,21	4,55	-41,95	2,57	3,83	-48,85
10	Varginha Jelu	398,00	3,24	4,71	-45,64	2,79	3,97	-42,13	2,24	3,34	-49,57
11	Wiggers	28,00	0,24	0,36	-49,96	0,21	0,30	-45,57	0,16	0,27	-63,70
12	Rio Chapéu	19,71	0,17	0,25	-50,54	0,15	0,22	-46,03	0,11	0,19	-65,66
13	Rio do Poncho II	117,58	0,98	1,44	-47,61	0,85	1,22	-43,70	0,67	1,04	-55,90
14	Morro do Cruzeiro	12,18	0,11	0,16	-51,34	0,09	0,14	-46,66	0,07	0,12	-68,40
15	Azambuja	49,72	0,42	0,62	-49,01	0,37	0,53	-44,82	0,29	0,46	-60,53
16	Rio do Poncho I	65,02	0,55	0,81	-48,57	0,47	0,69	-44,47	0,37	0,59	-59,07
17	Volta Grande	433,00	3,51	5,11	-45,51	3,03	4,30	-42,02	2,43	3,62	-49,14
18	Teodoro Schlickmann	1032,17	8,26	11,90	-44,12	7,09	9,99	-40,92	5,74	8,31	-44,80
19	Treze de Maio	50,53	0,43	0,63	-48,99	0,37	0,54	-44,80	0,29	0,47	-60,44
20	AZL Zanella	86,16	0,72	1,06	-48,11	0,62	0,90	-44,10	0,49	0,78	-57,56
21	Santa Maria	412,41	3,35	4,88	-45,59	2,89	4,11	-42,09	2,32	3,46	-49,39
22	Microgeração Bardini	36,38	0,31	0,46	-49,53	0,27	0,39	-45,23	0,21	0,34	-62,25
23	Ilha Grande	136,41	1,13	1,66	-47,37	0,98	1,41	-43,51	0,78	1,20	-55,12
24	Fortuna	189,53	1,56	2,29	-46,84	1,35	1,93	-43,08	1,07	1,65	-53,39
25	São José	145,41	1,20	1,77	-47,26	1,04	1,50	-43,43	0,83	1,28	-54,78
26	Braço Esquerdo	149,51	1,24	1,82	-47,22	1,07	1,54	-43,39	0,85	1,31	-54,63
27	Palmeiras I	117,00	0,97	1,43	-47,62	0,84	1,21	-43,71	0,67	1,04	-55,93
28	Palmeiras II	112,00	0,93	1,37	-47,69	0,81	1,16	-43,76	0,64	1,00	-56,16
29	JE Ltda	8,38	0,07	0,11	-51,96	0,06	0,09	-47,16	0,05	0,08	-70,55
30	Nilson José Schotten	8,42	0,07	0,11	-51,95	0,06	0,09	-47,15	0,05	0,08	-70,52
Erro médio					-47,75	-43,81			--59,49		

*ID – número de identificação das PCHs e CGHs que constam na Figura 1b. Fonte: ANEEL (2024)

Observa-se na Tabela 5 que, as vazões de permanência Q_{90} , Q_{95} e Q_{98} mensais foram todas superestimadas em relação às diárias, apresentando um ER% < -40% (valores negativos indicam superestimativa). Assim como observado nas Tabelas 3 e 4, as vazões mais restritivas (Q_{98}) apresentaram os maiores erros. Tucci (2013) comenta que, nos projetos de PCH e CGH é recomendado utilizar dados diários para determinar as vazões mínimas de referência, a fim de assegurar que haja vazão suficiente para gerar energia na maior parte do tempo. No entanto, normalmente são utilizados valores médios mensais nos projetos de PCHs e CGHs



(ELETROBRÁS, 1985) o que pode superestimar os valores de energia firme e, conseqüentemente, essas usinas podem ficar um número maior de dias paradas, ao se adotar valores mensais. Back et al. (2019), também demonstraram que as vazões de permanência mensais tendem a superestimar os valores de vazões mínimas. Os autores encontraram uma diferença superior a 20% para vazões de permanência acima de 50% e, destacaram a importância desses resultados para projetos de usinas hidrelétricas a fio d'água ou nos casos de captação d'água sem reservatórios, pois a curva de permanência é mais realista quando determinada com valores de vazões diárias. Na avaliação da viabilidade econômica de uma CGH na bacia do rio Itajaí-Açu (PR), Costa et al. (2018) observaram diferenças significativas entre as vazões diárias e mensais e, verificaram que as vazões de permanência mensais podem superestimar 25% a potência instalada, impactando diretamente os resultados econômicos da usina. É importante destacar que, no Brasil a Resolução Nº 875 de 10/03/2020 da ANEEL (ANEEL, 2020) os aproveitamentos hidrelétricos são classificados conforme a potência instalada. Considera-se CGH todo aproveitamento hidrelétrico com potência ≤ 5000 kW. Enquanto, aqueles com potência instalada $> 5000,0$ kW a $\leq 30000,0$ kW são enquadrados como PCH. Os aproveitamentos hidrelétricos enquadrados na categoria de CGHs não estão sujeitas à concessão ou à autorização da ANEEL. Entretanto, devem obter junto à ANA a outorga preventiva e de direito de uso de recursos hídricos (ANA, 2024). Assim, fica evidente que, um o erro na estimativa da vazão de referência utilizada nos estudos para instalação de aproveitamentos hidrelétricos, também impactam diretamente a outorga de uso dos recursos hídricos na bacia.

Considerações Finais

Neste estudo, avaliou-se as vazões mínimas de referência Q_{90} , Q_{95} e Q_{98} e mostrou-se a importância dessas vazões para a gestão dos recursos hídricos de bacias hidrográficas. Para isso, as vazões mensais e diárias foram estimadas para 16 estações fluviométricas presentes no rio Tubarão, localizada na região sul de Santa Catarina por meio do método da Curva de Permanência. Essas vazões foram regionalizadas por sub-bacias representativas da bacia de estudo e para os locais onde existem aproveitamentos hidrelétricos de pequeno e médio porte.

Os resultados mostraram que a utilização da curva de permanência diária superestima em 44% a vazão Q_{90} e 50% as vazões Q_{95} e Q_{98} . Enquanto que, na curva de permanência mensal a superestimativa foi maior, ou seja, de 62,5% para as vazões Q_{90} e Q_{95} e 56% para Q_{98} . Ainda, verificou-se que, nas vazões de referência mais restritivas os erros são maiores, tanto para dados diários, quanto para mensais.

Com dados diários o erro relativo (ER%) para a vazão Q_{98} foi maior do que para a Q_{95} (diferença de 69,07%), evidenciando a importância de adotar valores diários nos processos de outorga de uso da água, principalmente em locais onde há muita demanda de água para várias atividades na bacia.

Nos locais onde estão instalados os empreendimentos hidrelétricos os resultados mostraram que as vazões de permanência Q_{90} , Q_{95} e Q_{98} mensais foram superestimadas em relação às diárias, apresentando um ER% $< -40\%$.

Assim, o presente estudo mostrou a importância da utilização de dados diários para determinar as vazões mínimas de referência, uma vez que, essas representam melhor a disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica. A superestimativa dessas vazões pode impactar diretamente os processos de outorga de uso da água e os estudos hidrológicos que necessitam de informações em locais com escassez de dados.

Recomenda-se para estudos futuros utilizar os dados diários de vazões de referência Q_{90} , Q_{95} e Q_{98} para verificar a viabilidade de usinas hidrelétricas a fio d'água ou nos casos de captação d'água sem reservatórios, uma vez que, representam melhor as vazões naturais dos rios.

Referências Bibliográficas

Agência Nacional de Águas E Saneamento Básico - ANA. Hidroweb: Sistemas de Informações Hidrológicas. Disponível em <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: fev, 2024.

Agência Nacional de Águas (Brasil)-ANA; 2019. Outorga dos direitos de uso de recursos hídricos /Agência Nacional de Águas. -- Brasília: ANA. 79 p.

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil) - ANA; 2024. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2023: informe anual -Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Brasília. ANA118 p.

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. SIGEL: Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico. Empreendimentos de Geração. Disponível em <Mapa dos Empreendimentos de Geração de Energia Elétrica - Visão Geral>. Acesso em: fev, 2024.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL; 2020. Resolução Normativa Nº 875, de 10 de março de 2020. Estabelece os requisitos e procedimentos necessários à aprovação dos Estudos de Inventário Hidrelétrico de bacias hidrográficas, à obtenção de outorga de autorização para exploração de aproveitamentos hidrelétricos. Brasília.

Aguiar, A.F.O.; 2020. Regionalização de vazões mínimas diárias e mensais para bacias hidrográficas do sul de Santa Catarina, Brasil. Repositório Institucional da UFSC - Dissertações, 113p.



- Alvares, C.A.; *et al.*; 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711-728.
- Back, Á.J.; Zambrano, G. D.; Corseuil, C.W.; 2019. Streamflow permanence curve of the river Timbó, Santa Catarina, Brazil. *Acta Brasiliensis*, v. 3, n. 2, p. 56-61.
- Bazzo, K. R.; *et al.*; 2017. Regionalização da vazão Q95: comparação de métodos para a bacia hidrográfica do Rio Taquari-Antas, RS. *Revista Ambiente e Água*, Taubaté, v.12, n. 5, p. 855-870.
- Brasil. Lei nº 9.433, de 08 de jan. de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília: Diário Oficial da União, 1997.
- Burgan, H.I.; Aksoy H.; 2022. Daily flow duration curve model for ungauged intermittent subbasins of gauged rivers. *Journal of Hydrology* 604 (2022) 127249.
- Cecílio, R. A.; *et al.*; 2018. Avaliação de métodos para regionalização das vazões mínimas e médias na bacia do rio Itapemirim. *Revista Scientia Agraria*, Curitiba, v. 19, n. 2, p. 122-132.
- Collischonn, W.; Dornelles, F. (2021). *Hidrologia para engenharias e ciências ambientais*. 3ª Imp. Porto Alegre: ABRH: 347p.
- Collischonn, W. *et al.* 2023. *Métodos simples para estimar vazões de referência e sua incerteza (livro eletrônico)*. ABRHidro. Porto Alegre, RS.
- Costa, T. F.; Santos, I. F. S.; 2018. Análise do impacto da metodologia de construção da curva de permanência de vazões sobre os benefícios ótimos de uma central hidrelétrica. In: XII Conferência de Pequenas Centrais Hidrelétricas, Mercado & Meio Ambiente, São Paulo. 15p.
- Cupak, A.; 2017. Initial results of nonhierarchical cluster methods use for low flow grouping. *Journal of Ecological Engineering*, Poland, v. 18, n. 2, p. 44-50.
- Eletrobrás - Centrais Hidrelétricas Brasileiras S.A. (1995). *Metodologia para regionalização de vazões*. Rio de Janeiro, RJ, 1985. 202p.
- Empresa de Pesquisa Agropecuária -EPAGRI; 2024. **CIRAM** - Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina. Mapas digitais, Santa Catarina. Disponível em: <<https://ciram.epagri.sc.gov.br/mapoteca/>> Acesso em jan., 2024.
- Galatto, S.L.; Back, A.J.; 2023, Distribuição de probabilidades para determinação de vazão mínima de referência anual e sazonal da bacia do Rio Araranguá, Santa Catarina, Brasil. *Contribuciones a Las Ciencias Sociales*, São José dos Pinhais, v.16, n.9, p.
- Gasques, A.C.F.; *et al.*; 2018. Regionalização de vazões mínimas: breve revisão teórica. *REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, [S.L.], v. 14, n. 2, p. 60-70.
- He, C. *et al.*; 2021. Future global urban water scarcity and potential solutions. *Nature Communications*, 12:4667. Disponível em: www.nature.com/naturecommunications. Acesso jan. 2024
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2024). De 2010 a 2022, população brasileira cresce 6,5% e chega a 203,1 milhões. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37237-de-2010-a-2022-populacao-brasileira-cresce-6-5-e-chega-a-203-1-milhoes#:~:text=A%20popula%C3%A7%C3%A3o%20do%20pa%C3%ADs%20chegou,foi%20de%200%2C52%25.>> Acesso em: fev, 2024.
- Kobiyama, M.; Mota, A.A.; 2012. Recursos hídricos e saneamento. *Anais ACIRNE*, p. 1-33.
- Matuguma, R.E.; 2019. Avaliação das vazões mínimas regionalizadas para estimativa do potencial hidrelétrico da bacia do rio Braço do Norte, SC. *Repositório Institucional da UFSC - TCC*, 56p.
- Melati, M.D.; Marcuzzo, F.F.N. 2016. Regressões simples e robusta na regionalização da vazão Q95 na Bacia Hidrográfica do Taquari-Antas. *Ciência e Natura*, UFSM. Santa Maria, RS. v.38, n.2, p. 722-739.



- Molina, S. K. M.; 2014. Caracterização de disponibilidade hídrica e comparação de metodologias de regionalização de vazões. *Geociências*, São Paulo, UNESP, v. 33, n. 3, p. 506-515.
- Novaes, L.F.; *et al.*; 2007. Avaliação do desempenho de cinco metodologias de regionalização de vazões. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, RS, v. 12, n. 2, p. 51-61.
- Oliveira, V.A.; 2013. Regionalização de vazões nas regiões das Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos GD1 e GD2. Repositório Institucional UFLA - Dissertações, 99p.
- Pandolfo, C.; *et al.*; 2002. Atlas climatológico digital do Estado de Santa Catarina. Epagri.
- Pinheiro, V.B.; Naghettini, M.; 2010. Calibração de um modelo chuva-vazão em bacias sem monitoramento fluviométrico a partir de curvas de permanência sintéticas. *RBRH*, Porto Alegre, RS, v. 15, n. 2, p. 143-156.
- Pruski, F. F.; *et al.*; 2012. Extrapolação de equações de regionalização de vazões mínimas: alternativas para atenuar os riscos. *Water Resources and Irrigation Management*, Cruz das Almas, v. 1, n. 1, p. 51-59.
- Pruski, F.F. *et al.* (2015). Low-flow estimates in regions of extrapolation of the regionalization equations: a new concept. *Engenharia Agrícola*, 35(5), 808-816.
- Santa Catarina, 2008a. Secretaria de Estado e Desenvolvimento Econômico Sustentável. Portaria SDS nº 36, de 29 de julho de 2008. Estabelece os critérios de natureza técnica para outorga de direito de uso de recursos hídricos para captação de água superficial, em rios de domínio do Estado de Santa Catarina e dá outras providências. *Diário Oficial do Estado*, Florianópolis, n. 18.414, 31 de julho de 2008a.
- Santa Catarina; 2008b. Secretaria de Estado e Desenvolvimento Econômico Sustentável. Portaria SDS nº 51, de 2 de outubro de 2008. Altera a Portaria SDS nº 36, de 29 de julho de 2008. *Diário Oficial do Estado*, Florianópolis, n. 18.462, de 7 de outubro de 2008b.
- Santos, I.; *et al.*; 2001. *Hidrometria Aplicada*. Lactec, 370p.
- Schreffler, C. L.; 1998. Low-flow statistics of selected streams in Chester County, Pennsylvania. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations - Report 98-4117, p. 43.
- Tucci, C.E. M. Regionalização de vazões; 2002. In: TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2001.
- Tucci, C.E.M.; 2013. *Hidrologia: ciência e aplicação*. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH. 944 p.
- UN- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2018). *The World's Cities in 2018—Data Booklet (ST/ESA/ SER.A/417)*.
- UN- United Nations; 2022. *World Population Prospects 2022. Summary of Results*. Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2022). Disponível em: <https://www.un.org/development/desa/pd/>. Acesso em: mar, 2024.



CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA SUPLEMENTADA COM BIOCHAR: UMA ESTRATÉGIA PROMISSORA PARA A MAXIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS, E PARA VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS ALIMENTARES E LODO DE ETE

1Ricardo Henrique Thomé Dorneles, 2Lúcia Allebrandt da Silva Ries, 3Íthalo Barbosa Silva de Abreu,
4Emmanuel Damilano Dutra, 5Caroline Borges, 6Wallysson Klaus Pires Barros

1 Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, e-mail: ricardo-dorneles@uergs.edu.br; 2 Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, e-mail: lucia-ries@uergs.edu.br; 3 Universidade Federal de Pernambuco, e-mail: ithalo.abreu@ufpe.br; 4 Universidade Federal de Pernambuco, e-mail: emmanuel.dutra@ufpe.br; 5 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: caroline.agustini@ufrgs.br; 6 Universidade Federal de Pernambuco, e-mail: wallysson.barros@ufpe.br

Palavras-chave: Tratamento de Efluentes; Bioprocessos; Bioeconomia.

Resumo

A digestão anaeróbica de resíduos alimentares e lodo de estações de tratamento é uma tecnologia promissora para aproveitamento desses - e de outros - resíduos orgânicos, convertendo-os em biogás e numa matéria orgânica que está esgotada e é menos danosa ao meio ambiente. A codigestão anaeróbica, que emprega dois ou mais tipos de resíduos, apresenta potencial para aumentar a produção de gás metano. Contudo, desafios como baixa produtividade de metano e alta emissão de dióxido de carbono, devido à composição complexa do lodo, ainda precisam ser superados. Recentemente, o carvão vegetal (biochar) oriundo da pirólise de resíduos lignocelulósicos vem sendo estudado como alternativa para otimizar a produção de metano na codigestão. Neste estudo, experimentou-se a codigestão anaeróbica de resíduos alimentares e lodo de estações de tratamento, suplementada com a adição de biochar em duas concentrações. Essa metodologia objetivou avaliar a aplicabilidade do biochar na melhora da produção de metano no processo de codigestão desses resíduos. Os resultados indicam que a adição de biochar aumenta significativamente a porcentagem de metano na digestão anaeróbica dos resíduos, atingindo 50,7% e 63,7% para 10g/L e 20g/L de carvão, respectivamente, contra 33,5% sem suplementação. O biochar reduziu a emissão de dióxido de carbono e aumentou a eficiência na produção de metano. Os resultados encontrados destacam a potencial aplicação da codigestão empregando resíduos orgânicos abundantes e prejudiciais ao meio ambiente, confirmando que o biochar pode otimizar a produção de biogás e agregar valor aos resíduos, mitigando impactos ambientais oriundos de possíveis descartes inadequados.

Introdução

O gerenciamento de resíduos sólidos urbanos (RSU) constitui um dos maiores desafios ambientais contemporâneos, uma consequência nítida do desenvolvimento econômico, do crescimento populacional e dos hábitos de consumo. Segundo o Índice de Desperdício Alimentar do PNUA de 2021 (ONU, 2021), a estimativa de desperdício alimentar dos agregados familiares no Brasil era 12.578.308 toneladas/ano. O que representa 60 kg/capita/ano. Quando manejada de forma inadequada esta matéria orgânica causa uma série de problemas ambientais, econômicos e de saúde coletiva. Há geração de gases indesejáveis (CO₂, CH₄), poluição do solo e da água em razão do lixiviado gerado apresentar uma alta carga de poluentes, e emissão de odores desagradáveis em razão dos compostos orgânicos voláteis liberados pelo metabolismo de microrganismos anaeróbios.

De maneira semelhante, a geração de lodo em estações de tratamento de esgoto (ETEs) também constitui um problema potencial e de preocupação global, devido à grande quantidade produzida diariamente e à alta concentração de microrganismos (MOs) patogênicos que categorizam este resíduo como um poluente ambiental, que demanda investimentos para a aplicação de métodos sustentáveis que colaborem para a redução dos níveis de poluição. O lodo pode ser considerado um contaminante perigoso dependendo do contexto da sua produção e do seu manejo (Andreoli, Von Sperling e Fernandes, 2001). No Brasil, a geração de lodo em ETEs é estimada em aproximadamente 70 mil toneladas por ano, cujas principais formas de gerenciamento são a disposição em aterros sanitários, e uma menor parte destinada à aplicação na agricultura (desde que observada a CONAMA 375/2006) e a incineração. Em algumas cidades específicas, um volume pouco considerável ainda é utilizado para co-disposição em cimenteiras e produção de briquetes ou pellets para construção civil (Brasil, 2019).

No entanto, tais opções de gerenciamento previstos nos dispositivos regulamentares ainda podem gerar efeitos e resultados negativos ao meio ambiente, dos quais pode citar: a produção de gases e lixiviados tóxicos em aterros, necessidade de rigorosos tratamentos antes da disposição final no solo e geração de cinzas e particulados durante a incineração nos processos mais convencionais (Andreoli, Von Sperling e Fernandes, 2001).

Pensando em mitigação de danos ao meio ambiente, a digestão anaeróbia (DA) surge como uma tecnologia viável e promissora para empregar esses dois resíduos amplamente disponíveis, mitigando seus efeitos danosos ao meio ambiente e, ao mesmo tempo, gerando energia renovável a partir de resíduos passíveis de valorização na cadeia energética.

A co-digestão anaeróbia consiste na digestão conjunta de dois ou mais substratos ou resíduos, e é especialmente atraente, pois maximiza a produção de biogás devido ao melhor equilíbrio de nutrientes, ao efeito sinérgico entre os micro-organismos que compõem a biomassa do lodo, e ao aumento da carga orgânica biodegradável devido à ação conjunta deste complexo de microrganismos.



No entanto, apesar de seu potencial comprovado em alguns resíduos, vários desafios ainda são observados e precisam ser superados para a consolidação dessa tecnologia, como por exemplo: i) baixa produtividade de metano durante a co-digestão, ii) alta produção de dióxido de carbono, iii) baixa estabilidade do processo, e iv) presença de agentes inibidores indesejáveis ao processo que comprometem o rendimento e a eficiência da produção de metano. Assim, pesquisas visando otimizar a estabilidade do processo e aprimorar a qualidade do biogás produzido são relevantes pois abrem novas oportunidades. Nesse contexto, o uso de biochar tem sido cada vez mais proposto e explorado como método eficaz e promissor para a estabilidade operacional do processo, e para o aumento da eficiência na produção de biogás (Zhao et al., 2021; Kumar et al., 2021, Deena et al., 2022).

O biochar é um material carbonáceo sólido produzido a partir da decomposição térmica da matéria orgânica (biomassa) na ausência de oxigênio ou em condições de baixas concentrações de oxigênio, e suas características físico-químicas são singulares, ou seja, a natureza da biomassa e as condições empregadas no processo - como temperatura, tempo de permanência e taxa de aquecimento - estão diretamente ligadas às propriedades apresentadas pelo biochar (Liu et al., 2022). Entre as propriedades mais pertinentes apresentadas pelo biochar em relação ao processo de DA, pode-se mencionar: i) desempenho como adsorvente de compostos que geralmente inibem a atividade de bactérias metanogênicas (metais pesados e toxinas); ii) excelente substrato para a imobilização de micro-organismos, devido à grande área superficial geralmente apresentada (poros); iii) forte atuação no meio, concedendo a capacidade de resistência às mudanças de pH (frequentemente observadas em processos de DA), e iv) excelente capacidade de transferência de elétrons (em razão de seus grupos funcionais de superfície, e de sua estrutura) (Liu et al., 2022; Kumar et al., 2021; Chiappero et al., 2021).

Assim, a adição de biochar ao processo pode reduzir a ação de agentes inibidores através da adsorção desses, reduzindo a fase de latência metanogênica, tamponar o pH do meio proporcionando maior estabilidade do processo, e ainda, devido à sua estrutura porosa e à presença de cargas elétricas superficiais, o biochar pode servir de suporte, imobilizando os MOs, proporcionando um aumento da eficiência metabólica, e por consequência uma maior produção de metano. Neste contexto, o objetivo geral deste trabalho é avaliar o potencial do biochar como uma alternativa para aumentar a eficiência na produção de biogás em um processo de co-digestão anaeróbia de resíduos alimentares e lodo oriundo de estação de tratamento de esgoto.

Materiais e Métodos

A biomassa vegetal oriunda de podas de árvores foi coletada no campus Joaquim Amazonas da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), na cidade de Recife. A biomassa foi pré-triturada em sistema motorizado e posteriormente seca em estufa por 72 h e triturada em moinho de facas Willey até uma granulometria de 20 *mesh*.

O biochar foi produzido através da pirólise da biomassa vegetal em reator de bancada a uma temperatura de 400 °C por duas horas, sob atmosfera inerte. Foi empregada uma taxa de aquecimento de 20 °C/min e uma vazão de nitrogênio gasoso de 1 L/min.

Após, o biochar foi levado para análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para visualização de sua estrutura.

Neste trabalho foi empregado como substrato o resíduo de alimentos proveniente de um restaurante industrial, e como inóculo, o lodo oriundo de uma estação de tratamento de esgoto.

O resíduo de alimentos foi obtido a partir de um refeitório industrial localizado no município de Recife. O material coletado foi triturado em um triturador comercial, e depois passou por um processo de secagem a 65 °C por 7 dias, e novamente triturado em um liquidificador industrial e peneirado a 20 *mesh*.

O resíduo de alimentos foi caracterizado quanto aos teores de umidade, sólidos suspensos totais, sólidos suspensos voláteis, sólidos totais, carboidratos totais, lipídeos, proteínas, lignina, cinzas, extrativos (de Abreu, 2022).

Ainda, a equipe do Laboratório de Tecnologias Energéticas e Nucleares da UFPE determinou os percentuais de sólidos voláteis (SV) e de sólidos totais (ST), de acordo com Apelt et al., 2016. Os valores encontrados para ambos foram 84,6% e 93,7%, respectivamente.

O lodo (inóculo) foi coletado de reatores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket ou Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente) uma vez que a microbiota anaeróbia já está adaptada às condições deste experimento, mas neste caso o lodo já vem exaurido de carbono, junto à Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) do Departamento Municipal de Águas e Esgoto (DMAE) de Porto Alegre, Unidade Serraria.

O material coletado foi armazenado em frascos âmbar de polietileno vedados, para impedir a entrada de oxigênio do ar atmosférico, e mantidos à temperatura ambiente durante 2 horas, até a montagem dos reatores. Após a montagem dos biodigestores, o lodo remanescente foi disposto em geladeira comercial à temperatura aproximada de 4°C. Na sequência mediu-se o pH do lodo (inóculo), empregando um pHmetro (marca Analion, modelo PM 608).

O lodo também foi submetido à análise de DQO, em laboratório externo (QUIMIOAMBIENTAL), com o intuito de avaliar a quantidade de matéria orgânica presente, e sua capacidade de consumir oxigênio durante o processo de decomposição. O laboratório seguiu a Metodologia: *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 24ª ed. - 2022.

Os biorreatores foram confeccionados de garrafa PET (com capacidade volumétrica de 600 mL e volume útil de 350 mL) com tampa rosqueada de náilon à qual estão acopladas duas válvulas de abertura para o monitoramento do biogás formado: uma abertura lateral para retirada do gás a ser analisado via cromatografia gasosa, e outra superior para medida da pressão do gás, via manômetro, e posterior conversão a volume.



Ensaio Experimental

Inicialmente, foi necessário verificar a estanqueidade dos biodigestores. Para tal, ar comprimido (com pressão de 1 a 1,5 bar) foi injetado nos biodigestores sendo em seguida mergulhados em um recipiente com água. A existência de vazamentos foi identificada pela produção de bolhas de ar, ao longo de uma semana. Para tal existência, mais camadas de fita veda-rosca foram adicionadas à rosca da garrafa.

Após, os ensaios foram realizados utilizando o resíduo de alimentos como substrato, o lodo de ETE como inóculo e o biochar como aditivo do processo.

Para o ensaio da biodigestão, inicialmente adicionou-se cerca de 175 mL do lodo, medidos em proveta, em cada um dos biodigestores.

Na sequência, adicionou-se o substrato na quantidade de sólidos voláteis (SVs) correspondentes aos SVs do lodo.

Os reatores foram alimentados manualmente com cerca de 10 g de sólidos voláteis/L, mantendo a proporção de inóculo e de substrato em 1:1, conforme Zhang et al., (2022).

Após, fez-se a diferença da massa pesada de sólidos com a quantidade de água destilada que deveria ser inserida (175 mL) para completar o volume útil de 350 mL, considerando 1 g de água para 1 mL. E assim, completou-se com água.

Após, adicionou-se o biochar nas concentrações de 10 g/L e 20 g/L (com exceção do controle), conforme estudos da literatura (Zhao et al., 2021).

A Tabela 1 apresenta a composição final de cada um dos 6 reatores preparados para a biodigestão.

Reator	Quantidade de inóculo (mL)	Quantidade de substrato (g)	Quantidade de Biochar (g)	Concentração de biochar (g/L)
1	175	4,1405	0	0
2	175	4,1411	0	0
3	175	4,1444	3,5016	10
4	175	4,1417	3,5021	10
5	175	4,1399	7,0008	20
6	175	4,1474	6,9994	20

Tabela 1: Configuração dos reatores.

Após a adição de todos os componentes, fez-se uma leve agitação manual, e mediu-se o pH de todos os sistemas, empregando um phmetro.

Após verificação do pH, os reatores foram montados e fechados.

Na sequência, os biodigestores foram dispostos em estufa à temperatura constante de 37°C (temperatura na faixa mesofílica) (Figura 1).



Figura 1: Biorreatores dispostos na estufa.

A purga nos biodigestores foi feita conforme a quantidade de biogás gerado, podendo ser diária ou a cada dois dias dependendo das etapas do processo. Sempre que os reatores atingiam a marca de 2 bar, fazia-se a purga, deixando-se uma pressão remanescente de 1 bar no sistema, para que a aferição da pressão da produção não fosse afetada e o sistema sofresse o mínimo possível de estresse. Na leitura seguinte, o 1 bar remanescente na última leitura era descontado de forma a não acumular em todas as leituras.

Os volumes medidos foram registrados e utilizados para compor o gráfico de produção de biogás. Assim, foi possível observar o momento onde o platô de estabilidade foi atingido.

O volume do gás foi medido, diariamente, pela leitura da pressão no manômetro acoplado à tampa do biorreator.

Os dados foram inseridos numa planilha preparada pelo autor, onde foi aplicada equação 1 (Lei de Boyle-Mariotte), simplificada por El-Mashad & Zhang (2010), para cálculo da produção de biogás em mL:

$$V_{\text{Biogas}} = \frac{P \cdot V_{\text{head}} \cdot C}{R \cdot T} \quad (1)$$

Onde:

V_{Biogas} = volume diário de produção (L);

P = diferença de pressão absoluta (mbar);

V_{head} = volume do Headspace (L);

C = volume molar (22,41 L.mol⁻¹);

R = constante universal dos gases (83,14 L.mbar.K-1mol⁻¹); e

T = temperatura absoluta (K).

O experimento foi finalizado quando a produção acumulada de biogás atingiu um platô (no 35º dia).

No 35º dia, os reatores foram levados para análise de biogás via cromatografia gasosa no Departamento de Engenharia Química da UFRGS. A análise foi realizada em cromatógrafo gasoso GC2014 Shimadzu, equipado com detector de condutividade térmica (TCD) e coluna ShinCarbon (ST 100/120 2m 1mmID 1/16" OD Silico). Hélio foi utilizado como gás de arraste na taxa de 10 ml/min. O injetor e o detector de temperatura foram mantidos em 200 e 250 °C, respectivamente. O programa de temperaturas empregado foi: iniciou-se com 40 °C, por 3 min., após aplicou-se uma rampa de aquecimento (15 °C/min.) até a temperatura de 150 °C, a qual foi mantida até o 11º minuto (tempo final da corrida).

Resultados e Discussão

O rendimento de biochar (Figura 2) produzido foi de aproximadamente 30%.



Figura 2: Biochar produzido.

Micro e mesoporos fornecem um ambiente propício para a imobilização e colonização de várias espécies bacterianas, incluindo as decompositoras. A presença de poros confere ao biochar uma área de superfície específica consideravelmente alta (Bardi et al., 2023). Contudo, não foi possível observar poros no biochar produzido através da MEV realizada (Figura 3).

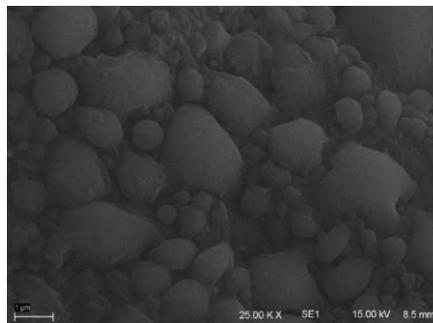


Figura 3: Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do biochar.

Existem alguns motivos pelos quais a microscopia eletrônica de varredura realizada no biochar produzido não ter evidenciado os poros de forma clara. Neste caso, onde a biomassa foi apenas pirolisada sem nenhum processo prévio e/ou posterior - de ativação química -, o biochar gerado pode ter apresentado poros muito pequenos que podiam ser completamente obstruídos por impurezas (resíduos orgânicos e/ou minerais), particulados e cinzas, que são naturalmente gerados no processo de decomposição térmica dos componentes lignocelulósicos.

Existem alguns processos de ativação que podem ser empregados para desobstruir e, inclusive, aumentar o tamanho do poro. Costumam ser bastante empregadas as ativações química e física (ambas com vantagens e desvantagens), e mais recentemente, na literatura, tem-se proposto um novo procedimento baseado no aquecimento do biochar produzido a uma dada temperatura (normalmente mais baixa que o usual na pirólise, como 400 °C), por um tempo também menor (variando entre 5-30 min.), na presença de ar atmosférico, gerando um novo material denominado de biochar funcionalizado por oxidação térmica ao ar. O objetivo deste segundo tratamento é justamente aumentar o número de sítios de adsorção devido ao aumento e à disponibilidade de poros ativos e de grupos superficiais oxigenados (Xiao, 2022; Bardí et al., 2023; Zhao et al. 2021).

Outro motivo pelo qual os poros do biochar não terem sido visualizados pode estar relacionado com o limite de resolução do microscópio, fazendo com que poros de dimensões menores não possam ser detectados. E por fim, poderia-se cogitar a própria preparação da amostra, onde eventuais erros nos procedimentos que precedem a análise poderiam resultar na obstrução dos mesmos, inviabilizando sua visualização.

Para obter uma informação mais detalhada e precisa em relação à porosidade do biochar produzido, recomenda-se empregar conjuntamente outras técnicas de caracterização, como a isoterma BET, capaz de fornecer informações referentes à área superficial e sobre a dispersão, tamanho e volume dos poros existentes em um material. (Muzyka et al. 2023).

O resíduo de alimento que constitui o substrato na DA realizada neste estudo (Figura 4) foi caracterizado frente a uma série de parâmetros que podem ser visualizados na tabela 2.



Figura 4: Resíduo de alimento

Tabela 2: Caracterização do resíduo de alimento

Componente	Este Estudo	Componente	Este Estudo
Umidade	85	Pectina	ND
Solúveis em H ₂ O	40,87 ± 0,27	Lignina Insolúvel	2,77 ± 0,31
Carboidratos Totais	ND	Lipídios	11,78 ± 0,24
Glucano*	66,26 ± 8,10	Proteína	22,85 ± 1,97
Amido	ND	Cinzas	8,63 ± 0,80
Celulose	ND	Extrativos	10,74 ± 0,45
Hemicelulose	ND	* Glucano = celulose e amido	ND = não determinado

O pH medido do lodo foi de 6,6, indicando que o mesmo apresenta-se ligeiramente ácido. O lodo coletado apresentou uma aparência escura e líquida (Figura 5).



Figura 5: Lodo coletado na ETE Serraria.

A Demanda Química de Oxigênio (DQO) é uma medida da quantidade total de matéria orgânica oxidável em uma amostra, expressa em termos de oxigênio. É comumente utilizada como um parâmetro para avaliar a carga orgânica de efluentes industriais ou resíduos biológicos. A DQO do lodo coletado foi de 19.022,0 mg/L O₂, indicando uma quantidade relativamente alta de matéria orgânica passível de ser oxidada porém não necessariamente biodegradada. A medida da DQO é importante para avaliar a quantidade de oxigênio necessário para oxidar quimicamente as substâncias orgânicas presentes na água, por meio de um processo de reação química (Moradi et al. 2023). Uma DQO elevada, como essa, sugere que o lodo pode ser proveniente de fontes industriais ou de processos biológicos com uma carga orgânica significativa (Yang, Zhang & Wang, 2015).

Neste caso, a digestão anaeróbia pode ser uma opção de tratamento adequada. A alta carga orgânica presente no lodo (mas não necessariamente prontamente disponível) pode ser convertida em biogás no processo de digestão anaeróbia, produzindo biometano e reduzindo o potencial poluidor do lodo. A digestão anaeróbia é capaz de reduzir significativamente a DQO do lodo, pois os micro-organismos presentes no processo de digestão consomem parte da matéria orgânica, convertendo-a em gases e subprodutos estáveis (Moradi et al. 2023).

No presente estudo, conseguiu-se realizar apenas uma única batelada de biodigestão entre o resíduo de alimentos e o lodo, com três diferentes dosagens de biochar (0, 10 e 20 g/L), ambos em duplicata. Esta batelada levou 36 dias para atingir a estabilidade (platô). Similarmente, Ning et al. (2023) utilizando 10 g/L de biochar e resíduos com alta carga orgânica, obtiveram uma batelada com ciclo de 30 dias. Os seis sistemas tiveram pH medido (Tabela 3).

Tabela 3: pH dos sistemas antes da biodigestão.

Reator	Concentração de biochar (g/L)	pH
1	0	5,79
2	0	5,70
3	10	6,42
4	10	6,38
5	20	6,68
6	20	6,69

Conforme pode-se constatar, ocorre um leve aumento (mas reprodutível) do pH dos sistemas à medida que aumenta a concentração de biochar, o que pode conferir uma maior estabilidade ao processo.

No primeiro dia, houve produção de uma grande quantidade de gás, conforme descrito na literatura em razão do aumento da temperatura. Este acúmulo inicial foi purgado. Essa alta produção inicial é prioritariamente constituída de gás carbônico (Cernicharo, 2016; Chiappero et al. 2021). Durante as fases iniciais da biodigestão, os micro-organismos presentes no reator estão em processo de adaptação, e é comum que eles produzam uma quantidade significativa de CO₂ (Cernicharo, 2016) quando a aerobiose se estabelece. Portanto, fez-se a purga desse gás acumulado, iniciando o controle do volume gerado de biogás a partir do segundo dia de biodigestão.

Durante o período de digestão, foram identificadas a formação de fases distintas entre o substrato utilizado, o inóculo



e o biochar adicionado ao reator, conforme pode ser observado na figura 20. Essa separação de fases pode ser atribuída às diferentes densidades e composições dos componentes, bem como às interações físico-químicas ocorridas no sistema. A presença do biochar pode ter contribuído também para a formação dessas fases, uma vez que sua adição pode influenciar as propriedades físicas e a estrutura do material no reator.

Constatou-se que alguns biorreatores apresentaram uma redução na pressão durante o período de digestão. Isso pode ser decorrente de diversos fatores, e pode indicar, inclusive, a ocorrência de vazamentos nos referidos biorreatores, prejudicando a eficiência do processo. Apesar das instabilidades encontradas, um ciclo de 36 dias para a co-biodigestão anaeróbia do sistema estudado é um indicativo positivo de que a matéria orgânica presente foi suficiente para sustentar a atividade microbiana ao longo desse período. Ademais, é necessário investigar e solucionar as instabilidades identificadas, como os vazamentos, a fim de melhorar a eficiência do sistema e a confiabilidade dos resultados obtidos.

A instabilidade do processo da digestão anaeróbia é um desafio a ser superado e sempre é citada nos estudos visando a melhoria do sistema. A variação significativa na produção diária de biogás observada durante a batelada de co-biodigestão denota o comportamento de sistemas onde há variação cíclica nas condições do sistema, neste caso ora pressurizado, ora com a pressão aliviada. A produção “negativa” faz referência aos vazamentos do sistema. Conforme pode-se observar na figura 6, essa instabilidade é um ponto problemático comum no processo e pode resultar em flutuações na produção de biogás ao longo do tempo.

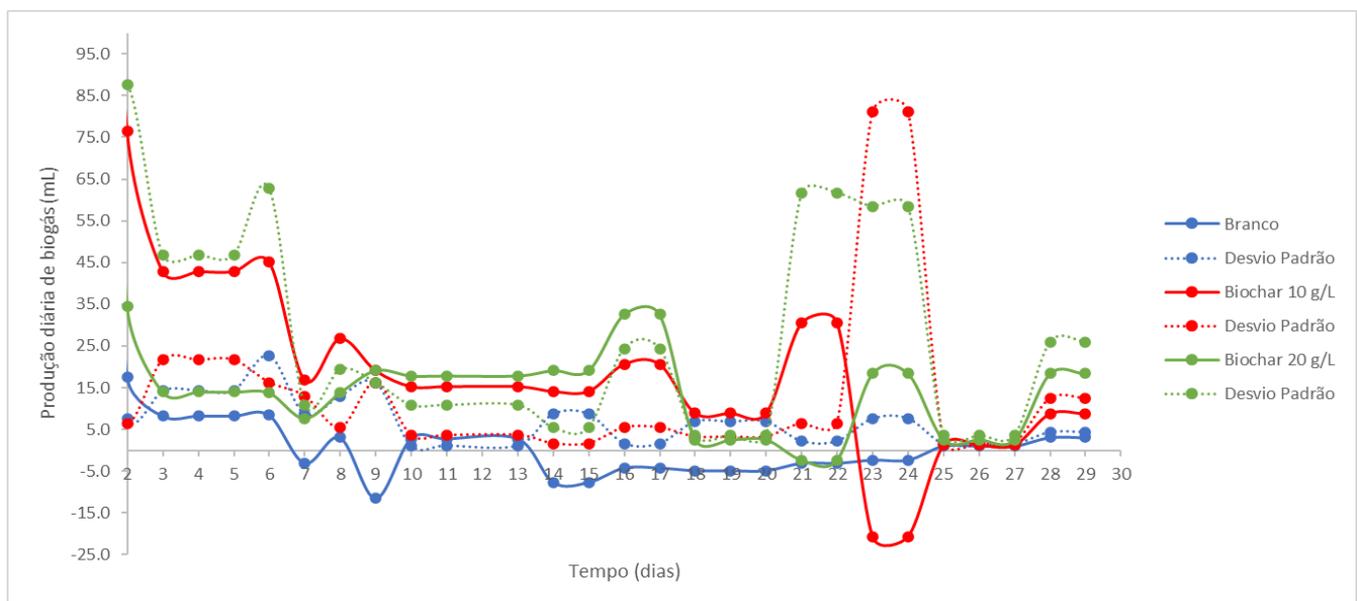


Figura 6: Produção diária de biogás.

Vários fatores podem contribuir para a instabilidade do processo de biodigestão anaeróbia. Um dos principais é a composição e o balanço dos substratos alimentados no biorreator. A relação entre os diferentes resíduos orgânicos (lodo e resíduos de alimentos) pode afetar a atividade microbiana e a produção de biogás. Variações na proporção desses substratos ao longo do tempo podem levar a flutuações na produção de biogás diária. Além disso, o pH e a temperatura são parâmetros críticos que podem influenciar a estabilidade do processo. Por mais que a temperatura tenha sido controlada e o pH estabilizado com a adição de biochar, qualquer alteração significativa desses parâmetros pode afetar negativamente e comprometer a atividade dos micro-organismos e, conseqüentemente, a produção de biogás.

A presença de inibidores ou compostos tóxicos nos resíduos alimentares e no lodo já foi relatada como um fator para a instabilidade do processo. Essas substâncias podem afetar a atividade microbiana e reduzir a eficiência do processo de digestão anaeróbia, resultando em variações na produção de biogás (Chiappero et al., 2021; Franke-Whittle et al., 2014).

A produção de biogás foi nitidamente acentuada pela adição de biochar, conforme pode-se observar na tabela 4, que apresenta os valores de produção total.

Reator	Concentração de Biochar (g/L)	Produção total de biogás (mL)
1 e 2	0	248,94
2 e 3	10	785,28
4 e 5	20	799,60

Tabela 4: Acumulado de biogás



As amostras contendo biochar (10 g/L e 20 g/L) apresentaram uma produção de biogás três vezes maior em comparação às amostras controle (sem adição de biochar). Esse aumento significativo na produção de biogás sugere que a adição de biochar pode ter promovido condições mais favoráveis para a atividade microbiana e a decomposição da matéria orgânica no processo de biodigestão anaeróbia.

A melhoria na produção de biogás nos sistemas onde o biochar foi adicionado pode ser atribuída a diversos fatores já citados, referentes às características deste material. Embora não tenha sido possível visualizar a estrutura porosa do biochar, houve um nítido aumento na eficiência da decomposição da matéria orgânica, o que pode corroborar com a possível existência de uma rede porosa não identificada na análise de MEV.

O uso de biochar na produção de biogás trouxe benefícios ao processo de co-biodigestão do sistema estudado, pois aumentou a área superficial disponível para os micro-organismos metanogênicos se aderirem e colonizarem, favorecendo a atividade microbiana, e contribuiu para o aumento da estabilidade do processo de biodigestão, melhorando a eficiência da degradação dos substratos orgânicos e, assim, aumentando a produção de biogás. Outra observação importante foi o fato dos reatores que receberam adição de biochar apresentarem um acumulado de biogás muito similar (Figura 7).

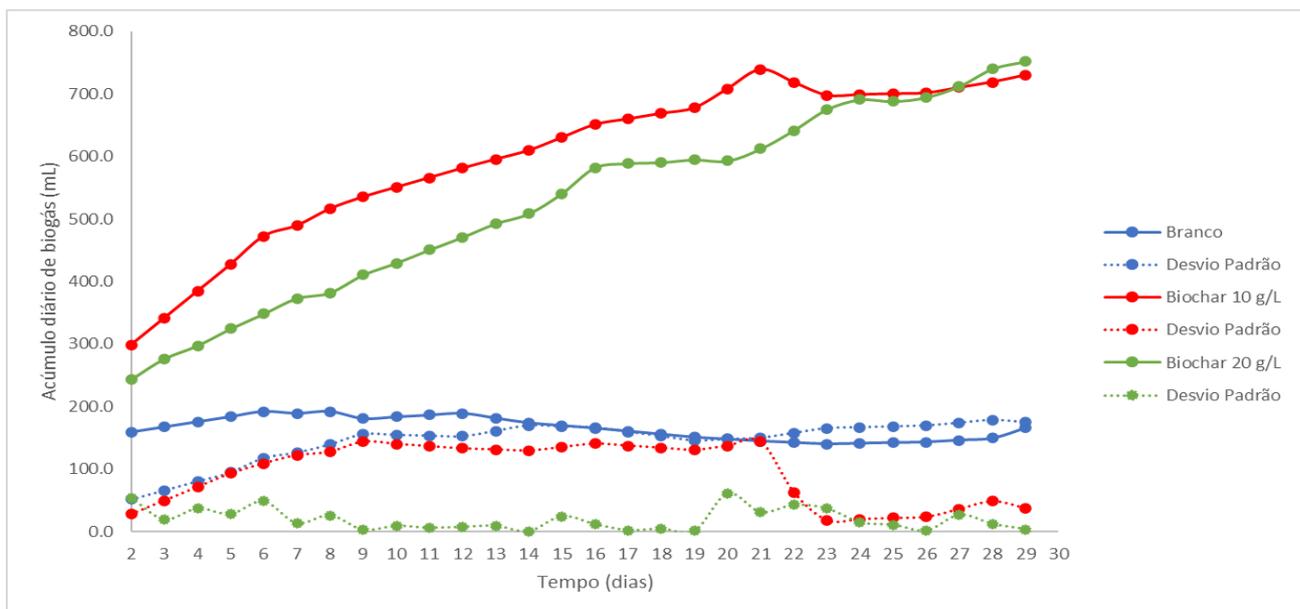


Figura 7: Produção acumulada de biogás.

Essa similaridade pode ser atribuída a diversos fatores, incluindo: i) à saturação do biochar, onde sua capacidade de adsorção de nutrientes ou gases pode ter sido alcançada independentemente da quantidade adicionada; ii) a porosidade do biochar pode ser heterogênea, o que significa que a quantidade de poros disponíveis pode ser a mesma independente da concentração empregada de, iii) composição do substrato, atividade microbiana, temperatura e pH, também podem influenciar a produção de biogás, superando o efeito da quantidade de biochar adicionado, e iv) o intervalo de tempo na leitura da pressão não tenha sido suficiente para mostrar diferenças significativas, considerando que o efeito do biochar na produção de biogás possa levar mais tempo para ser detectado.

Os resultados obtidos sugerem que a adição de biochar pode ser uma estratégia viável para melhorar a produção de biogás em processos de co-biodigestão similares ao estudado neste trabalho. Além disso, para as dosagens de biochar empregadas no sistema estudado, os resultados demonstram uma possível inexistência de relação dosagem-resposta em termos de volume total. O que não ocorreu na relação de produção de metano. A produção de metano foi melhorada significativamente com a adição de biochar. Conforme dados apresentados na tabela 5, a produção média de metano após 35 dias de co-digestão para os sistemas sem adição de biochar foi de 33,51%, enquanto que para os sistemas com 10 g/L de biochar foi de 50,73% e para o sistema com 20 g/L de biochar foi de 63,71%.

O resultado obtido comprova que o biochar influencia a composição do biogás produzido.

O biochar é conhecido por sua capacidade de adsorver compostos orgânicos e inorgânicos, além de reduzir a presença de inibidores e substâncias tóxicas no processo de biodigestão anaeróbia. Essas propriedades podem ter contribuído para a melhoria do ambiente dentro dos biorreatores, favorecendo a atividade dos micro-organismos metanogênicos responsáveis pela produção de metano. O biochar também pode ter um efeito de neutralização sobre o pH do sistema, o que pode ter mitigado as variações significativas de pH que podem inibir a atividade dos microrganismos metanogênicos.



Tabela 5: Qualidade do biogás produzido após 35 dias de co-biodigestão.

Reator	[Biochar] (g/L)	[O ₂] (%)	[N ₂] (%)	[CH ₄] (%)	[CO ₂] (%)
1	0	0,11	18,39	31,55	49,93
2	0	0,09	12,12	35,46	52,31
3	10	0,11	16,91	47,33	35,64
4	10	0,13	5,00	54,13	40,72
5	20	NA	NA	NA	NA
6	20	0,11	2,18	63,71	33,97

Os resultados são positivos quando comparados aos da literatura. Kaur et al. (2020) utilizaram uma dosagem de 10 g/L de biochar produzido a partir da palha de trigo na co-digestão de lodo de esgoto e resíduos de alimentos, e obtiveram um aumento de 24% na produção de metano. Lu et al. (2016) utilizaram glicose na DA e 10 g/L de biochar, obtendo aumento de 18% na produção de metano. Shen et al. (2015) produziram biochar a partir da palha do milho e aplicaram (3,64 g/g de sólidos totais) na DA de lodo de esgoto, obtendo um aumento de 7% na produção de metano (Bardi et al. 2023).

Ainda, Luo et al. (2015) estudaram a DA a 35°C, usando glicose como substrato e adicionaram biochar obtido de madeiras frutíferas submetido à pirólise a 800 °C. O resultado mostrou que o biochar encurtou a fase lag metanogênica, e a taxa máxima de produção de metano foi elevada em 86,6%. Ademais, em relação a este trabalho e às bibliografias complementares, percebe-se que eficiência na produção de metano depende de diversos fatores tanto referentes ao biochar adicionado quanto aos componentes e condições empregados no processo de co-digestão anaeróbia. Desta forma, o sistema estudado é passível de sofrer variações nos parâmetros norteadores da DA, a fim de determinar a condição ideal para a otimização do processo.

Conclusões

Duas concentrações de biochar foram adicionadas na digestão anaeróbia de dois resíduos orgânicos, objetivando melhorar a eficiência da produção de metano e, por consequência, a eficiência do processo. A adição de biochar promoveu uma maior capacidade na produção de biogás em relação ao sistema controle (sem a adição de biochar). Contudo, entre as dosagens empregadas de biochar (10 e 20 g/L), não foi detectada uma relação significativa entre a dosagem de biochar e o volume de biogás produzido. Por outro lado, a adição de biochar aumentou a quantidade de metano conforme avaliado pela análise cromatográfica. O sistema com maior concentração de biochar obteve o melhor acúmulo de metano (cerca de 63,7%) em relação ao sistema controle/ sem adição de biochar (cerca de 33,5%). A adição de biochar em sistemas de co-biodigestão, conforme avaliado neste estudo, pode melhorar a eficiência na conversão de resíduos orgânicos, altamente disponíveis e nocivos ao ser humano e meio ambiente, em produtos de maior valor agregado (biogás enriquecido em metano, com elevado poder energético, e em biofertilizante passível de emprego na agricultura).

Referências Bibliográficas

- Andreoli, C. Aproveitamento do Lodo Gerado em Estações de Tratamento de Água e Esgotos Sanitários, incluindo a Utilização de Técnicas Consorciadas com Resíduos Sólidos Urbanos. 1. ed. Rio de Janeiro: RiMa – ABES. 2001.
- Andreoli, C.; Von Sperling, M; Fernandes, F. Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Curitiba - PR: Sanepar. 2001.
- Apelt, M. et al. Coleção de Métodos de Medição de Biogás – Métodos para determinação de parâmetros para fins de análise e parâmetros que descrevem processos no setor de biogás. 2016.
- Bardi, M. et al. Effect of pyrolysis temperature on the physiochemical properties of biochar and its potential use in anaerobic digestion: A critical review. Environmental Technology & Innovation, Volume 32, 103349. 2023.
- Brasil. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 15 de junho de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre>>. Acesso em 02 jun.2023.
- Brasil. Serviço Nacional de Informações de Saneamento. Informações para o planejar o Esgotamento Sanitário: Diagnóstico SNIS-AE 2019. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/downloads/cadernos/2019/do_snis_ao_sinisa_esgoto_snis_2019>. Acesso em: 01 maio 2023.
- Cernicharo, C. Reatores anaeróbios. 2. ed. Belo Horizonte, Minas Gerais: DESA – UFMG. 2016.
- Chiappero, M. et al. Analysis of the influence of activated biochar properties on methane production from anaerobic digestion



of waste activated sludge. n. 150, 9. 2021. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953421001665>>. Acesso em: 18 mar. 2023.

De Abreu, I. Produção de Bioetanol com Resíduos de Alimentos: Avaliação de hidrólise ácida, enzimática, e fermentação com diferentes leveduras. Dissertação de mestrado. UFPE, Recife. 2022.

Deena, S. et al. Enhanced biogas production from food waste and activated sludge using advanced techniques – A review, n. 355, p. 15. 2022.

El-Mashad, H; Zhang, R. Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste. Bioresource Technology, vol. 101, p. 4021-4028. 2010.

Franke-Whittle, I. et al. Changes in the microbial communities during co-composting of digestates, n. 34, p. 10. 2014.

IBGE. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. Relatório 2017. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101734.pdf>>. Acesso em: 13 mar. 2023.

Kumar, M. et al. A critical review on biochar for enhancing biogas production from anaerobic digestion of food waste and sludge, n. 305, p. 23. 2021.

Luo, C. et al. Application of eco-compatible biochar in anaerobic digestion to relieve acid stress and promote the selective colonization of functional microbes. Water Res, 68:710–8. 2015.

Liu, H. et al. Enhancing thermophilic anaerobic codigestion of sewage sludge and food waste with biogas residue biochar, n. 188, p. 11. 2022.

Ning, X. et al. Improving biomethane production from biochar-supplemented two-stage anaerobic digestion of on-farm feedstocks. Journal of Cleaner Production, Volume 423, 138723. 2023.

ONU. Índice de desperdício alimentar. Relatório 2021. Disponível em: <<https://encurtador.com.br/pLMY0>>. Acesso em 18 jan. 2023.

Xiao, F. A review of biochar functionalized by thermal air oxidation. Environmental Functional Materials, 187-195. 2022.

Yang, G; Zhang, G; Wang, H. Current state of sludge production, management, treatment and disposal in China. Water Research, Voume 4, n 002. 2015.

Zhang, P. et al. Biorefinery-oriented full utilization of food waste and sewage sludge by integrating anaerobic digestion and combustion: Synergistic enhancement and energy evaluation. Journal of Cleaner Production, vol. 380. 2022.

Zhao, W. et al. A review of biochar in anaerobic digestion to improve biogas production: Performances, mechanisms and economic assessments, n. 341, p. 12. 2021.



REUTILIZAÇÃO DE BATERIAS DE NOTEBOOK PARA APLICAÇÃO EM SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF-GRID: UM ESTUDO DE CASO

1Thiago de Almeida Baziotti, 2Daniel Juliano Pamplona da Silva, 3Icaro Hissao Rocha Mandai

1 Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), e-mail: thiago.baziotti@unifal-mg.edu.br; 2 UNIFAL-MG, e-mail: daniel.silva@unifal-mg.edu.br; 3 UNIFAL-MG, e-mail: icaro.mandai@unifal-mg.edu.br

Palavras-chave: Células 18650; Autônomo; Reutilização de baterias.

Resumo

Este estudo aborda a reutilização de células de baterias de notebook em sistemas fotovoltaicos off-grid, com foco na viabilidade econômica e ambiental dessa prática. O critério de seleção baseado na capacidade de carga das células ($C_{cel} \geq 2000$ mAh) foi demonstrado como robusto, permitindo a utilização eficiente dessas células em baterias para sistemas off-grid. A análise de custo envolveu a comparação entre a montagem de baterias com células reutilizadas e células novas, destacando a acessibilidade econômica da primeira opção. Além disso, a descoberta de que cerca de metade das células condenadas pelos usuários de notebooks ainda são utilizáveis ressalta não apenas o valor ambiental, mas também a sustentabilidade dessa prática.

O estudo também enfatiza a importância de considerar o ciclo completo de vida dos materiais utilizados em sistemas fotovoltaicos off-grid, visando uma abordagem mais sustentável e eficiente. A inclusão de células reutilizadas não apenas reduz custos, mas também contribui para a redução de resíduos eletrônicos e o aproveitamento de recursos já disponíveis no mercado.

Os resultados apresentados neste estudo fornecem insights valiosos para a implementação de sistemas fotovoltaicos off-grid utilizando células de baterias de notebook reutilizadas. As implicações econômicas, ambientais e técnicas são discutidas em detalhes, abrindo caminho para futuras pesquisas e desenvolvimentos nessa área. A reutilização de células de baterias de notebook emerge como uma solução promissora para tornar os sistemas fotovoltaicos off-grid mais acessíveis e sustentáveis, alinhados com os princípios de economia circular e uso eficiente de recursos.

Introdução

No mundo contemporâneo, a conscientização sobre a finitude dos recursos naturais é generalizada. Diante da demanda crescente por energia, a busca por alternativas sustentáveis se tornou crucial (HEATH et al., 2022). A coexistência equilibrada entre exploração humana e preservação dos recursos é fundamental para a sustentabilidade.

A necessidade de coesão com o desenvolvimento sustentável está entre os principais desafios na busca por meios alternativos de obtenção de energia. Uma das formas de energia renovável mais proeminentes atualmente é a energia fotovoltaica (FV), dada a abundância da fonte. Ela é caracterizada pela captação de energia através da incidência de raios de luz em painéis fotovoltaicos. Assim como qualquer outro método de produção de energia, um dos principais obstáculos para o seu desenvolvimento e aplicação são questões econômicas. Deve-se observar que, atualmente, aspectos econômicos e tecnologias verdes são cada vez mais um fator decisivo nas negociações no cenário global (DANTAS, 2014).

Uma barreira econômica para o uso da energia solar está ligada à especificidade de sua produção, ou seja, sua captação exclusiva durante o dia e mais intensa em dias ensolarados e sem nuvens. Assim, é impossível que a matriz energética de uma região seja exclusivamente solar sem armazenamento ou interrupção no fornecimento. Portanto, a solução para o uso efetivo da energia fotovoltaica envolve armazenar ou fornecer uma fonte complementar, como a energia hidrelétrica (CAZZANIGA et al., 2019), e transferir a produção excedente. Essas características determinam o tipo de instalação fotovoltaica.

A produção de energia fotovoltaica é dividida em dois tipos: sistemas *on-grid* e *off-grid*, havendo também sistemas híbridos (BASARAN; CETIN; BOREKCI, 2017). Cada tipo é caracterizado pela distribuição e armazenamento de eletricidade. Sistemas *on-grid* não armazenam energia, enviando o excedente para a rede de distribuição e gerando créditos para uso futuro. Já os sistemas *off-grid*, ou autônomos, armazenam o excedente em baterias para uso em períodos sem luz ou com geração reduzida. Esses sistemas não estão conectados à rede de distribuição (FALK et al., 2020) e as baterias também atuam como reguladores de energia, compensando variações na produção, como quando há nuvens bloqueando parte da luz solar.

Neste artigo, foram realizadas investigações sobre a montagem sistemática e operação de uma bateria para aplicação em um sistema autônomo hipotético. Atualmente, existem vários tipos de dispositivos de armazenamento, cada um com composição e função diferentes. No entanto, nosso foco está nas baterias de íon de lítio, também conhecidas como LIBs, acrônimo derivado de Baterias de Íon de Lítio (FALK et al., 2020). Isso se deve ao fato de que as baterias de lítio têm a maior densidade de armazenamento de energia entre as baterias atualmente disponíveis no mercado. Técnicas para o avanço das baterias de lítio usando os mais diversos materiais e procedimentos para a construção de seus eletrodos são de grande interesse na literatura atual (MURALIDHARAN et al., 2020). A vantagem das LIBs é sua ampla aplicação em muitos equipamentos, como baterias de notebooks, o que possibilita obtê-las em grande escala junto às empresas de reciclagem de resíduos eletrônicos. Mais especificamente, a LIB abordada neste estudo consistiu em um conjunto de várias células 18650.



É essencial primeiro definir a composição de uma bateria e diferenciá-la de uma célula. Tipicamente, a menor unidade de carga em uma bateria é uma célula. Neste projeto, foram utilizadas células 18650, ou seja, células cilíndricas com diâmetro de 18 mm e comprimento axial de 65 mm. Considerando o contexto dessas células, este trabalho busca desenvolver um método que permita a reutilização de células 18650 extraídas de baterias de notebook para alimentar um sistema fotovoltaico *off-grid*, buscando analisar os principais fatores que sustentam o uso de tais células.

Com o avanço da internet, o acesso a materiais instrutivos em diversos nichos, tanto científicos quanto não científicos, tornou-se comum. No entanto, muitos desses recursos carecem de uma base teórica sólida, sendo predominantemente práticos. Um estudo sistemático desses materiais poderia resultar em uma importante contribuição científica. Um exemplo disso é a aplicação e técnicas relacionadas ao uso de células 18650, amplamente disponíveis em plataformas de comércio eletrônico e vídeos online. No entanto, a falta de dados detalhados e a formalização dos procedimentos destacam a necessidade de estudos que documentem e validem essas práticas.

Considerando a reutilização, o fato de dar uma "segunda vida" a esses dispositivos, além de reduzir os custos para sua aplicação, também destaca sua importância ambiental por dois motivos principais. Primeiramente, isso resultará em uma diminuição do descarte de materiais (ISLAM et al., 2022) potencialmente prejudiciais ao meio ambiente. Em segundo lugar, esses dispositivos podem ser aplicados como meios de armazenamento para a energia gerada a partir de fontes renováveis.

O processo de descarte de células e baterias abrange desde o local apropriado para o descarte inicial até o destino final dos resíduos. Isso inclui regulamentações atuais referentes ao procedimento em questão. No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2023) regulamenta o descarte final de dispositivos acumuladores de energia. No Artigo 22, o Conselho determina as formas inadequadas de descarte final, ou seja, lançamento e/ou queima a céu aberto, sem equipamentos devidamente licenciados, e lançamento em corpos d'água ou locais suscetíveis a enchentes. Embora o descarte seja estabelecido por lei, é um procedimento que ainda encontra obstáculos diversos, tanto em termos de descarte adequado quanto no número de locais especializados que extraem e utilizam elementos internos das células. Isso demonstra que a reutilização de células pode proporcionar uma extensão de vida significativa e útil para esses dispositivos, permitindo a redução de seu descarte, sobretudo inapropriado. Segundo Chen e Shen, três razões apoiam a reutilização, sendo elas:

- Escassez de locais dedicados à recuperação de elementos de células;
- O custo para recuperar os elementos das células é mais alto do que o de obtê-los ou minerá-los;
- Quando as células são marcadas para destruição, elas não são selecionadas, resultando na perda tanto das unidades reutilizáveis quanto das que não podem ser reutilizadas.

O objetivo deste trabalho é estudar a reutilização específica de células de baterias de notebook, dada a abundância desse material, a facilidade de encontrar esses itens em empresas de resíduos eletrônicos e, conseqüentemente, a padronização do custo dessas baterias.

Dimensionamento Teórico da Bateria

O objetivo do dimensionamento de baterias é estabelecer seu tamanho ideal para a aplicação desejada. Por exemplo, para uma bateria em uma ferramenta portátil, como uma furadeira, a bateria deve ser igualmente portátil para evitar comprometer a ergonomia do dispositivo. Simultaneamente, a bateria deve fornecer energia suficiente para operar aparelhos elétricos. A bateria de um carro segue a mesma regra, mas deve ser muito maior, pois não precisa ser operada com as mãos, mas sim transportada pelo carro. Também precisa fornecer muito mais energia do que a necessária para operar uma furadeira à bateria.

Neste artigo, vamos dimensionar o tamanho mínimo de uma bateria para armazenar a energia "gerada" em um sistema fotovoltaico residencial. Em uma casa, não é necessário haver uma bateria portátil, então o tamanho máximo da bateria não será considerado, assumindo que não temos limitações de espaço para armazenamento, já que as dimensões de uma bateria são muito menores do que as de uma casa.

Para determinar o tamanho mínimo da bateria, devemos considerar duas variáveis: a potência máxima (P_{max}) que a bateria deve fornecer e o tempo (t) que a bateria deve suportar a residência em questão (autonomia da bateria). A autonomia da bateria sem recarga é diretamente proporcional à carga que a bateria (C_{bat}) é capaz de armazenar; portanto, podemos concentrar nossos esforços em encontrar uma dessas duas variáveis.

Vamos começar com a potência máxima que a bateria precisa fornecer, pois a insuficiência desse parâmetro torna impossível o uso da bateria, mesmo que por um curto período de tempo. Para fornecer P_{max} , uma bateria trabalhando com a voltagem U_{bat} deve fornecer a corrente máxima I_{max} que satisfaça a Eq. (1).

$$I_{max} = \frac{P_{max}}{U_{bat}} \quad (1)$$

A bateria é composta por um conjunto de pacotes. Cada pacote é um grupo de células formado por n_p células conectadas em paralelo. Ao montar a bateria, o número de agrupamentos n_s - vide Figura (1) - deve ser considerado. Isso indica a forma construtiva do dispositivo, incluindo sua nomenclatura comercial. Um exemplo da montagem é mostrado na Figura (1). Pode ser encontrado em sites de comércio eletrônico sob a nomenclatura 4S5P.

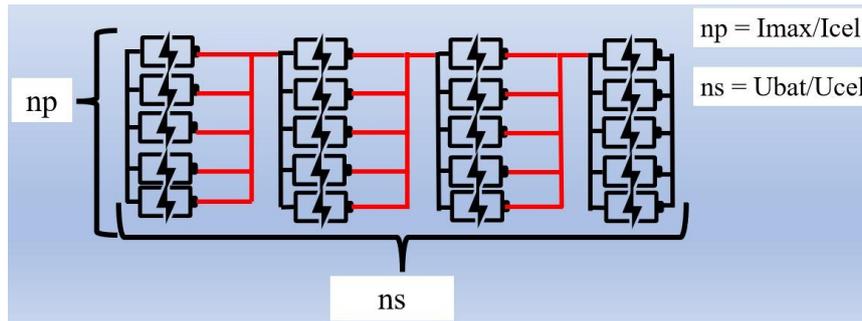


Figura 1: Esquema de montagem de pacotes e células

Um pacote é caracterizado por células conectadas em paralelo. Em uma conexão de células em paralelo, as correntes individuais das células (I_{cel}) são somadas, resultando em I_{max} , e a voltagem de cada célula (U_{cel}) é a mesma. Portanto, cada agrupamento pode ser considerado como tendo a mesma voltagem de uma única célula (U_{cel}), e seu valor de corrente depende do número de células contidas no pacote. Para fins de padronização e estruturação, uma bateria é considerada como um conjunto de pacotes conectados em série. Portanto, o número de pacotes corresponde à razão entre a voltagem da bateria (U_{bat}) e a voltagem individual de cada célula. Em termos das variáveis, obtemos:

$$n_s = \frac{U_{bat}}{U_{cel}} \quad (2)$$

$$n_p = \frac{I_{max}}{I_{cel}} \quad (3)$$

Estritamente falando, n_s e n_p precisam ser números inteiros porque não há fração de célula; portanto, ao montar uma bateria, os valores de n_s e n_p nas Equações (2) e (3) devem ser arredondados para obter números inteiros para a construção da bateria sem desvirtuar seu dimensionamento. Substituindo a Eq. (1) na Eq. (3), obtemos:

$$n_p = \frac{P_{max}}{U_{bat} \times I_{cel}} \quad (4)$$

O número total de células (n_{cel}) necessário para construir uma bateria é dado pelo produto do número n_p de células em cada pacote e o número de pacotes, n_s :

$$n_{cel} = n_s \times n_p \quad (5)$$

A variável n_{cel} é um fator determinante que define a maior parte do custo total do dispositivo em questão. Substituindo as Equações (2) e (4) na Equação (5), obtemos:

$$n_{cel} = \frac{P_{max}}{U_{cel} \times I_{cel}} \quad (6)$$

A Eq. (6) fornece o resultado esperado porque seu denominador representa a potência que uma única célula pode fornecer para a bateria desejada; assim, o número desejado de células é a razão entre a potência máxima esperada e a potência individual de cada célula. O valor de um lote de baterias de notebook, v_{lot} , é dado por:

$$v_{lot} = n_{lot} \times v_{bat} \quad (7)$$

A variável n_{lot} é o número de baterias de notebook neste lote, e v_{bat} é o valor de cada uma destas baterias. Supondo que este lote seja uma amostra estatística significativa para futuras aquisições de novos lotes, podemos extrair o número médio de células aprovadas para reutilização por bateria (n_{cab}) de um lote genérico da seguinte forma:

$$n_{cab} = \frac{n_{ca}}{n_{lot}} \quad (8)$$

Onde n_{ca} é o número total de células aprovadas para uma segunda vida em todo o lote de n_{lot} baterias. O valor de cada célula aprovada (v_{ca}) é dado por:

$$v_{ca} = \frac{v_{lot}}{n_{ca}} \quad (9)$$



Para encontrar o número total de células necessárias para construir a bateria desejada (v_{tot}), simplesmente multiplicamos o número de células desejadas n_{cel} da Eq. (6) pelo valor de cada célula aprovada v_{ca} da Eq. (9), obtendo:

$$v_{tot} = \frac{P_{max} \times v_{lot}}{U_{cel} \times I_{cel} \times n_{ca}} \quad (10)$$

Outro valor útil é o número total de baterias (n_{tot}) a serem compradas para que o número desejado de células possa ser extraído, o que é suficiente para dividir o número total de células da Eq. (6) pelo número de células aprovadas por bateria da Eq. (8), obtendo:

$$n_{tot} = \frac{P_{max} \times n_{lot}}{U_{cel} \times I_{cel} \times n_{ca}} \quad (11)$$

Alternativamente, podemos reescrever as Equações (10) e (11) como funções do valor de cada bateria de notebook, para futuras aquisições, pois pode haver mudanças no preço destas baterias. A Figura (2) mostra um fluxograma das variáveis anteriormente apresentadas, onde traços verticais pretos simbolizam divisões, traços horizontais pretos simbolizam multiplicação e traços vermelhos simbolizam igualdade.

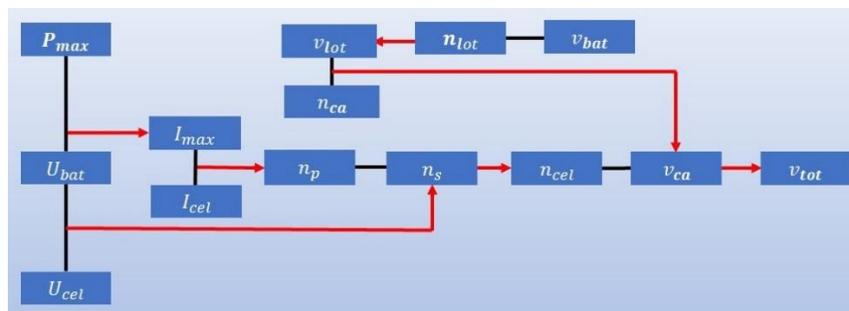


Figura 2: Esquema gráfico do modelo matemático para dimensionamento da bateria

Como mencionado anteriormente, a corrente aumenta em conexões paralelas. Como a corrente é a taxa de variação de carga com relação ao tempo, neste tipo de conexão, as cargas também são somadas, de modo que a carga total da bateria (C_{bat}) é o produto do número de células em paralelo (n_p) pela carga de cada célula (C_{cel}). Representando esse produto com o n_p dado pela Eq. (4), obtemos:

$$C_{bat} = \frac{P_{max}}{U_{bat} \times I_{cel}} \times C_{cel} \quad (12)$$

A partir da física básica, sabemos que a energia (potencial) armazenada em uma bateria (E_{bat}) é o produto da carga armazenada na bateria (C_{bat}) pela diferença de potencial (U_{bat}) da bateria (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2006). Ao usar a expressão para C_{bat} dada na Eq. (12), o produto pode ser convenientemente escrito da seguinte forma:

$$E_{bat} = \frac{P_{max} \times C_{cel}}{I_{cel}} \quad (13)$$

Materiais e Métodos

O trabalho começou com a compra de um lote de baterias de laptop de uma empresa de resíduos eletrônicos. A Figura (3) mostra um exemplo deste lote de baterias antes da intervenção.



Figura 3: Bateria de notebook como foi descartada, sem qualquer intervenção

Para extrair as células 18650, foi necessário desmontar o estojo da bateria, conforme mostrado na Figura (3), que possui um conjunto de células conectadas por tiras de níquel em um Sistema de Gerenciamento de Bateria (BMS), como mostrado na Figura (4).



Figura 4: Dentro da bateria na Fig. (3) antes que as células sejam separadas

O próximo passo foi separar as células e lixá-las com uma micro retífica, para eliminar rebarbas. Nesse processo, as células foram pré-selecionadas; aquelas com oxidação, aberturas, vazamentos, corrosão ou outros danos estruturais foram separadas para um descarte adequado. Após a seleção, as células que não apresentavam danos aparentes foram codificadas em seus corpos para que pudessem ser individualizadas e facilmente identificadas como provenientes da mesma bateria, se isso fosse relevante na análise dos dados. Outros dados foram coletados em uma planilha eletrônica associada ao código anotado no corpo da célula. Na Figura (5), as células 18650 podem ser vistas neste processo de catalogação.



Figura 5: Baterias de células sendo separadas e catalogadas após o desmonte e tratamento das baterias de notebook

Após a catalogação, com a ajuda de um carregador inteligente LiitoKala Engineer LII-500, mostrado na Figura (6), foi realizada uma seleção definitiva de células com base nos dados coletados, conforme mostrado na Tabela (1). O LII-500 pode carregar até quatro unidades simultaneamente - vide a Fig. (6) - onde os testes são independentes; ou seja, segundo o fabricante, não há interferência de um teste de determinada célula devido à presença ou ausência de outras no dispositivo.



Figura 6: Carregador inteligente LiitoKala Engineer LII-500 testando um conjunto de células

O procedimento para testar cada célula com o LiitoKala Engineer LII-500 consistiu em:

FastTest: carga total da célula, com registro da quantidade de carga e tempo (**tempo de carga**) para este processo. Antes de realizar o processo de carga, o dispositivo descarrega automaticamente cada unidade para eliminar possíveis cargas residuais presentes nas células.

NorTest: descarga total da célula, com registro da quantidade de carga fornecida pela célula ao dispositivo e o tempo (**tempo de descarga**) necessário para essa descarga.

O dispositivo também mede um parâmetro que avalia a resistência dinâmica da célula (mR). Embora o fabricante não informe a unidade dessa medida, ela pode ser usada como um parâmetro de comparação entre as células; ou seja, quanto menor a resistência, maior a qualidade da célula. Esse parâmetro foi registrado para a célula completamente descarregada (**mRFast**) e para a célula totalmente carregada (**mRNor**). A Tabela (1) resume os dados coletados, organizados por categoria.



Tabela 1: Lista de dados coletados, grupos pertencentes e descrições

Item	Dados Coletados	Categoria	Descrição
I	NorTest	quantidade de carga	Quantidade de carga fornecida pela célula durante o processo de descarga completa.
II	FastTest		Quantidade de carga recebida pela célula durante o processo de carga completa
III	Tempo de Carga	tempo de teste	Tempo decorrido para um FastTest.
IV	Tempo de Descarga		Tempo decorrido para um NorTest.
V	mRNor	resistência dinâmica	Parâmetro que avalia a resistência dinâmica interna da célula quando totalmente carregada.
VI	mRFast		Parâmetro que avalia a resistência dinâmica interna da célula quando totalmente descarregada.

Os critérios quantitativos para a seleção das células foram os seguintes:

1. Carga mínima: se a carga de uma célula específica (C_{cel}) fosse inferior a 2000 mAh, a célula era descartada. Essa escolha foi baseada na maioria das células 18650 encontradas no mercado. Células novas com capacidades de carga superiores a 2200 mAh são consideradas muito boas e geralmente são mais caras que a média. Portanto, uma unidade usada que mantém 2000 mAh perdeu, em média, aproximadamente 10% de sua capacidade de carga em comparação com uma célula nova muito boa.
2. Capacidade de manter a carga quando isolada: a célula não deve descarregar espontaneamente. Todas as células aprovadas perderam menos de 5% de carga após 30 dias.
3. Temperatura: células que foram superaquecidas (acima de 50 °C) durante os processos de carga ou descarga foram descartadas. Esse descarte, além de eficiência, proporciona segurança e minimiza os riscos na montagem e teste da bateria, pois essas células podem se degradar (KONG et al., 2018).

Uma vez que todos esses fatores são atendidos, a célula pode ser selecionada para compor a bateria. Os testes foram realizados com uma corrente de carga contínua de 500 mA e uma corrente de descarga contínua de 250 mA. No entanto, consultando as fichas técnicas de várias células 18650 - vide Tabela (2) - o valor mais baixo encontrado para a corrente de operação (padrão) foi de 440 mA e até essas células suportavam uma corrente máxima de pelo menos 2200 mA. Logo, não é exagero acreditar que a corrente máxima de 500 mA nos daria uma ampla margem de segurança, porque em uma aplicação residencial, a corrente consumida seria menor do que o máximo na maior parte do tempo, visto que é pouco provável manter ligados todos os equipamentos elétricos da residência simultaneamente.

Tabela 2: Comparação de capacidade, corrente e valores de taxa C para diferentes marcas de células

Marca	Modelo	Corrente de carga (mA)	Carga nominal (mAh)	Corrente de descarga (mA)
Panasonic	NCR18650GA	1475	3300	10000
Samsung	ICR18650 -22P	1075 (padrão); 2150 (rápida)	2000	2150 (padrão); 10000 (máxima com descarga contínua)
Samsung	INR18650-30Q	1500 (padrão); 4000 (máxima)	2700	10000 (máxima com descarga contínua)
EEMB	LIR18650	520 (padrão); 1300 (rápida)	2600	520 (padrão); 1300 (rápida); 2600 ("pulso máximo")
Hunan Sounddon	ICR18650	0.2C5 (padrão); 2200 (máxima)	2200	0.2C5 (nominal); 0.5 C5 (padrão)
Tenergy	30003	0.5C (padrão); 1C (máxima)	2200	0.2C (nominal); 2C (máxima)

Para entender a Tabela (2), é necessário compreender o conceito de taxa C (C-rate). Uma taxa C igual a XC é definida como a taxa de descarga a uma corrente constante de $X \times C_{bat}$, que descarrega completamente a bateria em um tempo de 1/X. Por exemplo, a uma taxa C de 0,2C, uma bateria de 2200 mAh leva 5 horas para descarregar totalmente a uma corrente de 440 mA (MIT, 2008). Preocupações em relação à taxa e técnicas para aumentar as taxas de descarga têm sido estudadas na literatura atual (CUI et al., 2018), porque, com uma taxa de descarga mais alta, é possível ter uma bateria menor na maioria das situações.



Resultados das Células

O lote de baterias analisadas consistia em 138 baterias de notebook adquiridas de uma empresa de resíduos eletrônicos, totalizando R\$ 888,50. O lote foi adquirido em três etapas, visando diminuir vícios de uma determinada remessa adquirida pela empresa. Após o desmonte das baterias, foram extraídas 777 células.

Das 777 células, 396 tinham uma capacidade de carga maior ou igual a 2000 mAh, o que corresponde a 51% do total do lote. Este número refere-se ao número de células aprovadas, pois todas as células que apresentavam $C_{cel} \geq 2000$ mAh também foram aprovadas em todos os outros critérios de seleção.

É comum que os critérios de seleção se sobreponham. Geralmente, células que foram superaquecidas durante o processo de carga não mantinham a carga após serem carregadas, frequentemente apresentavam um tempo de carga excessivo e até mesmo eram abandonadas sem completar o processo de carga, após o dobro do tempo médio que as outras células levavam para carregar completamente.

Tabela 3: Principais resultados do lote de baterias testadas

Grandeza	Variável	Valor
Número de baterias no lote analisado	n_{lot}	138
Valor do lote de baterias analisado	v_{lot}	R\$ 888.50
Número total de células aprovadas no lote	n_{ca}	396

Da mesma forma, a sobreposição de informações positivas na análise dos parâmetros das células aprovadas oferece robustez aos critérios utilizados ($C_{cel} \geq 2000$ mAh) e aumenta a confiabilidade das células aprovadas. Elas apresentaram valores comparáveis para as medições de cada categoria descrita na Tabela (1), a saber:

Quantidade de carga: As células de melhor qualidade mostraram valores semelhantes nos testes FastTest e NorTest. Valores próximos entre essas medições indicam que a carga recebida pela unidade no processo de carregamento não foi perdida devido a efeitos indesejados, como aquecimento, além de ter sido totalmente ou principalmente devolvida pela célula no processo de descarga; ou seja, essa célula se aproximou de um sistema conservador.

Tempo de teste: Proporcionalidade dos valores de tempo de carga e descarga, ou seja, como a célula é carregada com o dobro da corrente de descarga, ela deve levar metade do tempo no processo de carga do que no processo de descarga, mostrando assim que em ambos os regimes, carga e descarga, a célula recebe e fornece a mesma quantidade de carga.

Resistência dinâmica: Este parâmetro é inversamente proporcional à carga da célula e é um valor flutuante. A unidade tem uma maior resistência dinâmica quando descarregada do que quando carregada. Quanto menor o valor, melhor a célula porque possui uma baixa resistência ao fluxo de carga, isto é, à corrente elétrica. As células aprovadas geralmente apresentavam valores de resistência dinâmica mais baixos em comparação com aquelas que foram descartadas.

Aplicação (Estudo de Caso)

O estudo de caso apresentado a seguir parte da criação de uma casa-arquétipo alimentada por sistemas fotovoltaicos *off-grid*, onde um dos componentes fundamentais é a bateria estudada neste artigo. Para idealizar a casa-modelo, inicialmente definimos o número de residentes e os principais dispositivos que uma residência comporta, conforme mostrado na Tabela (4).

Tabela 4: Aspectos considerados para a idealização da casa-arquétipo

Aspecto Considerado	Descrição
Número de moradores	Uma família padrão foi considerada, composta por 4 (quatro) moradores, 2 (dois) adultos e 2 (duas) crianças.
Potência individual	Aliados ao número de moradores, os dispositivos e equipamentos energizados na casa são fatores-chave em relação ao consumo e corrente de pico de cada residência. Dentro da premissa do dimensionamento, uma residência é composta, no mínimo, por 1 (um) chuveiro, 1 (uma) geladeira, 1 (uma) máquina de lavar roupa, 2 (duas) TVs, iluminação e eletrodomésticos em geral. Entre esses, o chuveiro é o que possui o maior consumo.
Período de utilização	O tempo de funcionamento diário de um eletrodoméstico ou dispositivo de iluminação é outro fator que funciona em sinergia com a potência e o número de moradores, em termos de consumo.

Também foi feita uma inferência sobre as especificações dos equipamentos e os hábitos dos residentes fictícios da casa-



arquétipo para estimar o consumo médio mensal e diário dessa residência. A principal especificação dos aparelhos é o seu consumo de energia. Os hábitos dos residentes implicam seu tempo de uso. O chuveiro elétrico teve o maior valor de consumo de energia. O tempo de uso diário foi de 32 minutos, considerando 8 minutos por dia para cada residente. A geladeira está conectada à rede elétrica por 24 horas, mas sua operação é intermitente; logo, consideramos 5 horas de uso diário, durante as quais ela consome a potência nominal adicionada à potência de pico.

Um procedimento semelhante foi utilizado para a máquina de lavar, que, em termos de potência máxima, é o segundo equipamento que mais consome energia. No entanto, foi considerado um pequeno período diário para que pudesse somar um valor de consumo compatível, pois a máquina de lavar tem uma ampla faixa de potência de operação. Para os outros equipamentos, foram considerados a potência nominal, o tempo de uso e o número de dias de uso por mês (PROCELINFO, 2023), conforme listado na Tabela (5).

Tabela 5: Lista de equipamentos da casa-arquétipo (PROCELINFO, 2023)

Dispositivo	Quantidade	Potência máxima (W)	Tempo de uso diário sem interrupção (h)	Consumo diário máximo (kWh)	Tempo de uso mensal (d)	Consumo mensal (kWh)
Chuveiro (5500 kW)	1	5500	0.53	2.93	30	88.00
Geladeira (1 porta)	1	150	5.00	0.75	30	22.50
Máquina de lavar	1	400	0.37	0.15	12	1.76
TV 21"	2	90	4.00	0.72	30	21.60
Iluminação	4	15	5.00	0.30	30	9.00
Total	9	6155	14.90	4.85	132	142.86

Os parâmetros listados nas Tabelas (4) e (5) podem mudar dependendo do número de residentes, seus hábitos e dos equipamentos elétricos na casa. No entanto, o principal objetivo é obter uma ordem de grandeza do valor da bateria para servir ao sistema off-grid de uma residência e manter a viabilidade econômica desse sistema. Sendo assim, os valores apresentados aqui podem ser usados como parâmetros para comparações rápidas por meio de uma relação proporcional simples, ou mesmo para estudos mais aprofundados através de relações mais elaboradas.

Resultados do Estudo de Caso – Viabilidade Econômica

Com dados das Tabelas (3) e (5), e Eqs. (9), (10), (11) e (13), o conjunto de resultados numéricos é apresentado na Tabela (6).

Tabela 6: Valores relacionados à bateria projetada para abastecer o sistema FV da casa-arquétipo

Grandeza	Variável	Valor
Número de células desejado	n_{cel}	3327
Custo de cada célula aprovada	v_{ca}	R\$ 2.24
Custo do lote de baterias desejado	v_{tot}	R\$ 7764.81
Número total de baterias a serem adquiridas	n_{tot}	1160
Energia da bateria	$E_{bat} \geq$	24.62 kWh

Para a análise de viabilidade econômica, foi solicitada uma cotação para valores de novas células 18650 com pelo menos 2000 mAh. A cotação foi feita em sites de *marketplace*, descartando produtos que apresentaram algum tipo de informação certamente incorreta no anúncio. A exemplo disso, células 18650 anunciadas contendo 9900 mAh de capacidade são dispositivos irreais, uma vez que é impossível ter essa carga em uma célula com tais dimensões dispondo da tecnologia atual de íons de lítio.

O valor mais baixo encontrado foi de R\$ 14,95 por célula. Não tivemos qualquer referência do vendedor ou garantia de qualidade para essas células; então, é possível que a compra de um fornecedor com garantia de qualidade certificada apresente um valor unitário ainda maior do que o encontrado nesta cotação online.

A primeira análise de viabilidade consistiu em uma comparação simples entre o valor da célula nova (R\$ 14,95) e da célula reutilizada (R\$ 2,24), o que resulta em uma proporção de 6,6 vezes, ou seja, a célula reutilizada custa aproximadamente 15% do valor de uma célula nova.



A análise do preço das células é apenas um elemento a ser verificado, pois um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica usado para alimentar a casa em nosso estudo de caso custaria aproximadamente R\$ 11.111,00. Inicialmente, supondo que o custo de um sistema *off-grid* é o valor do sistema *on-grid* somado ao valor da bateria, um sistema *off-grid* com células reutilizadas custaria algo em torno de R\$ 18.864,81, enquanto o mesmo sistema com uma bateria de células novas custaria aproximadamente R\$ 60.838,65.

Um sistema *on-grid* deste tamanho tem um período estimado de retorno de investimento (ROI) de cinco anos. Realizando uma simples proporção, um sistema *off-grid* com células reutilizadas teria um tempo mínimo de ROI de aproximadamente 8 anos, enquanto o mesmo sistema com células novas teria um tempo mínimo de ROI de, em média, 27 anos.

Uma análise rápida mostra que, neste estudo de caso, o sistema com células novas seria inviável, devido ao fato de que a vida útil de um sistema fotovoltaico é de 25 anos. Já uma análise mais detalhada poderia acentuar ou atenuar os resultados deste trabalho.

Por fim, precisamos estimar o tempo necessário para a bateria abastecer a casa arquetípica. Para isso, dividimos a energia total armazenada na bateria - Eq. (13) - de acordo com o consumo residencial diário máximo - Tab. (5). Isso resultou em uma autonomia de cinco dias. Esse resultado implica que, uma vez carregada, a bateria seria capaz de manter a casa funcionando por cinco dias sem qualquer luz solar. Portanto, mesmo em períodos de baixa intensidade solar, e dias chuvosos e nublados, essa autonomia tende a ser maior. A magnitude dessa diferença requer estudos adicionais.

Conclusões

O critério de seleção de células por capacidade de carga ($C_{cel} \geq 2000$ mAh) mostrou-se bastante robusto, uma vez que todas as células que atenderam a esse critério também atenderam aos demais.

Com base nos resultados apresentados, pode-se concluir que, pelo menos para este estudo de caso, a reutilização de células na construção da bateria do sistema fotovoltaico pode tornar o sistema *off-grid* viável, pois sua montagem com novas células de lítio 18650 é economicamente inviável, e o tempo de ROI é maior do que sua vida útil.

Ao estimar o custo do sistema *off-grid*, simplesmente somamos o valor do sistema *on-grid* ao das células usadas para montar a bateria. Essa aproximação é razoável, porque são os maiores custos de um sistema *off-grid*. Porém, uma análise mais detalhada exigiria um inversor mais potente, bem como um controlador de carga, BMS, cabos e outros materiais. Isso aumenta ainda mais o preço do conjunto *off-grid*, tornando-o ainda mais economicamente inviável com células novas. Para sistemas *off-grid* com células reutilizadas, é necessário um estudo mais detalhado para obter tempos de retorno mais substanciais e confiáveis.

Uma descoberta importante é a porcentagem de células aprovadas ($396/777 = 51\%$). De acordo com os critérios de uso escolhidos, aproximadamente metade das células condenadas pelos usuários de notebooks podem continuar sendo utilizadas. Embora o valor ambiental dessa reutilização não tenha sido adicionado, obtivemos sustentabilidade, o que é inegável e até mesmo material para outros estudos.

Outro fator que não pode ser negligenciado é o custo de reutilização das células, o qual foi muito baixo pois não houve reciclagem (RAHMAN; AFROZ; SAFRIN, 2017), o que certamente consumiria energia, máquinas e instalações adequadas, aumentando o valor do produto reciclado. O maior custo no processo foi a mão de obra. No entanto, desmontar as baterias e testar as células exigiu aproximadamente 5 meses. Dessa forma, o processamento de $n_{tot} = 1160$ baterias, com o objetivo de obter $n_{cel} = 3327$ células, exigiria mais tempo, mão de obra e/ou equipamentos.

Um fator que não foi considerado neste artigo e certamente será um elemento muito importante na viabilidade deste projeto é a durabilidade das baterias feitas com células reutilizadas. Essa análise será realizada em trabalhos futuros. Por enquanto, podemos dizer que temos uma bateria feita com células reutilizadas que está operacional em um veículo elétrico protótipo no grupo de pesquisa dos autores deste trabalho.

Por fim, concluímos que um sistema *off-grid* é potencialmente viável se a bateria for construída com células reutilizadas e que há pouca chance de ser viável se a mesma bateria for montada com células novas. Embora os números apresentados neste trabalho não sejam suficientes para uma tomada de decisão, eles servem como um guia e abrem possibilidades para muitos outros estudos sobre este tema. Alguns desses estudos estão em investigação para trabalhos futuros.

Agradecimentos

Os autores expressam sua gratidão à CAPES, à UNIFAL-MG e ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia Ambiental (PPGCEA) pelo apoio fundamental fornecido durante a realização da pesquisa que deu origem a este trabalho.

Referências Bibliográficas

Basaran, K.; Cetin, NS, Borekci, S.; 2017. Energy management for on-grid and off-grid wind/PV and battery hybrid systems. **IET Renewable Power Generation**, v. 11, no. 5, p. 642-649.

Cazzaniga, R. et al.; 2019. Integration of floating PV with hydroelectric power plants. **Heliyon**, v. 5, no. 6.

Chen, H., Shen, J; 2017. A degradation-based sorting method for lithium-ion battery reuse. **PLoS One**, v. 12, no. 10, p. e0185922.

CONAMA - National Council for the Environment. Resolution No. 401, of November 4, 2008. Establishes the maximum limits of lead, cadmium and mercury for cells and batteries sold in the national territory and the criteria and standards for their



environmentally appropriate management, and other measures. Published in DOU nº 215, of November 5, 2008, Section 1, page 108-109. Disponível em: http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=570. Acesso em: 11 jul. 2023.

Cui, D. et al.; 2018. Anomalously Faster deterioration of LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂/Graphite High-Energy 18650 Cells at 1.5 C than 2.0 C. **Scanning**, v. 2018.

Dantas, TB; 2014. Economic degrowth: nature as a limit to growth and the new context of the green economy. In: Belinda Pereira da Cunha; Sergio Augustine. (Org.). Environmental sustainability: legal and social studies. 1st edition Caxias do Sul: Educs, v. 1, p. 317-335.

Heath, GA. et al.; 2022. A critical review of the circular economy for lithium-ion batteries and photovoltaic modules—status, challenges, and opportunities. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 72, no. 6, p. 478-539.

Islam, MT. et al.. Waste battery disposal and recycling behavior: a study on the Australian perspective. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, no. 39, p. 58980-59001.

Kong, D. et al.; 2019. Study on degradation behavior of commercial 18650 LiAlNiCoO₂ cells in over-charge conditions. **International Journal of Energy Research**, v. 43, no. 1, p. 552-567.

MIT Electric Vehicle Team, A Guide to Understanding Battery Specifications, December 2008. Disponível em: http://mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf. Acesso em: 7 fev. 2023.

Muralidharan, N. et al; 2020. Lithium Iron Aluminum Nickelate, LiNixFeyAlzO₂—New Sustainable Cathodes for Next-Generation Cobalt-Free Li-Ion Batteries. **Advanced Materials**, v. 32, no. 34, p. 2002960.

Halliday, D., Resnick, R., Walker, J.; 2006. Fundamentals of Physics, **LTC**, vol.3, 7ed.

Falk, J. et al.; 2020. Applying Lithium-Ion second life batteries for off-grid solar powered system—a socio-economic case study for rural development. **Zeitschrift für Energiewirtschaft**, v. 44, no. 1, p. 47-60.

PROCELINFO, Brazilian Center for Energy Efficiency Information: table with an estimated average monthly consumption of household appliances according to hypothetical use. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7BE6BC2A5F-E787-48AF-B485-439862B17000%7D>. Acesso em 21 Jun. 2023.

Rahman, A., Afroz, R., Safrin, M; 2017. Recycling and Disposal of Lithium Battery: Economic and Environmental Approach. **IJUM Engineering Journal**, v. 18, no. 2, p. 238-252.



APRENDIZADO DE MÁQUINA PARA PREVISÃO DE VAZÃO E PRESSÃO EM UM CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS DE COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE

1Eduardo Henrique Taube Cunegatto, 2Lenon Audibert Cisco,
3Flávia Schwarz Franceschini Zinani, 4Sandro José Rigo

1 Universidade do Vale do Rio dos Sinos, e-mail: eduardohtc@edu.unisinos.br; 2 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: lenon.cisco@ufrgs.br; 3 Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), e-mail: flavia.zinani@ufrgs.br; 4 Universidade do Vale do Rio dos Sinos, e-mail: rigo@unisinos.br

Palavras-chave: Coluna de água oscilante, Aprendizado de máquina, Energia das ondas

Resumo

A utilização da energia disponível nos oceanos é uma oportunidade que se coloca como uma alternativa renovável, a fim de diversificar a matriz energética e reduzir o consumo de fontes fósseis. Nesse cenário, a energia das ondas do mar tem sido cada vez mais estudada, com diversos dispositivos capazes de aproveitá-la. Um dos dispositivos mais conhecidos são as Colunas de Água Oscilante (CAO), que se baseiam em uma câmara hidropneumática, por onde a oscilação da superfície oceânica gera compressão do ar confinado, fazendo-o acionar uma turbina para geração de energia. Este trabalho combina simulação numérica e algoritmos de aprendizagem de máquina, com o objetivo de desenvolver modelos de previsão para vazão mássica e pressão de ar em uma câmara CAO. O banco de dados para o desenvolvimento dos modelos foi montado através de técnicas de Design de Experimentos (DOE), onde diferentes combinações de altura e comprimento de onda foram simuladas via *Computational Fluid Dynamics* (CFD). As simulações numéricas apresentam domínio bidimensional, solucionadas via MVF (Método dos volumes finitos) e VoF (*Volume of Fluid*). A condição de contorno de praia numérica foi aplicada e as malhas geradas seguem a metodologia *stretched*. São utilizados dois graus de liberdade, a altura de onda e o comprimento de onda, com estas variáveis definindo o tamanho do domínio computacional. Com a utilização de métodos combinados de DOE (CCD e LHS) foram geradas 29 amostras. A informação da altura de elevação de onda é alimentada a uma rede neural profunda totalmente conectada. Os dados de entrada percorrem a rede até a camada de saída, que retorna a previsão da sequência da vazão mássica e pressão, para o mesmo período informado nos dados de entrada, prevendo as condições de operação para um dispositivo CAO a partir da onda incidente. Para a implementação do modelo, utilizou-se a linguagem de programação Python e para a avaliação dos resultados a função custo empregada (*MSE*), que quantifica a diferença entre as previsões da rede e os valores CFD. O modelo de vazão mássica obteve um MSE de aproximadamente 0,0125 no treinamento, enquanto que o modelo de pressão obteve MSE de aproximadamente 0,02. O modelo de previsão, a depender da informação da onda, possibilita a identificação de picos de vazão e pressão que possam comprometer o funcionamento, algo que não é possível determinar estimando apenas um único valor. Os resultados encontrados apresentam diferenças de até 5% no RMS entre as previsões e os dados simulados via CFD, além de diferenças na amplitude e comprimento de onda nos dados gerados. A principal contribuição científica do trabalho está relacionada na utilização de aprendizado de máquina na previsão de condições de operação tradicionais de um dispositivo CAO, trazendo um conceito que pode ser aplicado em fases iniciais do projeto destes dispositivos.

Introdução

O potencial energético oriundo dos oceanos tem ganhado muita atenção nos últimos anos, não somente por ser uma fonte de energia limpa, mas também pela alta quantidade de energia disponível e pelas diferentes possibilidades de aproveitamento. No entanto, as tecnologias para conversão de energia dos oceanos estão ainda em baixos graus de maturidade tecnológica, se comparadas a tecnologias para outros tipos de energias renováveis, como eólica e solar. Assim, considera-se o aproveitamento da energia dos oceanos uma alternativa com grande potencial de inovação tecnológica (Mahdy et al. 2024). Neste contexto, muitos dispositivos de conversão de energia das ondas (*Wave Energy Converters*, WEC) têm sido pesquisados. Uma das tecnologias, considerada uma das alternativas mais viáveis, é a tecnologia de dispositivos de coluna de água oscilante (CAO). Estes dispositivos utilizam o movimento oscilatório da interface água-ar das ondas para movimentar ar confinado em uma câmara parcialmente submersa e gerar energia através da passagem de ar por uma turbina (Mahmoud et al. 2024). Os dispositivos CAO são atrativos de modo que não utilizam peças móveis submersas, possuem fácil manutenção e não prejudicam a vida marinha (Khaleghi et al. 2022).

O aprimoramento de dispositivos CAO têm sido bastante explorados na literatura. Um estudo publicado por Rehman, et al. 2023 mostra que foram publicados mais trabalhos sobre energia das ondas do que energia eólica nos últimos 20 anos e que grande parte dos trabalhos explora a otimização geométrica de dispositivos CAO. Os métodos empregados em tais pesquisas envolvem tanto simulação computacional quanto testes experimentais em escalas de laboratório e piloto.

Um assunto bastante explorado neste contexto é a metodologia de modelagem dos conversores. Existe a necessidade de aprimorar não somente os sistemas, mas os processos de simulação, pois a modelagem matemática destes dispositivos costuma ser computacionalmente intensa, demandando memória e tempo computacional.



O estudo de Lorenzini, et al. (2015) utiliza o método Design Construtal e *Computational Fluid Dynamics* (CFD) para otimizar a geometria de um CAO, variando comprimento e altura da câmara. Ambarsooz, et al. (2016) estuda os efeitos de amortecimento (perda de carga) do ar na turbina de um CAO, empregando meio poroso como mecanismo. Torres, et al. (2016) também estuda os efeitos da turbina de um CAO, empregando um método hidrodinâmico-aerodinâmico na modelagem. Lisboa, et al. (2017) apresenta um estudo referente às condições de amortecimento de praia numérica, um mecanismo numérico utilizado para atenuar os efeitos de onda. Vyzikas, et al. (2017) realiza um estudo experimental, que investiga a influência do formato da base das câmaras de um CAO. Torres, et al. (2018) apresenta uma metodologia para determinação do tamanho ótimo de uma turbina em um dispositivo CAO. Lee, et al. (2020) realiza um estudo paramétrico da geometria de um CAO, variando diâmetro da turbina, largura da câmara, submersão da parede frontal da câmara e área de abertura, analisando a influência destes na performance hidrodinâmica do dispositivo. Guths, et al. (2022) introduz um conceito de geometria CAO em formato 'V', explorando especialmente os efeitos da parede frontal na performance hidrodinâmica. Qu, et al. (2023) estuda os efeitos da área de abertura e espessura de câmaras CAO para diferentes condições de onda. Ding, et al. (2023) realiza um estudo numérico de otimização de um dispositivo CAO utilizando parâmetros de onda realísticos.

A crescente evolução dos trabalhos relacionados a CAO em geral também acompanha o desenvolvimento das metodologias de análise. Nesse contexto, cita-se a utilização de algoritmos computacionais de aprendizado de máquina (*machine learning*, em inglês). Em estudo publicado por Shadmani, et al. (2023), o número de trabalhos, a partir do ano 2000, que utilizam técnicas de aprendizado de máquina em sistemas de energia obteve um crescimento significativo desde 2016, em que cerca de 500 trabalhos foram publicados, número que, até o momento, era inferior ao de trabalhos publicados sobre energia das ondas. Desde então, esse número aumentou consideravelmente para cerca de 3000 em 2021, superando em quase três vezes o número de publicações relacionadas à energia das ondas, mostrando que a implementação destas técnicas pode ser extremamente atrativa e benéfica no desenvolvimento de CAO.

Dentre os trabalhos relacionados que empregam *machine learning* no desenvolvimento de CAO, o trabalho de López e Iglesias (2014) apresenta um conceito de laboratório virtual, onde um modelo de *machine learning* via redes neurais é empregado para estimar a potência hidropneumática de um dispositivo CAO, para diferentes combinações geométricas. George, et al. (2021) implementa redes neurais artificiais como modelo de predição da performance para otimização de um CAO em formato 'U'. Silva, et al. (2021) emprega uma arquitetura de rede neural LS-SVM (*Least Squares Support Vector Machine*) para estimar a pressão do ar de uma câmara de CAO, idêntica à instalada na planta de Mutriku, na Espanha. Seo, et al. (2021) apresenta um modelo de *machine learning* capaz de lidar com grande quantidade de dados (*big data*), aplicados na previsão das condições de operação de um dispositivo CAO real, diante de diferentes condições de onda. Ahmad, et al. (2023) estuda um turbinas eólicas *offshore* (distante da costa), com dispositivos CAO acoplados na estrutura. No estudo, os autores empregam redes neurais para estimar a rotação das turbinas e potência gerada pelos dispositivos.

Identificado que o campo de aplicação ainda é vasto, o presente trabalho tem por objetivo desenvolver modelos de previsão, baseado em algoritmos de aprendizado de máquina, sendo um modelo para estimar a vazão mássica e o outro a pressão de ar, em uma câmara de CAO, a partir da informação da altura de elevação livre da onda incidente. O banco de dados para criação dos modelos foi montado através de técnicas de Design de Experimentos (DOE, *design of experiments*), onde diferentes combinações de altura e comprimento de onda foram simuladas via CFD. A informação da altura de elevação de onda, isto é, a sequência da altura de onda para um determinado período, é alimentada no modelo, cuja arquitetura é uma rede neural profunda, totalmente conectada. Os dados de entrada percorrem a rede até a camada de saída, que retorna a previsão da sequência da vazão mássica e pressão, para o mesmo período informado nos dados de entrada, para que sejam aptos para futuro pós-processamento

O trabalho apresenta um conceito de aplicação promissor no desenvolvimento de CAO, trazendo uma metodologia de predição de parâmetros de operação destes dispositivos para diferentes configurações de onda. Contudo, existem lacunas que ainda podem ser exploradas para aprimorar ainda mais o modelo. Diante disso, espera-se que este trabalho contribua no desenvolvimento de técnicas e métodos aplicados no desenvolvimento de CAO, e que possa servir de inspiração para novos conceitos e oportunidades de estudo, não somente em energia das ondas, como nas demais áreas de aplicação.

Materiais e métodos

O sistema em análise consiste em uma câmara de ar de um dispositivo de coluna de água oscilante offshore, representado de forma bidimensional. O domínio computacional, apresentado na Figura 1(a), é caracterizado por um retângulo que envolve o canal de ondas. O dispositivo CAO está localizado no centro, a uma distância de $3L$ das fronteiras esquerda e direita, onde L é o comprimento da onda incidente, que adentra o domínio pela fronteira esquerda e possui altura H . O dispositivo está parcialmente submerso a 5 m do leito oceânico e possui comprimento de 10 m , altura de 11 m , um orifício de $1,5\text{ m}$ representando a saída para turbina, e paredes de espessura $0,5\text{ m}$, conforme Fig. 1(b). No estudo, o estado de mar considerado é idealizado e a altura média de superfície livre é de 10 m . Para representar os efeitos offshore e atenuar os efeitos de reflexão das ondas, implementou-se na modelagem a condição de praia numérica, que inicia a uma distância de $2L$ da fronteira direita (saída) do domínio. A medição da pressão e vazão de ar é realizada por meio de uma sonda localizada na abertura da câmara, indicada pela linha vermelha, enquanto que o monitoramento da elevação da onda é realizado no gerador de ondas, na fronteira esquerda do domínio.

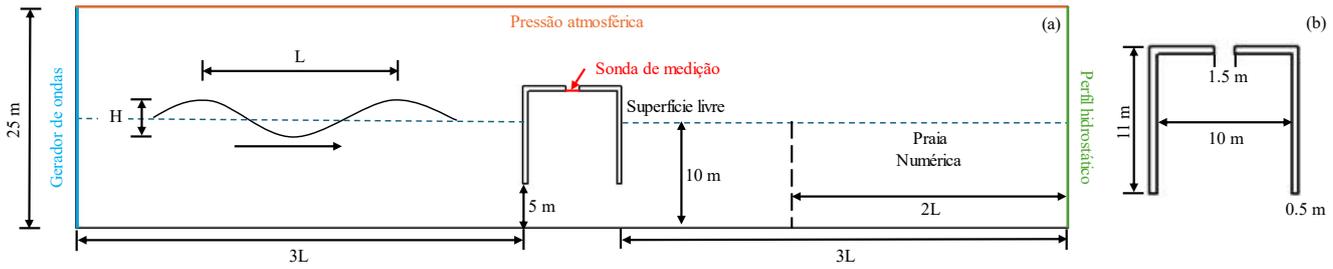


Figura 1: Domínio computacional – (a) dimensões do tanque; (b) dimensões do dispositivo CAO.

A simulação numérica (CFD) do problema foi realizada através do software comercial Ansys FLUENT (ANSYS 2022), o qual utiliza o método dos volumes finitos (Patankar, 1980) para aproximação das equações diferenciais de balanço de massa, quantidade de movimento e fração volumétrica, as quais estão expressas, respectivamente, por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla P + \nabla \tau + \rho \mathbf{g} + \mathbf{f} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{v}) = 0 \quad (3)$$

Onde: ρ é a massa específica do fluido (kg/m^3), t é o tempo (s), \mathbf{v} é o vetor velocidade (m/s), P é a pressão estática (Pa), τ é o tensor das tensões (Pa), \mathbf{f} representa o termo fonte de forças externas (N/m^3).

A equação da fração volumétrica (Eq. 3) é solucionada através do método *Volume of Fluid* (VOF), utilizada para calcular a percentagem de um determinado fluido em cada elemento do domínio, de forma que a fração volumétrica (α) varie de 0 a 1. A informação da fração volumétrica permite adequar a massa específica e a viscosidade do escoamento de acordo com as proporções de fluido dentro de um determinado volume do domínio. Estas propriedades são calculadas, respectivamente, por:

$$\rho = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2 \quad (4)$$

$$\mu = \alpha_1 \mu_1 + \alpha_2 \mu_2 \quad (5)$$

Onde: os subscritos 1 e 2 representam os diferentes fluidos utilizados. No caso deste estudo, foram considerados água e ar na modelagem.

O termo fonte, \mathbf{f} , na modelagem empregada, representa o artifício da praia numérica, conforme mencionado anteriormente. Matematicamente, o termo fonte é expresso da seguinte forma:

$$\mathbf{f} = -C(\rho \mathbf{v}) \left(1 - \frac{y - y_s}{y_e - y_s}\right) \left(\frac{x - x_s}{x_e - x_s}\right)^2 \quad (6)$$

Onde: C representa a resistência de amortecimento ($1/\text{m}$), x_s e x_e representam os pontos de início e fim da praia numérica, no eixo x , y_s e y_e representam o início e fim da praia numérica no eixo y . Os valor adotado para C é $20 [1/\text{m}]$ conforme recomendação de Lisboa, et al. 2017.

Com relação à modelagem das ondas, utilizou-se a teoria das ondas de Stokes, de segunda ordem. As componentes de velocidade e a elevação da superfície livre são calculadas, respectivamente, por:

$$u = \frac{\pi H \cosh(h+z)}{T \sinh(kh)} \cos(kx - \sigma t) \quad (7)$$

$$v = \frac{\pi H \cosh k(h+z)}{T \sinh(kh)} \cos(kx - \sigma t) \quad (8)$$

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \quad (9)$$



Onde: H é a altura da onda (m), η é a altura da superfície livre da onda (m), σ é a frequência da onda, determinado por $\sigma = 2\pi/T$, k é número de onda, definido por $k = 2\pi/L$, T é período da onda, u é a componente da velocidade no eixo x (m/s), v é a componente da velocidade no eixo y (m/s) e h é altura da superfície livre (m).

As condições de contorno do problema, também ilustradas na Figura 1, foram definidas da seguinte forma: na fronteira esquerda (azul), está o gerador das ondas incidentes; a fronteira superior determinou-se pressão atmosférica (laranja), cuja pressão manométrica é 0 [Pa]; a fronteira direita representa um perfil hidrostático (verde), influenciada pela presença da praia numérica; para a fronteira inferior do domínio, bem como as paredes do dispositivo CAO, a condição de parede impermeável foi implementada.

Na solução das equações, empregou-se como acoplamento pressão-velocidade o método PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*). Já para as interpolações espaciais, utilizou-se PRESTO (*Pressure Staggering Option*) para pressão, *Third-order MUSCL (Monotone Upstream-Centered Schemes for Conservation Laws)* para momento e HRIC (*High Resolution Interface Capturing*) para a fração volumétrica. O critério de convergência para a equação da continuidade foi 10^{-4} e 10^{-6} para as demais equações. O número de passos de tempo foi definido como 2500, cujo passo de tempo foi definido como $T/500$. O escoamento foi considerado laminar e os fluidos são incompressíveis.

A malha computacional está ilustrada na Figura 2. Sua construção foi baseada na metodologia *stretched*, de Marvopilis (1997), e está presente na literatura em estudos de CAO, como nos trabalhos de Lima et al. (2019), Letzlow et al. (2020), Teixeira et al. (2021) e Lima et al. (2024). O método basicamente consiste na divisão do domínio computacional em regiões de interesse, para posterior refinamento nas regiões mais críticas.

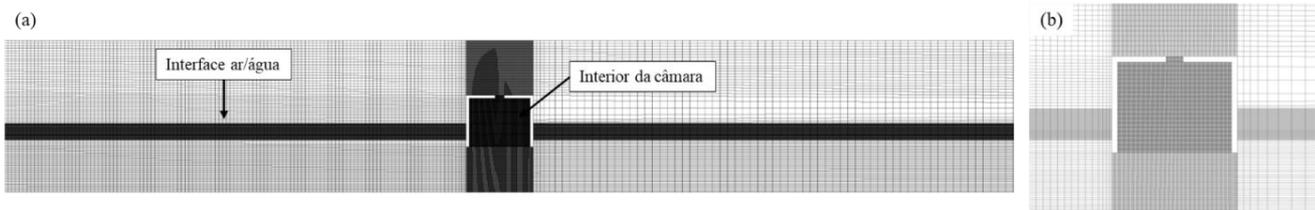


Figura 2: Malha computacional – (a) visão geral; (b) detalhe no dispositivo CAO.

As regiões mais críticas do problema consistem na interface entre ar e água e no interior da câmara. Na interface ar/água, utilizou-se a altura de onda como referência, de modo que o tamanho de elemento seja definido como $H/40$. No interior da cavidade, elementos de 0,05 [m] foram implementados, mantendo os elementos uniformes, de modo a capturar os fenômenos dentro do dispositivo. O tamanho de elemento da direção x tem por referência o comprimento de onda, sendo definido como $L/100$. Os valores adotados têm por referência os trabalhos citados anteriormente, os quais demonstraram excelente performance numérica ao adotar o método *stretched*. Para validação da malha computacional e da modelagem numérica, as elevações da superfície de onda com diferentes características (H e L) foram comparadas com a solução analítica (Eq. 9), cujos resultados estão presentes na Figura 3.

Observando os gráficos da Figura 3, nota-se que as ondas numérica e teórica não estão perfeitamente alinhadas, originando pequenas diferenças na elevação. Contudo, comparando-se as raízes quadrada média (*Root Mean Square, RMS*, Equação 10 abaixo) de cada onda, o caso (a) teve uma diferença de 0,982%, o caso (b) com 0,497% e o caso (c) com 0,249%. Com relação aos valores máximos e mínimos, o caso (a) obteve uma diferença de 0,089% e 0,108%, respectivamente, o caso (b) diferenças de 0,162% e 0,179% e o caso (c) apresenta diferenças de 0,135% e 0,141%. As métricas apresentam valores satisfatórios para o problema, indicando que a geração de ondas está a par com o modelo analítico, indicando que a modelagem está apropriada.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (10)$$

A geração da base de dados para aplicação do modelo de aprendizagem de máquina foi feita a partir do método *Design of Experiments (DOE)*, (Montgomery, 2012). Este método possui diversas técnicas para distribuição das amostras avaliadas dentro do espaço experimental. No presente estudo, utilizou-se uma combinação das técnicas *Central Composite Design (CCD)* e *Latin Hypercube Sampling (LHS)*, (Stein, 1987). A primeira apresenta uma distribuição uniforme e fixa das amostras dentro do espaço experimental, enquanto a segunda distribui, aleatoriamente, um determinado número de amostras.

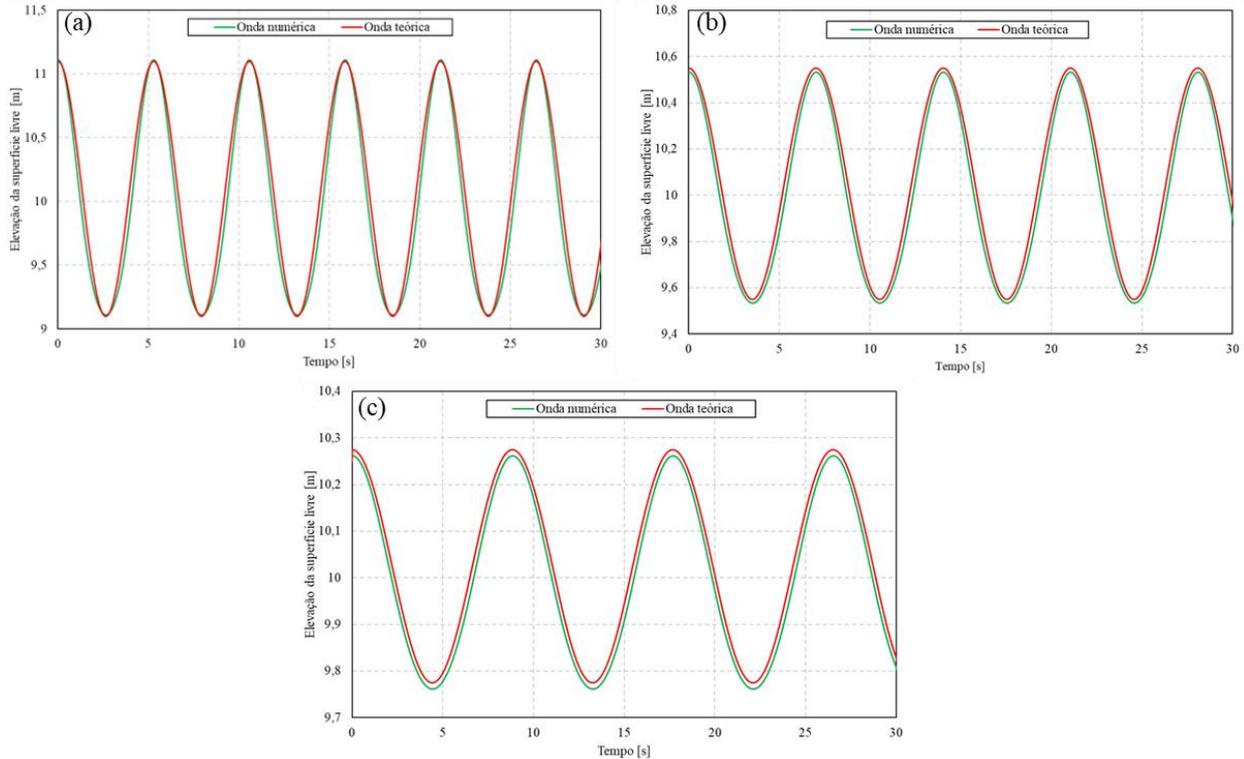


Figura 3: Validação da geração de onda – (a) $H = 2\text{m}$ e $L = 40\text{m}$; (b) $H = 1\text{m}$ e $L = 60\text{m}$; (c) $H = 0.5\text{m}$ e $L = 80\text{m}$.

No presente estudo, dois graus de liberdade são utilizados: a altura da onda (H) e o comprimento de onda (L), de forma que os limites das variáveis definem o tamanho do espaço experimental. Para H , variou-se entre 0,5 m a 2 m, enquanto que L foi variado de 40 m a 80 m. De acordo com Misiulia, et al. (2017), um modelo de predição necessita de um número de dados suficiente para capturar e entender as relações entre os dados de entrada e saída. Por isso, optou-se por utilizar a combinação dos métodos como proposto por Yang e Palazzolo (2022), que aplicaram ambos os métodos em seu estudo. Com isso, o método CCD gerou 9 amostras para o caso de dois graus de liberdade e outras 20 amostras foram geradas através do método LHS, distribuídos dentro do espaço experimental, conforme mostra a Figura 4(a).

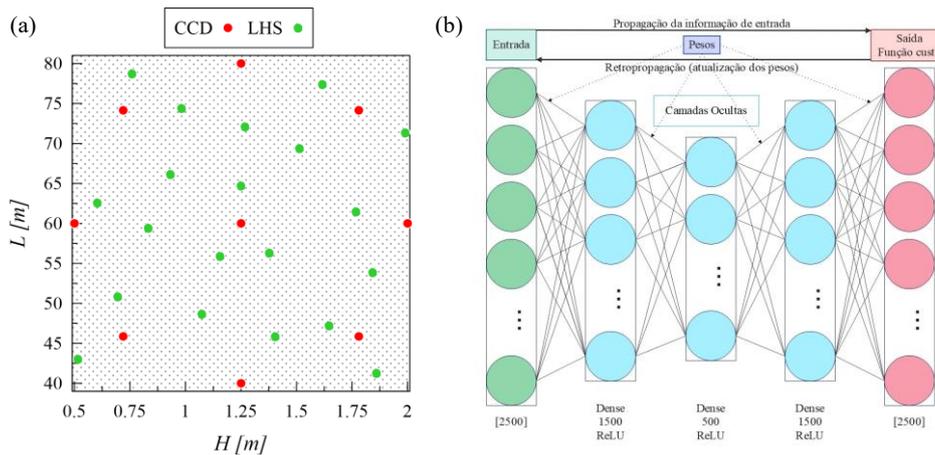


Figura 4: (a) Distribuição dos pontos dentro do espaço experimental; (b) Estrutura geral do modelo de aprendizado de máquina.

O conceito do modelo de aprendizado de máquina empregado neste trabalho envolve a predição das condições de operação, no caso, a pressão e vazão de ar dentro da câmara do CAO, a partir da informação da onda incidente. No caso, deseja-se alimentar a rede com os dados da elevação livre da onda para um determinado período e receber da rede os parâmetros de resposta, para o mesmo período. Logo, alimenta-se a rede com um vetor de entrada, que representa a altura da elevação livre da onda e, como resposta, a rede retorna um vetor, referente à variável de resposta, cujo tamanho é o mesmo. Para tal, foram criados dois modelos separados, um para cada variável, de estrutura idêntica, apresentado na Figura 4(b).

O modelo proposto trata-se de uma rede neural profunda (*Deep Neural Network, DNN*), composta por três regiões distintas: a camada de entrada, a qual recebe o vetor de entrada, de tamanho 2500; três camadas ocultas, responsáveis pela



transmissão da informação dos dados de entrada, as quais duas possuem 1500 neurônios e uma com 500 neurônios; e a camada de saída, que retorna as previsões, cujo tamanho também é 2500.

Para a implementação do modelo, utilizou-se a linguagem de programação Python, através das bibliotecas *TensorFlow* (Abadi et al. 2015) e *Keras* (Chollet et al. 2015). O parâmetro *Dense*, mostrado na Figura 4(b) é a denominação utilizada na biblioteca *Keras* para denominar que a rede é totalmente conectada, o que significa que as informações são repassadas entre as camadas da rede, de neurônio em neurônio. A função de ativação empregada é a *Rectified Linear Unit* (ReLU). Com relação aos hiperparâmetros da DNN, utilizou-se o otimizador *Adaptive Momentum Estimation* (Adam), com taxa de aprendizado de 10^{-4} e 50 iterações (*epochs*) para o treinamento. Dos 29 *datasets*, 80% foram utilizados para treinamento da rede e 20% para teste.

O processo de treinamento da rede envolve diminuir a função custo, que mede a diferença entre a previsão e os dados de treinamento, a cada iteração, permitindo que a rede ajuste seus pesos. A função custo empregada no presente estudo é o Erro Quadrático Médio (*Mean Squared Error, MSE*), definida matematicamente por:

$$MSE_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{prev,i,j} - y_{CFD,i,j})^2 \quad (11)$$

$$MSE_{total} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m MSE_i \quad (12)$$

Onde: n é o número de elementos do vetor, m é o número de vetores utilizados na avaliação da métrica, i representa o índice do vetor, j representa o índice do valor, e os subscritos *prev* e *CFD* representam os valores previstos pela rede e os valores da simulação CFD, respectivamente. Um importante aspecto a informar sobre a implementação do modelo é a normalização dos dados, utilizado para deixar os dados em escala comum para garantir melhor adequação dos pesos da rede, retornando resultados mais precisos. A ideia é transformar todos os valores em um intervalo, como por exemplo, de 0 a 1, sem alterar a natureza dos dados. Neste estudo, empregou-se a normalização *min-max*, definida matematicamente por:

$$x_{norm_{ij}} = \frac{x_{ij} - x_{min_i}}{x_{max_i} - x_{min_i}} \quad (13)$$

Onde: i representa o índice do vetor, j representa o índice do valor e os subscritos *norm*, *min* e *max* representam o valor normalizado, o valor mínimo do vetor e o valor máximo do vetor, respectivamente. Com isso, o modelo é avaliado a partir dos valores normalizados.

Resultados

O primeiro passo para aplicação do modelo é a análise do processo de treinamento. Conforme mencionado na seção anterior, a métrica *MSE* foi implementada como função a ser minimizada. Em tese, a função custo empregada (*MSE*) quantifica a diferença entre as previsões da rede e os valores CFD, de forma que a minimização desta diferença indica correlação forte entre os dados previstos e os reais (CFD). Contudo, é extremamente importante verificar o comportamento do treinamento para identificar possíveis *overfitting* (sobreajuste) dos dados. Isso acontece quando o modelo se adequa excessivamente aos dados de treinamento, produzindo previsões inadequadas para novos dados (Géron, 2019). A Figura 5 apresenta o desempenho do modelo empregado durante o processo de treinamento.

Nos gráficos apresentados, a linha verde representa a variação da função custo para cada época durante o processo de treinamento, onde os respectivos dados foram utilizados para ajuste dos pesos da rede. Em geral, o valor começa elevado devido à natureza heurística dos pesos e conforme estes são atualizados, o valor de *MSE* reduz. Na Figura 5(a), é possível observar que, a partir da época 10, o modelo apresenta leves oscilações, sem alteração significativa nos valores, atingindo um nível de convergência. Já na Figura 5(b), nota-se que as oscilações são mais bruscas, e o decréscimo da função erro é mais nítido. Comparando-se os dois casos, nota-se que o modelo de vazão mássica obteve um *MSE* de aproximadamente 0,0125 no treinamento, enquanto que o modelo de pressão ficou na proximidade de 0,02.

Já a linha vermelha representa a variação da função custo utilizando os dados de teste, onde, neste caso, o modelo treinado é avaliado utilizando os dados de teste, ou seja, dados não observados pelo modelo. O comportamento da curva mostra uma tendência similar a curva de treinamento, sendo um aspecto favorável. Além disso, as métricas também retornaram valores similares aos de treinamento, indicando que o modelo consegue se adaptar a novos dados sem resultar em *overfitting*.

Visto que os modelos apresentaram performance adequada durante o processo de treinamento, segue-se para a verificação das predições em si. A Figura 6 apresenta comparações das predições para vazão mássica e pressão em diferentes situações de onda.

Observando os gráficos da Figura 6, nota-se que o modelo produz resultados coerentes, mas ainda com certas discrepâncias. Em uma análise visual, é notável que as curvas não estão perfeitamente alinhadas, especialmente com relação ao comprimento de onda nas previsões de vazão mássica e na amplitude das previsões de pressão. Nota-se que o comportamento da vazão mássica possui cristas e vales mais ordenados, o que facilita a correlação dos dados de entrada com a saída pela rede, bem como o aprendizado, resultado em métricas mais baixas, como observado na Figura 5. Já o comportamento da pressão é mais imprevisível, tornando o aprendizado mais sensível. Novamente, isso é observado na Figura 5, onde as métricas foram maiores, bem como as oscilações.

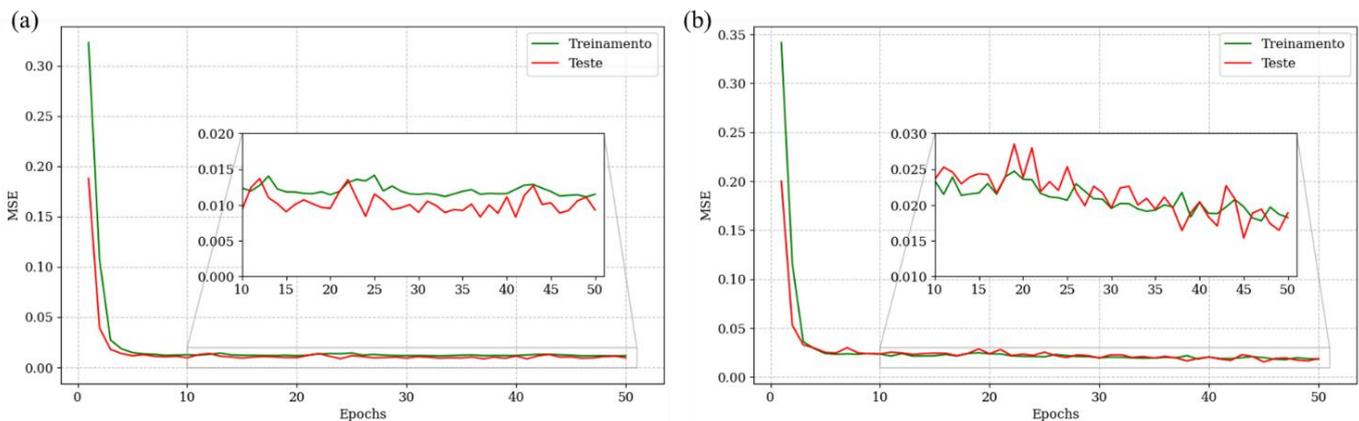


Figura 5: Processo de treinamento da rede neural - (a) Modelo para predição da vazão mássica; (b) Modelo de predição da pressão.

Em termos quantitativos, novamente opta-se pelo uso da métrica RMS, previamente utilizada na validação da geração de ondas, para análise dos gráficos da Figura 6. Nota-se que os valores de RMS são mais próximos para os resultados de pressão, do que para os de vazão mássica, onde é possível identificar uma diferença máxima de 5%. Isso acontece pois, no caso das previsões de pressão, as diferenças de amplitude são compensadas pelas diferenças no comprimento de onda, enquanto, para as previsões de vazão mássica, não ocorre esta compensação, uma vez que as amplitudes são similares, mas o comprimento de onda não. Observa-se que essa diferença é ligeiramente maior na crista das ondas, onde os maiores valores se concentram, resultando em um RMS mais baixo para a previsão.

Outro importante conceito a ser enfatizado por este trabalho é a capacidade de pós-processamento de dados gerados por um modelo de aprendizado de máquina. Isso é, ao invés de prever diretamente um único valor, opta-se por reproduzir dados generalizados, para que possam ser processados em variadas aplicações. Na aplicação estudada, os dados gerados podem ser processados para o cálculo do RMS, parâmetro corriqueiramente utilizado no tratamento de sequências de dados, que no caso de dados oscilantes, como ondas, representa a energia capturada em um determinado período e/ou comprimento (Goswami e Sinha, 2022). Logo, aplicando o RMS nos dados de vazão mássica e pressão gerados, obtém-se o valor médio das variáveis capturado pelo dispositivo CAO durante a sequência/período. Obtendo-se ambas as informações, é possível estimar, por exemplo, a potência disponível no conversor do tipo CAO, através da seguinte equação (Sheng et al. 2013):

$$P_w = P_{RMS} Q_{RMS} \quad (14)$$

Onde: P_w representa a potência disponível, P é a pressão, Q é a vazão e o subscrito RMS significa que o valor em questão é a raiz quadrática média da variável. É importante salientar que, para calcular a potência estimada, deve-se reaplicar a equação de normalização nos dados antes de calcular o RMS para que retornar a escala original.

A potência de um CAO é uma das maneiras de avaliar a performance do dispositivo. Segundo Garcia-Teruel et al. 2021, existem outras maneiras de otimizar um CAO, cujas informações podem ser extraídas de gráficos como os apresentados na Figura 6. Outro aspecto importante sobre a vantagem da presente aplicação é o fato de que, realisticamente, as ondas não são idealizadas, isto é, são influenciadas por diversos fatores. Logo, a depender da condição em que a informação da onda é capturada, pode-se estimar diferentes condições de operação, possibilitando a identificação de picos de vazão/pressão que possam comprometer o funcionamento, algo que não é possível determinar estimando apenas um único valor.

Conclusões

O presente trabalho estuda a aplicação de modelos de aprendizado de máquina na análise de colunas de água oscilante (CAO) para previsão da vazão mássica e a pressão de ar no orifício da turbina, em um determinado período. Dois modelos, um para cada variável de resposta, foram desenvolvidos através de uma arquitetura de rede neural artificial, totalmente conectada, que recebe a informação da elevação da altura de onda e retorna as previsões. O banco de dados utilizado no treinamento dos modelos foi criado via *Design of Experiments* (DOE), que gerou amostras para diferentes combinações de altura e comprimento de ondas. As amostras foram inicialmente simuladas via CFD, gerando as informações necessárias para o processo de treinamento e a avaliação do modelo. A modelagem numérica foi avaliada comparando-se a geração de ondas com o modelo teórico de Stokes de segunda ordem, retornando resultados satisfatórios. O processo de treinamento dos modelos foi avaliado através da função custo *Mean Squared Error* (MSE), que trouxe a métrica entre os valores previstos pelo modelo e os valores CFD.

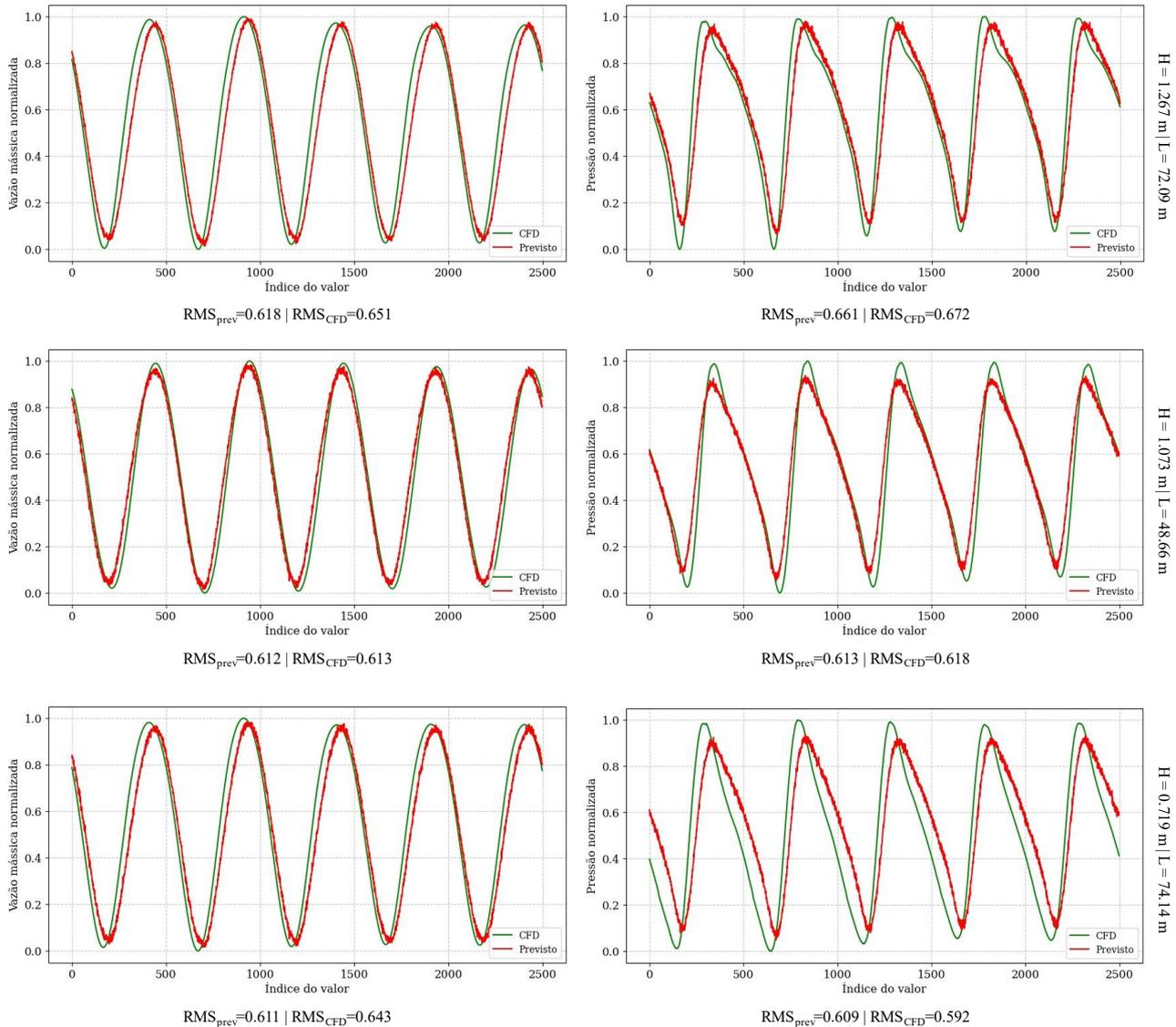


Figura 6: Comparação dos dados CFD com as previsões do modelo para vazão mássica e pressão em diferentes configurações de onda incidente.

Os resultados do estudo mostraram que a arquitetura adotada nos modelos conseguiu generalizar o problema, gerando resultados coerentes, sem a presença de *overfitting* (sobreajuste). Isso também é enfatizado pelos valores de MSE, onde valores de até 0.02 foram encontrados, sendo uma excelente marca para a metodologia empregada. A boa performance no treinamento resultou em previsões que capturam o problema estudado, gerando dados que trazem informações importantes sobre o comportamento da vazão de massa e pressão de ar para uma determinada condição de onda. Além disso, os dados gerados são pós-processáveis, de modo que parâmetros como *Root Mean Square* (RMS) possam ser determinados para estimar, por exemplo, a potência disponível no dispositivo CAO.

Contudo, é importante salientar que alguns resultados gerados ainda possuem discrepâncias, gerando estimativas com certa margem de erro. Foram encontradas diferenças de até 5% no RMS entre as previsões e os dados CFD. Já para o comportamento geral, nota-se diferenças significativas na amplitude e no comprimento de onda dos dados gerados, mostrando que o modelo não está com uma boa precisão. Isso faz com que alternativas na modelagem sejam implementadas para melhoria do modelo. Uma delas é a ampliação da base de dados, para que mais situações sejam abordadas no modelo, aumentando a capacidade de generalização. Isso pode fazer com que seja possível reduzir ainda mais as métricas de treinamento. Outras propostas de melhoria envolvem a alteração nos hiperparâmetros, como o número de camadas ocultas, número de neurônios, taxa de aprendizado do otimizador, ou ainda, uma completa reformulação da arquitetura, empregando-se outros modelos de redes neurais artificiais.

Em um contexto geral, os resultados aqui encontrados são satisfatórios, pois além de atingirem o esperado no escopo do trabalho, também forneceram informações importantes sobre a atual capacidade do método empregado. A partir da análise de resultados foram observadas possíveis condições de melhoria, bem como identificadas oportunidades de aplicação em outros cenários. Como sugestões de cenários a serem estudados, cita-se a variação dos parâmetros de onda combinados com variações



geométricas do dispositivo CAO, para desenvolver um modelo capaz de generalizar ainda mais o problema. Além disso, a implementação de ondas irregulares e estados de mar realísticos também são oportunidades de estudo, bem como estudos tridimensionais. São várias possibilidades que, combinadas com a versatilidade dos modelos de aprendizado de máquina, podem trazer grandes avanços na modelagem de sistemas de energia das ondas, bem como em outras áreas da engenharia.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer as fundações CAPES, CNPq, FAPERGS e FCT e as universidades UNISINOS e UFRGS pelo apoio recebido. F. Zinani agradece as agências CNPq (311444/2021-0), FAPERGS (21/2551-0002169-1) e Fundação para a Ciência e Tecnologia, I.P. (doi.org/10.54499/UIDP/04683/2020; doi.org/10.54499/UIDB/04683/2020). S. Rigo agradece a agência CNPq (305635/2021-2).

Referências Bibliográficas

- Mahdy, A.; Hasanien, H.M.; Abdel Aleem, S.H.E.; Al-Dhaifallah, M.; Zobaa, A.F.; Ali, Z.M. 2024. State-of-the-Art of the most commonly adopted wave energy conversion systems. *Ain Shams Engineering Journal*, v. 15.
- Mahmoud, M.; Adbelkareem, M.A.; Olabi, A.G. 2024, Chapter 1.3 – Wave energy extraction Technologies. *Renewable Energy – Volume 2: Wave, Geothermal, and Bioenergy*, pp. 37-51.
- Khaleghi, S.; Lie, T.T.; Baguley, C. 2022, An Overview of the Oscillating Water Column (OWC) Technologies: Issues and Challenges. *Journal of Basic & Applied Sciences*, pp. 98-118.
- Rehman, S.; Alhems, L.M.; Alam, M.M.; Wang, L.; Toor, Z. 2023. A review of energy extraction from wind and ocean: Technologies, merits, efficiencies, and cost. *Ocean Engineering*, v. 267.
- Lorenzini, G.; Lara, M.F.E.; Rocha, L.A.O.; Gomes, M.N.; Santos, E.D.; Isoldi, L.A. 2015. Constructal Design applied to the study of the geometry and submergence of an oscillating water column. *International Journal of Heat and Technology*, v. 33, n.2.
- Anbarsooz, M.; Faramarzi, A.; Ghasemi, A. 2016. A Numerical Study On The Performance Of Fixed Oscillating Water Column Wave Energy Converter At Steep Waves. *Proceedings of the ASME 2016 Power Conference*, POWER2016-59142.
- Torres, F.R.; Teixeira, P.R.F.; Didier, E. 2016. Study of the turbine power output of an oscillating water column device by using a hydrodynamic – Aerodynamic coupled model. *Ocean Engineering*, v.125, pp. 147-154.
- Lisboa, R.C.; Teixeira, P.R.F.; Didier, E. 2017. Regular and Irregular Wave Propagation Analysis in a Flume with Numerical Beach Using a Navier-Stokes Based Model. *Defect and Diffusion Forum*, v. 372, pp. 81-90.
- Vyzikas, T.; Deshoulières, S.; Barton, M.; Giroux, O.; Greaves, D.; Simmonds, D. 2017. Experimental investigation of different geometries of fixed oscillating water column devices. *Renewable Energy*, v. 107, pp. 248-258.
- Torres, F.R.; Teixeira, P.R.F.; Didier, E. 2018. A methodology to determine the optimal size of a wells turbine in an oscillating water column device by using coupled hydro-aerodynamic models. *Renewable Energy*, v. 121, pp. 9-18.
- Lee, H.H.; Chen, C.H. 2020. Parametric Study for an Oscillating Water Column Wave Energy Conversion System Installed on a Breakwater. *Energies*, v. 13.
- Guths, A.K.; Teixeira, P.R.F.; Didier, E. 2022. A novel geometry of an onshore Oscillating Water Column wave energy converter. *Renewable Energy*, v. 201, pp. 938-949.
- Qu, M.; Yu, D.; Li, Y.; Gao, Z. 2023. Effect of relative chamber width on energy conversion and mechanical characteristics of the offshore OWC device: A numerical study. *Energy*, v. 275.
- Ding, J.; Pang, S.; Chen, Z. 2023. Optimization of the chamber of OWC to improve hydrodynamic performance. *Ocean Engineering*, v. 287.
- Shadmani, A.; Nikoo, M.R.; Gandomi, A.H.; Wang, R.Q.; Golpalvar, B. 2023. A review of machine learning and deep learning applications in wave energy forecasting and WEC optimization. *Energy Strategy Reviews*, v. 49.
- Lópes, I.; Iglesias, G. 2014. Efficiency of OWC wave energy converters: A virtual laboratory. *Applied Ocean Research*, v. 44, pp. 63-70.



- George, A.; Cho, I.H.; Kim, M.H. 2021. Optimal Design of a U-Shaped Oscillating Water Column Device Using an Artificial Neural Network Model. *Processes*, v. 9.
- Silva, J.M.; Vieira, S.M.; Valério, D.; Henriques, J.C.C.; Sclavounos, P.D. 2021. Air pressure forecasting for the Mutriku oscillating-water-column wave power plant: Review and case study. *IET Renewable Power Generation*, v.15, pp. 3485-3503.
- Seo, D.; Huh, T.; Kim, M.; Hwang, J.; Jung, D. 2021. Prediction of Air Pressure Change Inside the Chamber of an Oscillating Water Column–Wave Energy Converter Using Machine-Learning in Big Data Platform. *Energies*, v. 14.
- Ahmad, I.; M'zoughi, F.; Aboutaleb, P.; Garrido, I.; Garrido, A.J. 2023. A regressive machine-learning approach to the non-linear complex FAST model for hybrid floating offshore wind turbines with integrated oscillating water columns. *Scientific Reports*, v. 13.
- Marvippilis, D.J. 1997. Unstructured Grid Techniques. *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, v. 29, pp. 473-514.
- Lima, Y.T.B.; Gomes, M.N.; Cardozo, C.F.; Isoldi, L.A.; Santos, E.D.; Rocha, L.A.O. 2019. Analysis of Geometric Variation of Three Degrees of Freedom through the Constructal Design Method for a Oscillating Water Column Device with Double Hidropneumatic Chamber. *Defect and Diffusion Forum*, v. 396, pp. 22-31.
- Letzlow, M.; Lorenzini, G.; Barbosa, D.V.E.; Hübner, R.G.; Rocha, L.A.O.; Gomes, M.N.; Isoldi, L.A.; Santos, E.D. 2020. Numerical Analysis of the Influence of Geometry on a Large Scale Onshore Oscillating Water Column Device with Associated Seabed Ramp. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, v. 15, pp. 873-884.
- Teixeira, P.R.F.; Didier, E. 2021. Numerical analysis of the response of an onshore oscillating water column wave energy converter to random waves. *Energy*, v. 220.
- Lima, Y.T.B.; Isoldi, L.A.; Santos, E.D.; Machado, B.N.; Gomes, M.N.; Biserni, C.; Rocha, L.A.O. 2024. Study of the Geometry of an Oscillating Water Column Device with Five Chambers Coupled under Regular Waves through the Constructal Design Method. *Fluids*, v.9.
- Montgomery, D.C. 2012. *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, v. 8.
- Stein, M. 1987. Large Sample Properties of Simulations Using Latin Hypercube Sampling. *Technometrics*, v. 29:2, pp. 143-151.
- Misiulia, D.; Elsayed, K.; Andersson, A.G. 2017. Geometry optimization of a deswirlor for cyclone separator in terms of pressure drop using CFD and artificial neural network. *Separation and Purification Technology*, v. 185, pp. 10-23.
- Yang, J.; Palazzolo, A. 2022. Deep convolutional autoencoder augmented CFD thermal analysis of bearings with inter pad groove mixing. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 188.
- Abadi, M. et al. 2015. TensorFlow: Large-Scale Machine Learning on Heterogeneous Distributed Systems. Software available from tensorflow.org.
- Chollet, F. et al. 2015. Keras. Available at: <https://github.com/fchollet/keras>.
- Géron, A. 2019. *Hands-on Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow*. O'Reilly Media, v. 2.
- Goswami, T.; Sinha, G.R. 2022. *Statistical Modeling in Machine Learning*. Academic Press, v. 1.
- Sheng, W.; Alcorn, R.; Lewis, A. 2013. On thermodynamics in the primary power conversion of oscillating water column wave energy converters. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, v. 5.
- Garcia-Teruel, A.; Forehand, D.I.M. 2021. A review of geometry optimisation of wave energy converters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 139.



DESIGN CONSTRUTAL APLICADO A UM DISPOSITIVO DE CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS DO MAR DE COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE COM DUAS CÂMARAS

1Esmael Thums, 2Lenon Audibert Cisco, 3Yuri Theodoro Barbosa de Lima, 4Flávia Schwarz Franceschini Zinani, 5Luiz Alberto Oliveira Rocha

1 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), UNISINOS, e-mail: esmathums@hotmail.com;
2 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), email: lenon.cisco@ufrgs.br; 3 Colégio João XXIII, Porto Alegre, RS, e-mail: yuritheodoro84@gmail.com;
4 Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: flavia.zinani@ufrgs.br;
5 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), e-mail: luizrocha@mecanica.ufrgs.br

Palavras-chave: Energia das ondas do mar; Coluna de água oscilante; Superfície de resposta; Design construtal.

Resumo

Entre as tecnologias para aproveitar a energia do movimento das ondas dos oceanos, os dispositivos de coluna de água oscilante (CAO) utilizam o movimento da superfície do mar para comprimir o ar contido em uma câmara hidropneumática conectada a um duto no qual encontra-se uma turbina acoplada a um gerador. Tendo em vista que os conversores de energia das ondas existentes possuem baixa eficiência e não há tecnologia em escala comercial, existe espaço para a inovação e melhoria deste tipo de dispositivo. O método Design Construtal (MDC) tem sido utilizado para melhorar a eficiência de conversão da energia disponível. Através da modelagem numérica e uso da fluidodinâmica computacional (CFD), tem-se estudado como a geometria dos conversores tem efeito no seu desempenho e como a mesma pode ser otimizada. No presente trabalho, o MDC é utilizado, com auxílio de técnicas de *Design of Experiments* (DoE) e de otimização, para, a partir de resultados de simulações de CFD, obter o design ótimo para um dispositivo CAO com duas câmaras acopladas. O sistema considerado é um dispositivo em escala real, sujeito a ondas regulares de comprimento igual a 65,4 m, período de 7,5 s e altura de 1 m. A razão de volumes entre as duas câmaras e as razões de aspecto de cada uma delas são os três graus de liberdade ($V1/V2$, $H1/L1$ e $H2/L2$) para buscar maximizar a potência extraída por ciclo de onda. Com a geração de uma superfície de resposta foi possível observar que o melhor dispositivo foi o que obteve $V1/V2 = 1,2$, $H1/L1 = 0,34$ e $H2/L2 = 0,1$, que corresponde a uma vazão mássica de 34,41 kg/s, uma pressão de 2643,031 Pa e uma potência hidropneumática de 8875,15 W.

Introdução

As mudanças progressivas no modo de vida da humanidade repercutem em um aumento exponencial do consumo de energia. Com a escassez e os efeitos adversos da utilização em larga escala de fontes fósseis, houve um avanço relevante na utilização de energias renováveis. Neste cenário, uma fonte pouco aproveitada e com potencial relevante é a energia proveniente das ondas do mar. O aquecimento irregular da superfície do planeta através da radiação solar provoca a movimentação das massas de ar da atmosfera, que ao interagirem com o oceano geram ondas de superfície, ondas estas que podem viajar por longas distâncias sem perder quantidades significativas de energia (Dean e Dalrymple, 1991).

Estudos como os de Estefen (2003), estimam a potência instantânea global das ondas oceânicas em cerca de 10 TW. Para sua conversão em eletricidade, abordagens físicas, como dispositivos de coluna de água oscilante (CAO) e corpos flutuantes (Absorção Pontual, Progressivos e Galgamento), são destacadas por Cruz e Sarmento (2004). A potência teórica para energia das ondas na costa do Brasil é de 91,8 GW, com as ondas mais energéticas concentradas na região sul do Brasil, apresentando uma média de 21,1 kW/m de frente de onda (Shadman *et al.* 2019).

No presente trabalho é realizado um estudo numérico de avaliação geométrica de um dispositivo CAO, composto por duas câmaras acopladas em uma escala real de mar aberto, utilizando a metodologia de *Design Construtal*. As simulações foram realizadas através do Método dos Volumes Finitos (MVF) utilizando o software ANSYS Fluent R2 2022. O objetivo geral foi maximizar a potência hidropneumática convertida em dispositivos CAO sob ondas incidentes regulares em um modelo bidimensional.

De forma específica, a avaliação da eficiência das duas câmaras acopladas com diferentes geometrias, mantendo o volume total constante, a análise dos efeitos dos graus de liberdade $H1/L1$, $H2/L2$ e $V1/V2$ na potência convertida com diferentes geometrias, a determinação da geometria otimizada para o dispositivo CAO e a potência máxima convertida para as duas câmaras, bem como a comparação do desempenho das geometrias das duas câmaras do CAO com as geometrias previamente encontradas por Lima em 2021 foram realizadas.

As ondas oceânicas podem ser caracterizadas por três elementos: o período (T), que representa o tempo de uma oscilação completa, a altura (H), que mede a diferença entre a crista e a cava da onda, e a profundidade (h), que é a distância entre a linha média da onda e o leito do mar (Chakrabarti, 2005).



O dispositivo de Coluna de Água Oscilante (CAO) é uma tecnologia de geração de energia oceânica altamente pesquisada devido às suas vantagens, incluindo a possibilidade de instalação próxima da costa, operação simplificada e baixo custo de manutenção. O primeiro modelo CAO, proposto por Yoshio Masuda nos anos 60, envolve uma câmara hidropneumática que utiliza o movimento vertical das ondas para comprimir e descomprimir o ar, forçando-o a passar por uma turbina acoplada a um gerador elétrico (Cruz e Sarmento, 2004; Delmonte *et al.*, 2016). Isso torna o CAO uma opção atraente para a geração de energia elétrica.

Os dispositivos CAO operam com uma câmara semi-submersa, aberta na parte inferior da superfície da água, onde o movimento das ondas causa variações no nível da água, desencadeando um fluxo de ar que aciona uma turbina. São utilizadas turbinas do tipo Wells, que mantém a mesma direção de rotação das pás, independentemente da direção do fluxo de ar. No entanto, a eficiência das turbinas Wells em alguns cenários fica em torno de 20% a 30%, indicando que apenas uma parte da energia das ondas é convertida eficazmente em eletricidade devido a diversos fatores, como perdas mecânicas, resistência da água, desafios na captura de energia de ondas de diferentes direções e as complexidades do ambiente marinho (Cruz e Sarmento, 2004).

O método de *Design Construtal* tem sido amplamente utilizado na engenharia para avaliação de geometrias em problemas de mecânica dos fluidos e transferência de calor. Esta pesquisa representa uma contribuição significativa, pois investigou a variação geométrica de dispositivos de Coluna de Água Oscilante (CAO) com câmaras acopladas, um tema inovador que vem sendo desenvolvido desde o trabalho de Lima (2021). Estudos conduzidos demonstraram que o *Design Construtal* permitiu definir geometrias com desempenho até dez vezes superior ao caso padrão e identificar as configurações mais eficientes para câmaras CAO *offshore*, contribuindo para melhorar a eficiência desses dispositivos.

Materiais e métodos

A metodologia de *Design Construtal* se baseia na ideia de que, em sistemas com tamanho finito, melhor desempenho está a o quanto mais fáceis são os escoamentos que mantêm aquele sistema vivo. Assim, são estabelecidos restrições e graus de liberdade para mudar a configuração dos sistemas de modo a facilitar seus fluxos e se chegar à configuração de melhor desempenho, conforme fluxograma mostrado na Figura 1. Nota-se que o método é baseado em evolução, pois uma configuração ou design não é definitivo, somente é o melhor design para um dado momento em que não se pode estabelecer mais liberdade ao sistema. Com mais liberdade, relaxação de restrições e aplicação de conceitos como ramificação e hierarquia, os sistemas tendem a melhorar seu desempenho.

O primeiro passo no método de *Design Construtal* envolve a definição dos sistemas a serem estudados, que neste caso consistem em dispositivos de Coluna de Água Oscilante (CAO) bidimensionais com duas câmaras acopladas e posicionados em um tanque de ondas numéricas. Nesse contexto, os fluidos em análise são o ar e a água com o objetivo de converter a energia cinética e potencial desses fluidos em energia elétrica. Vale ressaltar que o tanque de ondas numéricas foi modelado para representar as condições reais das ondas da praia da cidade de Rio Grande, no Rio Grande do Sul (Letzow, 2020).

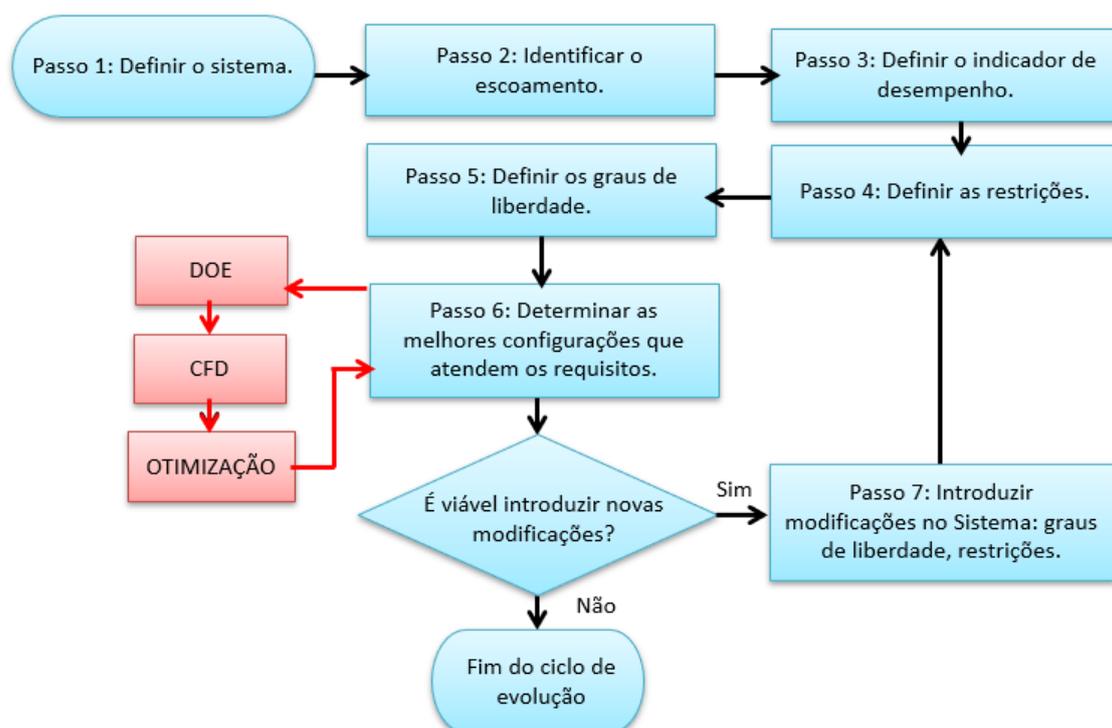


Figura 1: Fluxograma da aplicação do *design construtal*
 Fonte: Elaborado pelo autor (2024)



A altura do tanque é calculada somando-se a profundidade do tanque a três vezes a altura da onda, seguindo a descrição de Gomes (2014). A onda utilizada neste estudo representa as características das ondas no litoral sul brasileiro em escala real. Os parâmetros da onda, incluindo altura e período, foram determinados com base nas propriedades das ondas nessa região. A Tabela 1 apresenta as dimensões do tanque e os detalhes da onda considerados, sendo os valores definidos com base nas condições observadas na cidade de Rio Grande, no Sul do Brasil, conforme relatado nos estudos de Letzow (2020).

Tabela 1: Condições de entrada e clima de ondas

Condições de Domínio	Valores
Período da Onda	7,5 s
Comprimento da onda	65,4 m
Altura da onda	1 m
Profundidade Livre	10 m
Comprimento do Tanque	327 m
Altura do Tanque	14 m

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A geometria utilizada para o estudo pode ser visualizada na Figura 2, onde temos um canal de ondas, com duas câmaras sequenciais. As condições de contorno podem ser identificadas no domínio, onde em verde temos saídas de pressão, em preto a condição de parede, pontilhado em vermelho temos a região de praia numérica, e por fim a linha em azul representa o nível médio de água. A praia numérica é um artifício de simulação que acrescenta um amortecimento na região final do domínio.

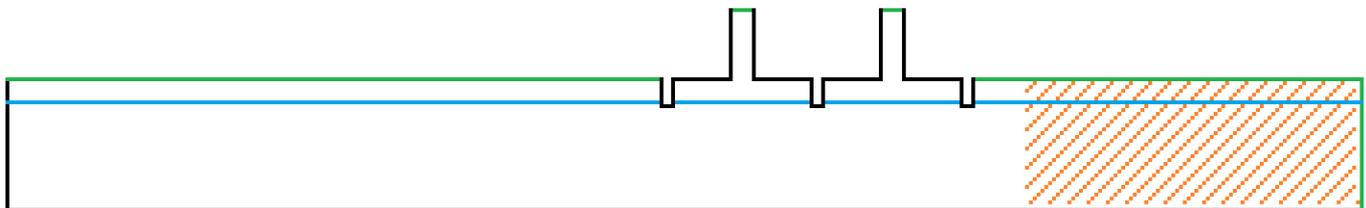


Figura 2: Geometria total de simulação, com simbologia para identificação das condições de contorno.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A malha utilizada para a simulação foi gerada com refinamento nas regiões da superfície livre de água e nas câmaras hidropneumáticas. A Figura 3 traz a malha com destaque para os refinamentos. Para realizar o teste de qualidade de malha foi performado o teste de GCI (*grid convergence index*), apresentado nos resultados.

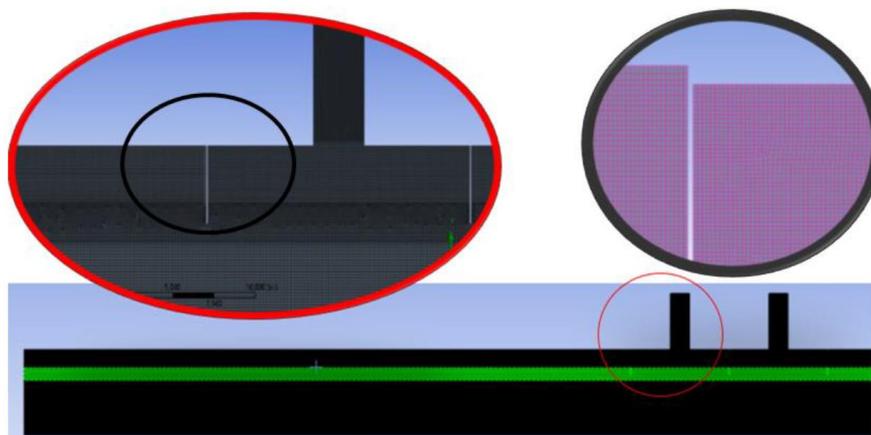


Figura 3: Malha computacional utilizada com destaque para os refinamentos em regiões de interesse.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Como esse trabalho aborda uma simulação com domínio bidimensional, identificou-se que as restrições são o volume das câmaras hidropneumáticas (V_{en}) e os volumes totais (V_{tn}), onde n é 2, uma vez que o problema trata de duas câmaras acopladas e w é constante e igual a 1, por se tratar de um problema bidimensional. Considera-se para o problema ondas na escala real com período de 7,5 s e 65,4 m de comprimento de onda (Lima, 2021). As dimensões dos volumes das câmaras e total podem

ser obtidas segundo as expressões (1) e (2).

$$V_{en} = (H_n)(L_n)(w) \quad (1)$$

$$V_{tn} = V_{en} + (H_j)(L_n)(w) \quad (2)$$

São estabelecidos os graus de liberdade, restrições e equações que governam as dimensões do dispositivo CAO. No caso deste dispositivo, os graus de liberdade abordados incluem as proporções entre altura e largura das câmaras hidropneumáticas ($H1/L1$, $H2/L2$) e o volume dessas câmaras ($V1/V2$), como ilustrado na Figura 4.

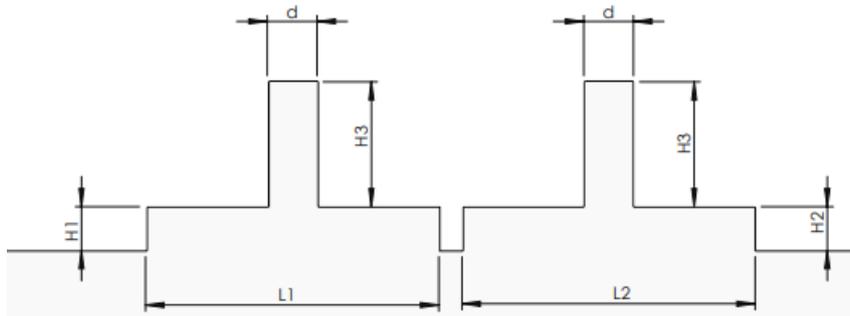


Figura 4: Parâmetros geométricos avaliados nos dispositivos CAO.

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Com as recomendações feitas por Gomes (2014), se utilizará $L = \lambda/2$ como parâmetro de referência para determinação do campo experimental, com o diâmetro $d = 3,056$ m e $H_3 = 9.1698$ m como valores fixos para as simulações.

Os graus de liberdade serão variados dentro das seguintes faixas:

$$0,2 \leq V1/V2 \leq 0,8;$$

$$0,25 \leq H1/L1 \leq 1;$$

$$0,25 \leq H2/L2 \leq 1.$$

Neste estudo, utilizou-se o indicador de eficiência hidrodinâmica no contexto do método de *Design Construtal*, definido como a relação entre a potência gerada e a potência incidente das ondas. De acordo com Brendmo, Falnes e Lillebekken (1996), o movimento da água dentro do dispositivo CAO é comparado a um pistão em movimento vertical, e a potência hidropneumática associada a essa superfície livre em movimento vertical pode ser expressa como:

$$P_{hid} = \frac{A}{T} \int_t^{t+T} p(t)V_y(t)d(t) \quad (3)$$

onde A é a área da chaminé, $p(t)$ a pressão do ar na metade da altura da chaminé e $V_y(t)$ a velocidade do ar através da chaminé no mesmo ponto da pressão.

Segundo Rodrigues (2018), a energia associada as ondas é a soma da energia cinética e da energia potencial, diretamente ligada as deformações da superfície contra a força da gravidade e as partículas. Assim, tem-se a equação da energia total:

$$E_w = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (4)$$

A energia total que uma onda pode transportar é dada pela equação:

$$E_t = E_w C_g \quad (5)$$

A potência máxima atingida por um dispositivo CAO retangular e de largura W é calculada pela Equação (6):

$$E_w = \frac{1}{8} \rho g H^2 C_g \quad (6)$$

A densidade de potência P_{onda} , dada em W/m , associada ao clima de ondas é caracterizada segundo a Equação (7) (GREAVES; IGLESIAS, 2018):



$$P_{onda} = \frac{\rho g A^2 \omega}{4K} \left(1 + \frac{2kh}{\sin(2kh)} \right) \quad (7)$$

Desta forma, o indicador de desempenho do dispositivo CAO, a eficiência hidrodinâmica ε é dada por (Greaves; Iglesias, 2018):

$$\varepsilon = \frac{P_{hid}}{P_{onda} Z} \quad (8)$$

A etapa de simulação é realizada conforme Cunegatto (2023) usando o método *Central Composite Design* (CCD), apropriado para regressões de primeira ordem ou superiores. O CCD é um modelo fatorial 2k com pontos centrais e axiais, onde k é o número de fatores. Esse arranjo de pontos permite uma avaliação inicial do comportamento da variável de resposta no espaço experimental. O CCD é usado para rastrear a região de máximo no espaço de busca, seguido por planejamentos CCD mais restritos até alcançar o máximo global. A implementação é feita em R Statistic, por meio do ambiente RStudio. A Tabela 2 apresenta os valores utilizados na configuração do modelo CCD.

Após a obtenção dos resultados numéricos, uma análise utilizando a metodologia de superfície de resposta é realizada (RSM). Essa abordagem cria uma superfície de resposta ou otimização a partir de um modelo de regressão que descreve a relação entre as variáveis independentes e uma superfície de resposta (Q^*), oferecendo uma representação aproximada da realidade do problema. A qualidade do modelo de regressão é avaliada com base no coeficiente de determinação (R^2) e no erro absoluto médio (MAE), conforme descrito por Cunegatto (2023).

Após estabelecer os procedimentos para a simulação do problema e definir a metodologia de *design construtal*, é crucial determinar as superfícies de monitoramento, que consistem em sondas ou áreas distribuídas no domínio computacional para coletar dados em cada iteração. A interpretação dos resultados é conduzida com base nessas sondas. Nesta seção, as sondas usadas em um dos modelos de duas câmaras empregados no estudo serão apresentadas.

Tabela 2: Limites das variáveis independentes para determinação do campo experimental inicial via CCD

	x1	x2	x3	v1/v2	H1/L1	H2/L2	H1	L1	L2	H2
Default	1	1	1	-	-	-	5,493	15,822	15,822	5,493
caso_1	1,2	0,175	0,175	0,885	0,218	0,132	3,661	16,771	22,959	3,024
caso_2	0,885	0,218	0,132	1,115	0,132	0,132	3,014	22,886	21,669	2,854
caso_3	1,115	0,132	0,218	1,000	0,175	0,100	3,383	19,333	25,575	2,558
caso_4	1	0,25	0,175	1,000	0,175	0,250	3,383	19,333	16,175	4,044
caso_5	0,885	0,132	0,218	1,000	0,250	0,175	4,044	16,175	19,333	3,383
caso_6	0,885	0,132	0,132	1,115	0,218	0,218	3,881	17,776	16,831	3,674
caso_7	0,885	0,218	0,218	0,885	0,132	0,218	2,844	21,592	17,832	3,893
caso_8	0,8	0,175	0,175	0,885	0,132	0,132	2,844	21,592	22,959	3,024
caso_9	1	0,175	0,25	0,885	0,218	0,218	3,661	16,771	17,832	3,893
caso_10	1	0,1	0,175	1,000	0,175	0,175	3,383	19,333	19,333	3,383
caso_11	1,115	0,132	0,132	0,800	0,175	0,175	3,190	18,227	20,379	3,566
caso_12	1	0,175	0,1	1,115	0,132	0,218	3,014	22,886	16,831	3,674
caso_13	1	0,175	0,175	1,000	0,175	0,175	3,383	19,333	19,333	3,383
caso_14	1	0,175	0,175	1,000	0,100	0,175	2,558	25,575	19,333	3,383
caso_15	1,115	0,218	0,132	1,200	0,175	0,175	3,534	20,193	18,433	3,226
caso_16	1,115	0,218	0,218	1,115	0,218	0,132	3,881	17,776	21,669	2,854

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

A Figura 5 esquematiza as posições das sondas para o problema em análise. Em cada cenário, as posições das sondas se ajustam à variação geométrica do dispositivo, garantindo consistência nas medições em diferentes configurações. É importante observar que as posições das sondas variam de acordo com a geometria específica da câmara CAO.

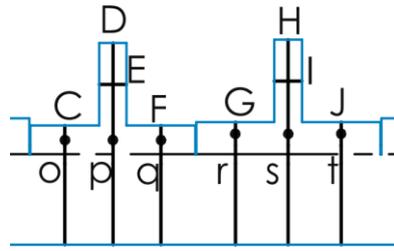


Figura 5: Sondas de monitoramento.
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A média aritmética da elevação da superfície livre medida nas linhas de monitoramento indica a elevação de água no interior das câmaras do dispositivo CAO.

Nas sondas *o*, *p*, *q*, *r*, *s* e *t* é feita a medida da pressão total, que para o presente trabalho são usadas para o cálculo da média aritmética para problemas transientes *Root Mean Square* (RMS) (El Marjani *et al.*, 2006):

$$X = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 dt} \tag{9}$$

onde *X* é a grandeza que se deseja calcular a média de RMS.

A determinação do passo de tempo para as simulações numéricas foi um aspecto relevante. Utilizou-se um passo de tempo de 0,01 s em todas as simulações, com tempo total de simulação de 100 s. O uso da praia numérica reduziu os efeitos de reflexão das ondas, possibilitando a análise do escoamento transiente e laminar. A Tabela 3 resume todos os parâmetros e esquemas numéricos utilizados nas simulações.

Dada a natureza bifásica do problema, para a resolução das equações envolvendo ar e água no sistema, utilizou-se o Método *Volume of Fluid* (VOF), originalmente proposto por Hirt e Nichols (1981). Esse método é empregado para solucionar escoamentos multifásicos de fluidos imiscíveis. No modelo adotado, cada fase é representada como uma fração volumétrica, em que $0 < \alpha < 1$, com a restrição completa de que a soma das frações volumétricas para todas as fases em um determinado ponto de controle seja igual a 1.

Tabela 3: Parâmetros aplicados a simulação

Formulação	Parâmetros Utilizados na Simulação
Solução no tempo	Transiente
	Formulação implícita (1ª Ordem)
	<i>Pressure Based</i>
Método <i>VoF</i>	Sem avanço iterativo
	Formulação explícita
Controle da Solução	Acoplamento pressão-velocidade PISO
	Discretização da pressão via PRESTO!
	Formulação da quantidade de movimento: <i>Upwind</i> de 1ª ordem
	Discretização da fração geométrica via <i>Geo-Reconstruct</i>

Fonte: o autor (2024)

Resultados e discussão

A verificação da modelagem matemática visa assegurar a correta implementação do código computacional e das condições de contorno, enquanto a validação avalia a adequação do modelo escolhido para descrever o fenômeno físico. Conforme indicado por Lima *et al.* (2019), uma abordagem inicial de validação é testar o modelo VOF na simulação do dispositivo CAO, verificando se a onda gerada possui as características previamente definidas. Para isso, na simulação da geração de ondas regulares em um tanque de ondas, a elevação da superfície livre pode ser determinada de forma analítica.

Em primeiro momento, é performada a avaliação de qualidade de malha, via GCI (*Grid Convergence Index*). Três malhas foram testadas, variando de 245 mil elementos a 800 mil elementos. A tabela 4 apresenta os resultados do GCI para as variáveis simuladas. Com os resultados de GCI, optou-se por utilizar a malha intermediária de 465 mil elementos.



Tabela 4: Valores de GCI para a malha

	Número de elementos	Média da Vazão Mássica (kg/s)	Vazão mássica no último instante de tempo (kg/s)
Malha 1	245 015	0,437	0,911297
Malha 2	465 420	0,43717652	0,893652
Malha 3	800 556	0,44653322	0,887807
GCI		0,00099%	1,43%

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Após a avaliação da malha, a verificação do modelo numérico foi conduzida ao comparar a elevação da superfície livre ao longo do tempo, especificamente na posição $x = 90$ metros, obtida numericamente, com a solução analítica correspondente mencionada anteriormente. A Figura 6 ilustra a comparação entre os resultados analíticos e numéricos nessa posição. A análise instantânea das diferenças entre as soluções numéricas e analíticas revelou uma média de 2,03%, variando de 0,0044% a 5,90%. Esses resultados atestam a precisão do modelo utilizado.

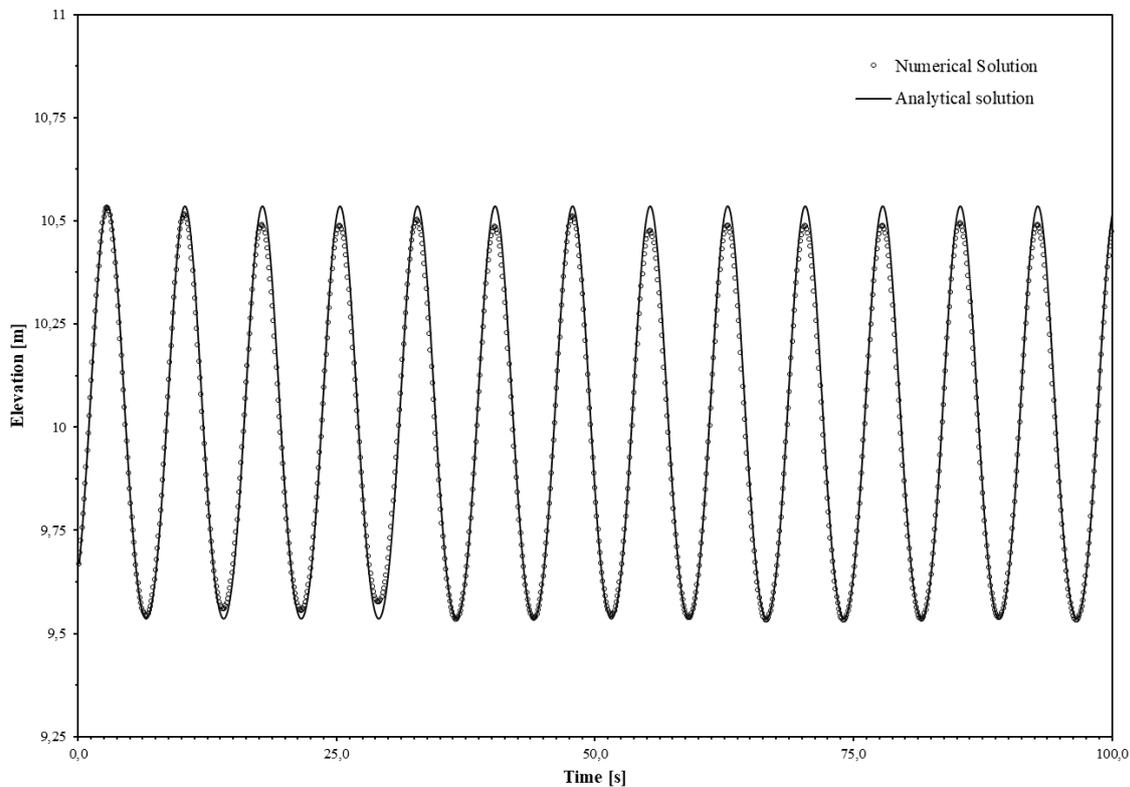


Figura 6: Validação do perfil de elevação da onda.

Fonte: o autor (2024)

A análise levou à obtenção de uma superfície de resposta, que pode ser representada graficamente em um modelo tridimensional ou por meio de uma projeção bidimensional desse modelo. A variável dependente (m) foi demonstrada como uma função intrínseca das variáveis independentes ($V1/V2$, $H1/L1$ e $H2/L2$). Isso evidencia a interdependência entre essas variáveis na configuração da superfície de resposta. A potência da onda incidente utilizada possui o valor de 5692,65 W para os casos de ondas regulares.

As superfícies de resposta delineadas nas Figuras 7 e 8 oferecem uma representação visual que permite identificar e avaliar o impacto das variáveis independentes sobre a variável dependente em todo o intervalo experimental. As curvas numeradas representam os valores de (m), sendo que as áreas mais claras indicam o máximo de resposta. Ao combinar a análise com a perspectiva visual (Figura 8), é possível identificar o ponto de máxima resposta na superfície, uma região alinhada com os objetivos da pesquisa.

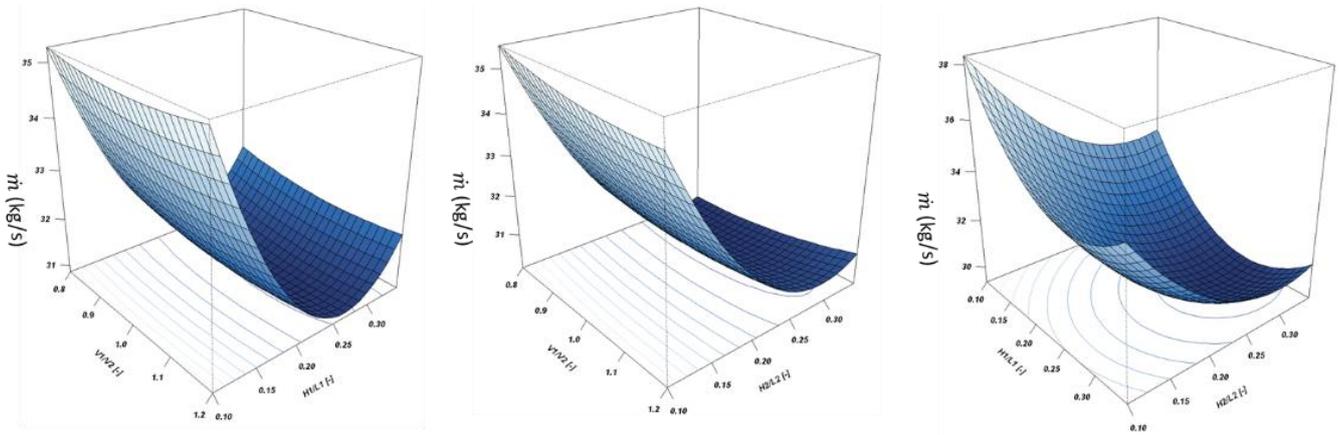


Figura 7: Superfície de Resposta em 3D para Vazão Mássica
 Fonte: o autor (2024)

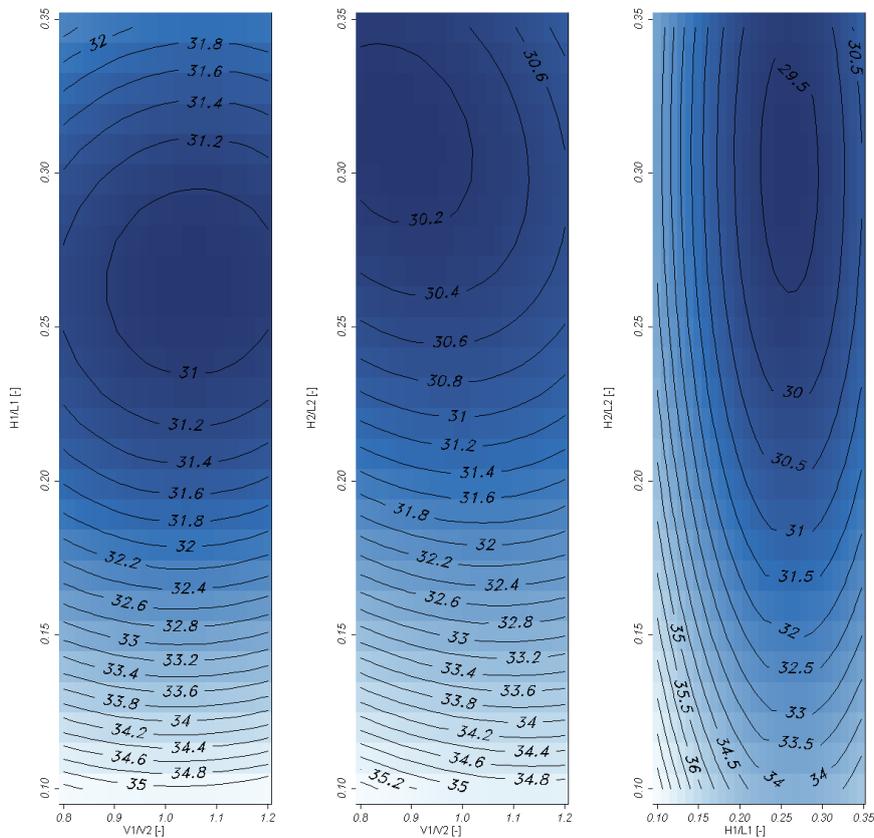


Figura 8: Superfície de resposta em 2D para vazão mássica.
 Fonte: o autor (2024)

Com os resultados de vazão mássica, pressão e potência, pode-se encontrar qual a configuração de dispositivo com maior capacidade de geração de energia. Utilizando os casos apresentados acima e com o uso do software R, é possível obter o melhor design para o dispositivo. A Tabela 5 demonstra as medidas usadas nos dispositivos e as medidas aplicadas ao melhor caso.



Tabela 5: Identificação dos melhores valores otimizados para cada parâmetro

Caso	H1 (m)	L1 (m)	H2 (m)	L2 (m)	V1 (m³)	V2 (m³)	V1/V2	H1/L1	H2/L2
1	3,66	16,77	3,02	22,96	61,40	69,42	0,88	0,22	0,13
2	3,01	22,89	2,85	21,67	68,98	61,84	1,12	0,13	0,13
3	3,38	19,33	2,56	25,58	65,41	65,41	1,00	0,18	0,10
4	3,38	19,33	4,04	16,18	65,41	65,41	1,00	0,18	0,25
5	4,04	16,18	3,38	19,33	65,41	65,41	1,00	0,25	0,18
6	3,88	17,78	3,67	16,83	68,98	61,84	1,12	0,22	0,22
7	2,84	21,59	3,89	17,83	61,40	69,42	0,88	0,13	0,22
8	2,84	21,59	3,02	22,96	61,40	69,42	0,88	0,13	0,13
9	3,66	16,77	3,89	17,83	61,40	69,42	0,88	0,22	0,22
10	3,38	19,33	3,38	19,33	65,41	65,41	1,00	0,18	0,18
11	3,19	18,23	3,57	20,38	58,14	72,68	0,80	0,18	0,18
12	3,01	22,89	3,67	16,83	68,98	61,84	1,12	0,13	0,22
13	3,38	19,33	3,38	19,33	65,41	65,41	1,00	0,18	0,18
14	2,56	25,58	3,38	19,33	65,41	65,41	1,00	0,10	0,18
15	3,53	20,19	3,23	18,43	71,36	59,46	1,20	0,18	0,18
16	3,88	17,78	2,85	21,67	68,98	61,84	1,12	0,22	0,13
Exelente	4,6158	13,2983	2,6351	26,3510	61,3826	69,4374	0,8840	0,3471	0,1000

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A partir das medidas de H1, L1, H2 e L2 é possível construir a geometria apresentada pelo software R (Figura 9). Observa-se que, nesse caso, a primeira câmara passa da altura do dispositivo, algo que ocorreu apenas no caso 5. Pode-se observar também que a câmara 2 possui uma largura que representa aproximadamente o dobro da câmara 1.

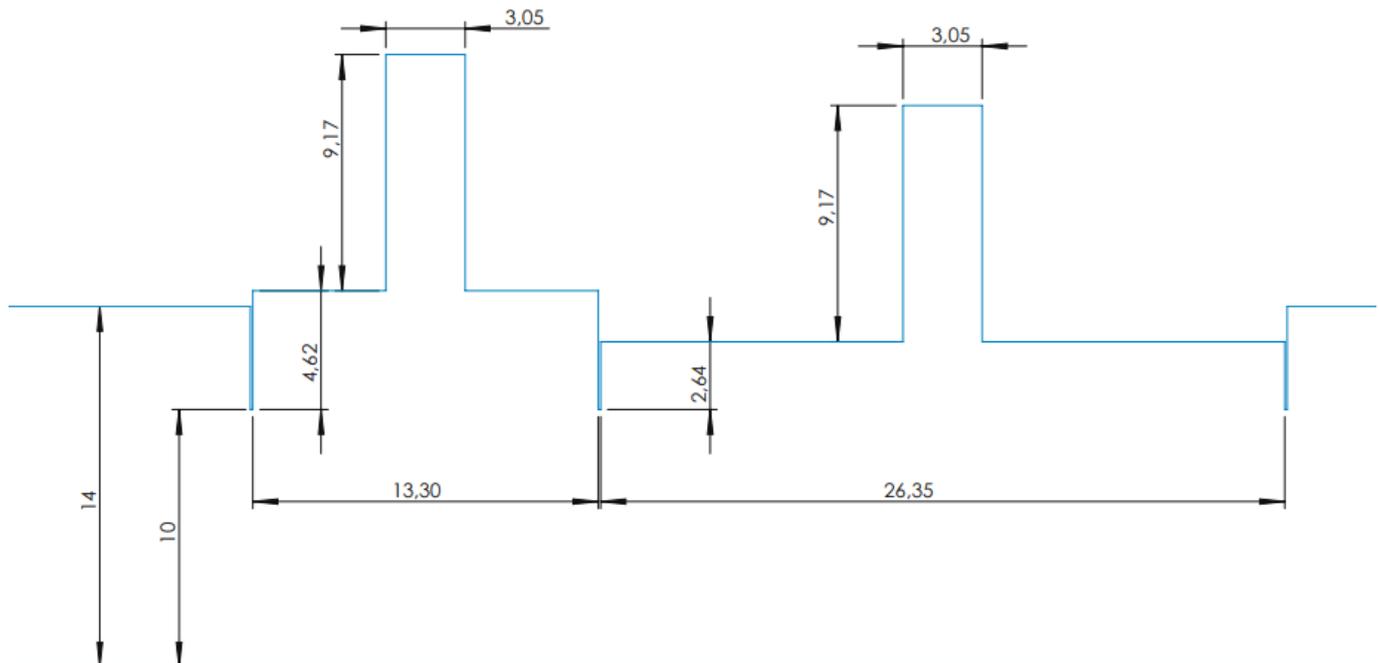


Figura 9: Geometria de dispositivo ótimo.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Considerações finais

O cerne desta pesquisa reside na exploração da aplicabilidade do método *Design Construtal* e sua relevância na análise de aspectos importantes de engenharia. A mencionada abordagem metodológica foi empregada na investigação de um dispositivo caracterizado de coluna de água oscilante composto por duas câmaras acopladas.

Em primeiro momento foi avaliada a qualidade de malha, obtendo um GCI máximo de 1,43%, e a geração da onda foi validada analiticamente, com uma divergência média de aproximadamente 2%, indicando que os métodos utilizados são capazes de reproduzir o fenômeno físico com acurácia. A partir destas avaliações, diversas geometrias foram avaliadas utilizando as restrições aplicadas para o método *Design Construtal* e em conjunto com o *Design of Experiments*.

Para os casos que foram investigados, os maiores valores de eficiência hidrodinâmica foram encontrados para as



geometrias onde a segunda câmara é maior que a primeira. Isto ocorre pelo método de otimização encontrar um equilíbrio entre as duas câmaras, onde a primeira recebe uma onda mais energética, e a segunda câmara necessita de uma área maior para cooptar uma quantidade melhor de energia. As dimensões obtidas para o dispositivo ótimo dentro dos limites avaliados apresentam uma câmara mais alta e estreita seguida por uma câmara com altura reduzida porém com um comprimento total de aproximadamente duas vezes o da primeira câmara. Esta geometria é considerada a geometria ótima para um dispositivo CAO nas condições de onda avaliadas. Para diferentes regimes de onda, diferentes geometrias podem resultar em maior eficiência.

A aplicação da metodologia *DoE* permitiu a avaliação de um espectro maior de geometrias, dentro dos intervalos definidos durante a especificação do problema, utilizando o *Design Construtal*. Portanto, é evidente que a organização das geometrias desta forma e com estes métodos pode resultar na otimização do desempenho do dispositivo. Proporcionando assim, uma base teórica para a potencial construção dos dispositivos examinados. Isso é especialmente relevante, uma vez que o problema em questão diz respeito a dispositivos em escala real. Além disso, as dimensões do dispositivo estão diretamente relacionadas às características das ondas, permitindo que o presente modelo computacional e o método *Design Construtal* sejam empregados para fornecer informações teóricas na criação do protótipo CAO. Isso possibilitará a máxima captura de energia das ondas em locais com condições adequadas.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. F. Zinani agradece as agências CNPq (311444/2021-0), FAPERGS (21/2551-0002169-1) e Fundação para a Ciência e Tecnologia, I.P. (doi.org/10.54499/UIIDP/04683/2020; doi.org/10.54499/UIDB/04683/2020). L. Rocha agradece o CNPq (Proc. No. 307791/2019-0).

Referências Bibliográficas

Brendmo, A.; Falnes, J. Lillebekken, P. M. Linear Modelling Of Oscillating Water Columns Including Viscous Loss. *Applied Ocean Research*. V. 18, N. 2-3, P. 65-75, 1996.

Chakrabarti, S. K., *Handbook Of Offshore Engineering*, Vol. 1, Elsevier, Illinois, Estados Unidos, 661 P., 2005.

Cruz, J. M. B. P., Sarmiento, A. J. N. A. Energia Das Ondas: Introdução Aos Aspectos Tecnológicos, Econômicos E Ambientais. Ed. Instituto De Ambiente, Amadora, 61 P., 2004.

Cunegatto, E.H.T. Design Construtal Para Alto Desempenho Em Arranjos De Tubos E Micromisturadores Via Simulação Numérica. Dissertação - Mestrado Em Engenharia Mecânica – Universidade Do Vale Do Rio Dos Sinos, 2023.

Dean, R. G., Dalrymple, R. A., *Water Wave Mechanics For Engineers And Scientists*, Vol. 2, World Scientific, Singapura, 353 P., 1991.

Delmonte, N. Et Al. Review Of Oscillating Water Column Converters. *Ieee Transactions On Industry Applications*, [S.I], V. 52, N.2, P. 1698-1710, 2016.

El Marjani, A. Et Al. 3d Unsteady Flow Simulation In An Owc Wave Converter Plant. In: *International Conference On Renewable Energy And Power Quality-Icrepq'06*. 2006.

Estefen, S. F., Fernandes, A. C., Esperança, P. D. T. T., Et Al., 2003. "Energia Das Ondas". In: M. T. Tolmasquim, Ed., *Fontes Renováveis De Energia No Brasil*, Capítulo 10, Rio De Janeiro: Interciência Ltda., Pp.485-515

Gomes, Mateus Das Neves. Constructal Design De Dispositivos Conversores De Energia Das Ondas Do Mar Em Energia Elétrica Do Tipo Coluna De Água Oscilante. 2014. Tese -Doutorado Em Engenharia Mecânica – Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 2014.

Greaves, D.; Iglesias, G. *Wave And Tidal Energy*. 1a. Ed. Hoboken: Wiley, 2018. Iii P.

Letzow, M., Lorenzini, G., Barbosa, D. V. E., Hübner, R. G., Rocha, L. A. O., Gomes, M. N., Isoldi, L. A., Dos Santos, E. D., Numerical Analysis Of The Influence Of Geometry On A Large Scale Onshore Oscillating Water Column Device With Associated Seabed Ramp, *International Journal Of Design & Nature And Ecodynamics*, Vol. 15, No. 6, Pp. 873 – 884, 2020.

Lima, Y. T. B., Gomes, M. N., Isoldi, L. A., Santos, E. D., Rocha, L. A. O., Analysis Of Geometric Variation Of Three Degrees Of Freedom Through The Constructal Design Method For A Oscillating Water Column Device With Double Hydropneumatic Chamber. In: *Defect And Diffusion Forum*. Trans Tech Publications, Vol. 396, Pp. 22-31. 2019.

Lima, Yuri Theodoro Barbosa Et Al. Geometric Analysis Through The Constructal Design Of A Sea Wave Energy Converter With Several Coupled Hydropneumatic Chambers Considering The Oscillating Water Column Operating Principle. *Applied Sciences*, V. 11, N. 18, P. 8630, 2021.



Rodrigues, L. Modelagem Computacional Da Propagação De Espectro De Ondas Em Tanques. Dissertação - Mestrado Em Modelagem Computacional. Universidade Federal Do Rio Grande. 2018.

Shadman, Milad; Silva, Corbiniano; Faller, Daiane; Wu, Zhijia; Assad, Luiz De Freitas; Landau, Luiz; Levi, Carlos; Estefen, Segen. Ocean Renewable Energy Potential, Technology, And Deployments: A Case Study Of Brazil. Energies, [S.L.], V. 12, N. 19, P. 3658-3695, 25 Set. 2019. Mdpi Ag. [Http://Dx.Doi.Org/10.3390/En12193658](http://Dx.Doi.Org/10.3390/En12193658).



PRODUÇÃO DE PELLETS DE RESÍDUOS DE PODAS DE ÁRVORES PARA UTILIZAÇÃO COMO BIOCOMBUSTÍVEL: ESTUDO DE CASO DA ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA (EEL/USP)

1Giovana Netto Scareli, 2Erica Leonor Romão

1 Escola de Engenharia de Lorena - Universidade de São Paulo, giovanascarelli@usp.br; 2 Escola de Engenharia de Lorena - Universidade de São Paulo, ericaromão@usp.br

Palavras-chave: Adensamento; pellets; sustentabilidade.

Resumo

Os resíduos de biomassa provenientes da poda de árvores apresentam um potencial energético significativo devido à sua composição lignocelulósica rica em carbono. A biomassa vegetal, por ser derivada de fontes renováveis e neutra em emissões de gases de efeito estufa, tem sido objeto de diversas pesquisas. No entanto, apesar da importância do reaproveitamento, as podas de árvores têm sido negligenciadas em comparação com outros tipos de biomassa, tornando-se um desafio aos municípios. Uma alternativa viável para o aproveitamento desses resíduos é a peletização, que os transforma em biocombustível, padronizando seu tamanho para facilitar manuseio, transporte e armazenamento. Contudo, a produção de *pellets* a partir da poda de árvores enfrenta dificuldades devido à diversidade de espécies e à presença de troncos, galhos, ramos e folhas nesse material. Nesse contexto, este estudo buscou avaliar as características das podas de árvores frutíferas, como mangueira e pitangueira, da Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo (EEL/USP), no processo de peletização. Foram realizados ensaios de peletização com três diferentes teores de umidade das podas de árvores frutíferas (5%, 10% e 15%), com base em dados obtidos por meio de uma revisão de artigos. As amostras de *pellets* produzidas foram analisadas quanto à densidade aparente e à durabilidade mecânica. Verificou-se que as amostras com teores de umidade de 10% e 15% atenderam à norma europeia EN 14961-1:2010 em relação à densidade aparente. Entretanto, a durabilidade mecânica aumentou com o aumento do teor de umidade, variando de 62,13% a 89,70%, abaixo do limite estabelecido pela norma ($\leq 97,5\%$). Novos ensaios serão conduzidos com o objetivo de atender a esse parâmetro. Espera-se, dessa forma, que esse estudo contribua para a adequada utilização das podas de árvores como um novo recurso para a geração de energia, além de promover a gestão ambiental da Universidade de São Paulo.

Introdução

A gestão dos resíduos sólidos urbanos emerge como um dos desafios mais prementes na contemporaneidade, impulsionado pelo crescimento populacional e pela expansão dos padrões de consumo, que incrementam a produção de resíduos sólidos nas áreas urbanas. Dentro dessa gama de resíduos, destacam-se os provenientes da poda de árvores, frequentemente encaminhados para aterros sanitários. No entanto, as podas de árvores representam uma problemática nesses locais de disposição, dada sua natureza volumosa, de difícil compactação e com características distintas de decomposição (Alves, 2020; Pradhan et al., 2018).

Diante desse cenário, algumas administrações municipais têm buscado alternativas para o manejo desses resíduos, visando prolongar a vida útil dos aterros. Essa preocupação se justifica pela significativa quantidade de resíduos gerados pela poda de árvores. Segundo dados de Reis (2020), a Prefeitura de São Paulo coletou mais de 80 mil toneladas de resíduos de varrição em 2019, sendo parte desse volume composto por resíduos de poda.

Diferentes formas de biomassa têm sido objeto de estudo, incluindo os resíduos provenientes da poda de árvores frutíferas (Jacinto, 2017; Brand e Jacinto, 2020; Li et al., 2017) Esses resíduos apresentam um elevado potencial energético devido à sua composição química rica em carbono, característica dos materiais lignocelulósicos. Contudo, sua utilização enfrenta desafios, como a volumosidade, baixa densidade aparente e dificuldade no manuseio (Castelano, 2015). Uma alternativa viável é a transformação desses resíduos em *pellets*, compactando-os para facilitar seu transporte e armazenamento, além de torná-los adequados para uso como biocombustível na geração de energia industrial ou aquecimento doméstico (Pradhan et al., 2018). Os *pellets* têm se destacado como uma opção promissora no mercado global, contribuindo para o desenvolvimento sustentável.

No Brasil, os *pellets* são utilizados na secagem de grãos e no aquecimento de aviários, substituindo a lenha devido à praticidade de manuseio e ao aumento da eficiência de produção. Além disso, seu uso vem ganhando espaço em diversos setores, como churrasqueiras, pizzarias, padarias e hotéis, como alternativa à lenha, carvão e gás. Outro fator que merece atenção é o mercado internacional. Na Europa, os *pellets* são empregados para aquecimento residencial em países como Alemanha, Itália e Áustria, além de serem utilizados em termelétricas para geração de energia em países como Suécia, Dinamarca, Holanda, Bélgica, Reino Unido e América do Norte (INDUSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORE - IBA, 2022). De setembro de 2017 a julho de 2018, o Brasil exportou 211 mil toneladas de *pellets* para fins industriais, um aumento de 326% em relação ao mesmo período do ano anterior (B. FOREST, 2019), sendo os *pellets* oriundos de florestas de pinus e eucalipto.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo estudar o processo de peletização utilizando os resíduos provenientes da poda de árvores na Escola de Engenharia de Lorena (EEL/USP), visando o desenvolvimento de um novo produto como biocombustível para geração de energia, contribuindo assim para a sustentabilidade institucional.



Materiais e Métodos

As atividades propostas para este trabalho envolvem as etapas de planejamento, execução e análise, conforme apresentado na Figura 1

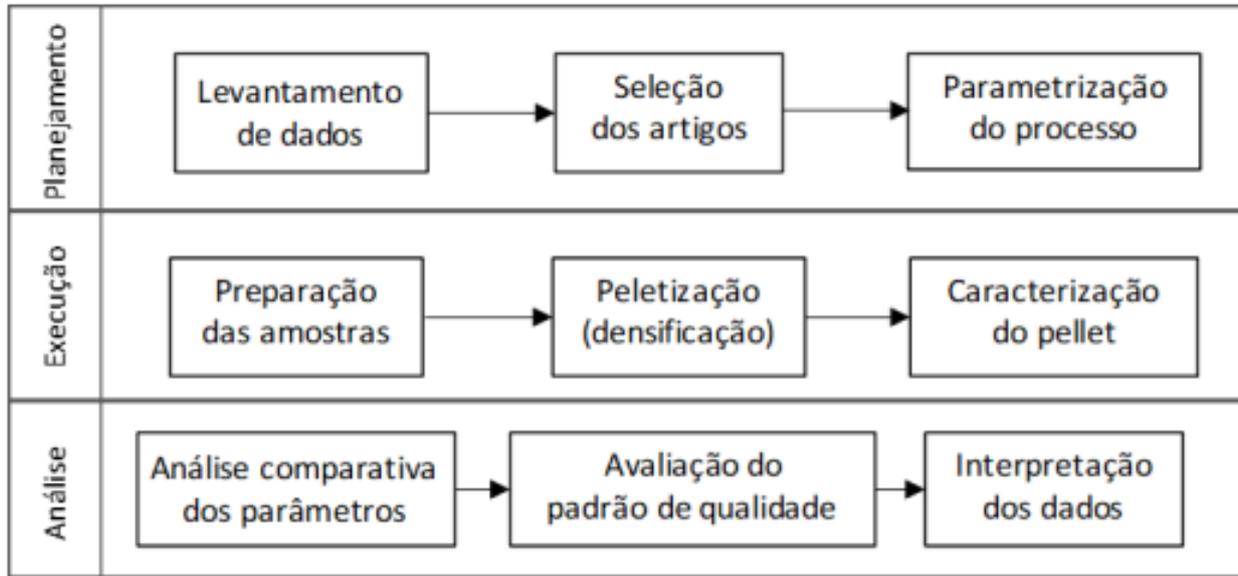


Figura 1: Atividades propostas.

Revisão Bibliográfica

Para a coleta de dados, foi conduzida uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) por meio de um curso de doze horas oferecido pelo Laboratório de Pesquisa (LaPES) e Engenharia de Software da Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR). Este curso, disponível no Portal de Cursos Abertos (PoCA), instruiu os participantes sobre o uso da plataforma *StArt* (*State of the Art through Systematic Review*), desenvolvida internamente pelo referido laboratório. A ferramenta permitiu a seleção de artigos relacionados ao tema de pesquisa por meio da análise de seus resumos. Três bases de dados foram selecionadas para a obtenção dos artigos: *Science Direct*, *Engineering Village* e *Scopus*.

Obtenção de dados

As palavras-chave (*garden waste AND energy AND biomass AND pelletization*) foram empregadas em inglês, juntamente com suas equivalentes em português: "Resíduo de jardim", "energia", "biomassa" e "peletização". Essa estratégia resultou na identificação de 112 artigos. Desses, 60 foram identificados como duplicatas e 31 foram considerados fora do escopo da pesquisa, resultando em 21 artigos relevantes. Após uma análise completa desses artigos, 14 foram considerados pertinentes e aceitos, enquanto 7 foram descartados devido à sua falta de adequação ao escopo do estudo.

Com base na análise dos dados, estabeleceu-se a parametrização do processo a ser investigado, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros definidos para o processo.

Parâmetros para peletização da poda de árvore	
Teor de Umidade	5, 10 e 15%
Tamanho de Partícula	4 a 2mm
Aglutinante	Nenhum
Temperatura	85 °C

Preparação das amostras

As podas das árvores utilizadas nos ensaios foram adquiridas no campus da EEL, especificamente de árvores frutíferas, como mangueira e pitangueira. Após a coleta, as podas foram deixadas ao ar livre para secagem e posteriormente trituradas em um moinho de facas em duas etapas. Na primeira etapa de trituração, os galhos foram reduzidos sem o uso de peneira, enquanto na segunda etapa, a trituração foi realizada com o auxílio de uma peneira de 9 mm. Durante o processo de trituração, os galhos e folhas foram moídos juntamente, sem distinção entre as espécies de árvores. O material triturado foi armazenado em local coberto para posterior utilização neste estudo.

Conforme a parametrização estabelecida para o processo de peletização, procedeu-se à caracterização do tamanho de partícula da amostra.

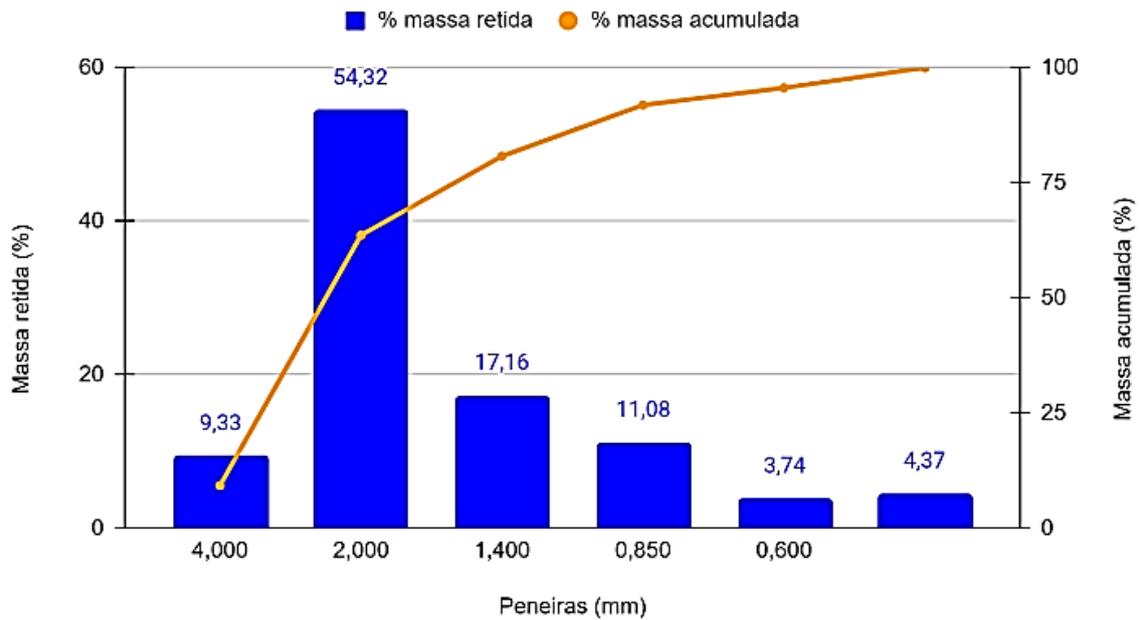


Figura 2: Análise granulométrica.

Cerca de 54,32% da massa da amostra de poda possui partículas com tamanho entre 4 e 2 mm, conforme definido para estes ensaios. A preparação da amostra é importante por envolver várias etapas, como a moagem das podas, o ajuste do teor de umidade e a análise granulométrica. Após a moagem, a amostra de poda tinha 11,48% de umidade, sendo necessário ajustar para 5% ou 15%. Para reduzir a umidade, a amostra foi exposta ao sol, e para aumentar foi pulverizada água sobre o material a ser utilizado, deixando armazenado por 24 horas para homogeneização. Após esses ajustes, a amostra foi peletizada e identificada como "AF" – Árvore Frutífera, seguida do teor de umidade, como AF05 para 5% de umidade.

Peletização

Na fase de densificação da biomassa, utilizou-se uma peletizadora com capacidade de 30 kg·h⁻¹, equipada com matriz plana circular com canais de 8 mm de diâmetro e dois roletes de pressão. O processo de peletização iniciou-se com madeira moída e óleo vegetal, até a temperatura de 85 °C, medida por termômetros digital e manual. Após atingir essa temperatura, substituiu-se o material pela amostra a ser peletizada, descartando a fração inicial. As amostras com 5%, 10% e 15% de umidade foram peletizadas sem a adição de aglutinantes.

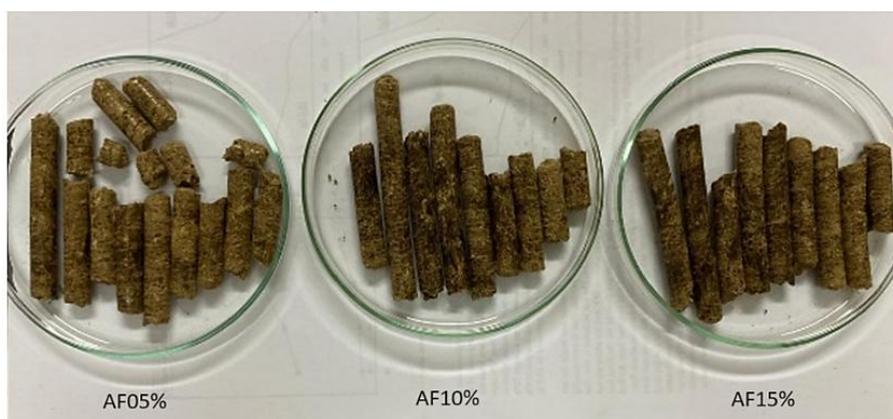


Figura 3: Pellets nos diferentes teores de umidade.

A amostra AF05% apresenta uma textura mais áspera e é mais quebradiça do que as amostras AF10% e AF15%, devido à sua menor umidade. Além disso, o comprimento dos *pellets* variou nas diferentes proporções de umidade.

Comparando o processo de peletização das podas de árvores com o processo de peletização de eucalipto em outro trabalho (SCARELI et al., 2023), observou-se uma diferença significativa na facilidade de operação. O processo de peletização das podas de árvores foi mais suave, com menos travamentos na peletizadora, em comparação com o eucalipto. Isso pode ser atribuído à composição da biomassa, já que as podas de árvores tendem a ter uma estrutura menos fibrosa e mais homogênea do



que o eucalipto. Enquanto o eucalipto contém fibras densas que podem causar bloqueios na peletizadora, as podas de árvores são mais maleáveis e menos propensas a formar bloqueios.

Portanto, a menor ocorrência de travamentos na peletizadora ao lidar com as podas de árvores indica uma vantagem na eficiência e na operação do processo de peletização. Isso destaca a importância da composição dos materiais na determinação da facilidade de processamento e na eficiência geral do processo de peletização.

Caracterização das amostras

As amostras das podas das árvores, tanto na forma bruta (*in natura*) quanto peletizada, foram inicialmente caracterizadas utilizando as seguintes metodologias:

Teor de umidade (TU)

Para determinar o teor de umidade, foram realizadas análises em quintuplicata (n=5) para cada amostra com o teor de umidade utilizado nos ensaios de peletização. Cada porta-amostra continha uma massa de 1,0000 grama de poda de árvore e foi colocada em uma mufla a $105 \pm 2 \text{ °C}$ até atingir peso constante. Após o processo de secagem, os porta-amostras foram transferidos para um dessecador, resfriados sem exposição à umidade do ar e, em seguida, pesados novamente para a determinação do teor de umidade, conforme descrito na equação 1.

$$TU = \frac{(BU+BS)}{BU} \times 100 \quad (1)$$

Densidade Aparente (Bulk Density - BD)

A determinação da densidade aparente foi conduzida em quintuplicata (n=5), utilizando um recipiente de volume conhecido de 614,42 cm³. Tanto os pellets quanto a biomassa antes da peletização foram pesados, e o cálculo foi realizado de acordo com a equação 2.

$$BD = \frac{\text{massa}}{\text{volume conhecido}} \times 1000 \quad (2)$$

Durabilidade Mecânica (DU)

O ensaio de durabilidade mecânica foi realizado em duas repetições, com a preparação de duas amostras, cada uma contendo 500 gramas de pellets. As amostras foram rotacionadas a 50 rpm por 10 minutos, individualmente. Após a conclusão do ensaio, as amostras foram peneiradas em malhas de 3,15 mm, e a fração de amostra retida foi pesada e calculada de acordo com a equação 3.

$$DU = \frac{\text{massa retida}}{\text{massa inicial}} \times 100 \quad (3)$$

Análise Imediata

A análise imediata é realizada para determinar o conteúdo energético do biocombustível, determinando a porcentagem em massa do teor de umidade, matéria volátil, teor de cinzas e carbono fixo, conforme descrito a seguir. As análises foram realizadas em 5 réplicas.

Teor de Umidade: Uma fração da amostra como recebida, é reservada para determinação da quantidade de água retida no material. A secagem é realizada em estufa na temperatura de $105 \pm 2 \text{ °C}$ por 24h ou até atingir seu peso constante (Associação Brasileira de Normas Técnicas - Norma Brasileira (ABNT/NBR 14929:2017) e calculada de acordo com a equação 4.

$$\text{Teor de Umidade (TU \%)} = \frac{BU-BS}{BU} \times 100 \quad (4)$$

Sendo: BU: Biomassa úmida; BS: Biomassa seca

Teor de Material volátil (Mv %): Para determinar o carbono fixo, primeiro é necessário encontrar o teor de material volátil, a partir da amostra seca sendo a amostra carbonizada a 950°C por 7 minutos de acordo com a norma ASTM D 3175:2018 e calculada de acordo com a equação 5.

$$\text{Material volátil (MV \%)} = \frac{BC}{BS} \times 100 \quad (5)$$

Sendo: BS: biomassa seca; BC: biomassa carbonizada

Teor de cinzas: É a porcentagem em massa do teor de inorgânicos contidos na amostra. O teor de cinzas é realizado conforme norma *American Society for Testing and Materials* ASTM D3174-12 conforme equação (6).

$$\text{Teor de Cinzas (TCz \%)} = \frac{Cz}{BS} \times 100 \quad (6)$$



Sendo: Cz: conteúdo de cinzas após calcinação, BS: Biomassa seca

Com estes dados é possível determinar o carbono fixo de acordo com a equação 7.

$$\text{Carbono Fixo (CF \%)} = 100 - (\text{TU\%} + \text{MV\%} + \% \text{Cz}) \quad (7)$$

Poder Calorífico

O poder calorífico superior de um biocombustível é determinado por meio de uma bomba calorimétrica. Devido a custo da análise e pelo fato do trabalho estar em andamento, inicialmente o poder calorífico superior foi estimado a partir da fórmula de Parikh et al., 2005, através dos dados da análise imediata, conforme equação (8).

$$\text{PCS (MJ/kg)} = 0,3536 \times \text{CF} + 0,1559 \times \text{MV} - 0,0078 \times \text{CZ} \quad (8)$$

Esta fórmula de correlação vem sendo utilizada como uma ferramenta útil para modelagem de processos que utilizam biocombustíveis (Parikh et al., 2005; Setter, et al., 2020).

Resultados e Discussão

O processo de pelletização requer uma atenção especial à temperatura da pelletizadora e à frequência do motor, visando garantir a formação adequada dos *pellets* sem sobrecarregar o equipamento. Após a conclusão dos testes, os pellets foram submetidos a análises para verificar a conformidade com os parâmetros estabelecidos pela norma europeia ENPlus.

A Figura 4 ilustra o teor de umidade das amostras de poda de árvore bruta moída e das amostras moídas em três níveis de umidade (5%, 10% e 15%) antes e após o processo de pelletização, em relação à densidade aparente.

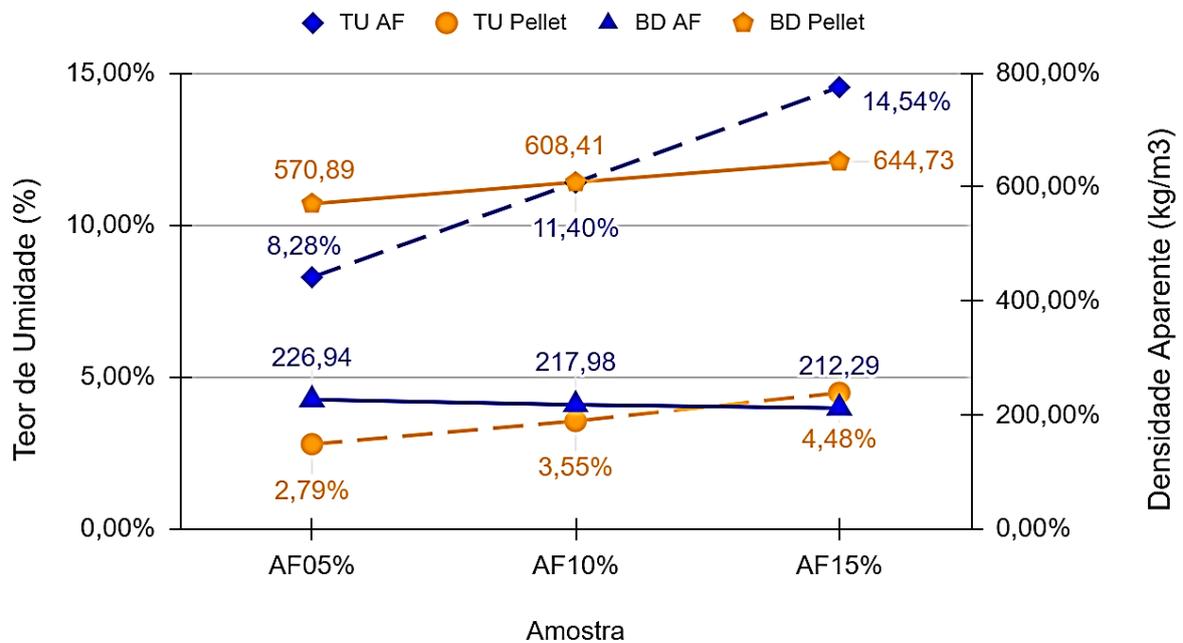


Figura 4: Teor de umidade e Densidade Aparente dos pellets

Antes da pelletização, foi quantificado o teor de umidade real das amostras de árvores frutíferas moídas (TU AF), resultando em valores próximos aos indicados (AF05%, AF10% e AF15%): 8,28%, 11,40% e 14,54%, respectivamente. É importante ressaltar que esse ajuste pode apresentar variações. Após o processo de pelletização, as amostras apresentaram uma redução no teor de umidade devido ao aquecimento durante o procedimento, variando de 2,79% a 4,48%, atendendo aos requisitos estabelecidos pela norma ($\leq 10\%$). A densidade aparente das amostras moídas antes da pelletização (BD AF) variou de 212,29 a 226,94 kg/m³. Após a pelletização, a densidade aparente dos pellets aumentou de 2,5 a 3,0 vezes em relação à biomassa bruta, sendo a densidade aparente da AF15% a que apresentou o maior valor (644,73 kg/m³). Apenas a amostra AF05% não atingiu o intervalo estabelecido pela norma EN Plus de 600 a 750 kg/m³ para os pellets, evidenciando a influência da umidade no processo de pelletização.



A Figura 5 apresenta o teor de umidade das amostras em relação da durabilidade mecânica.

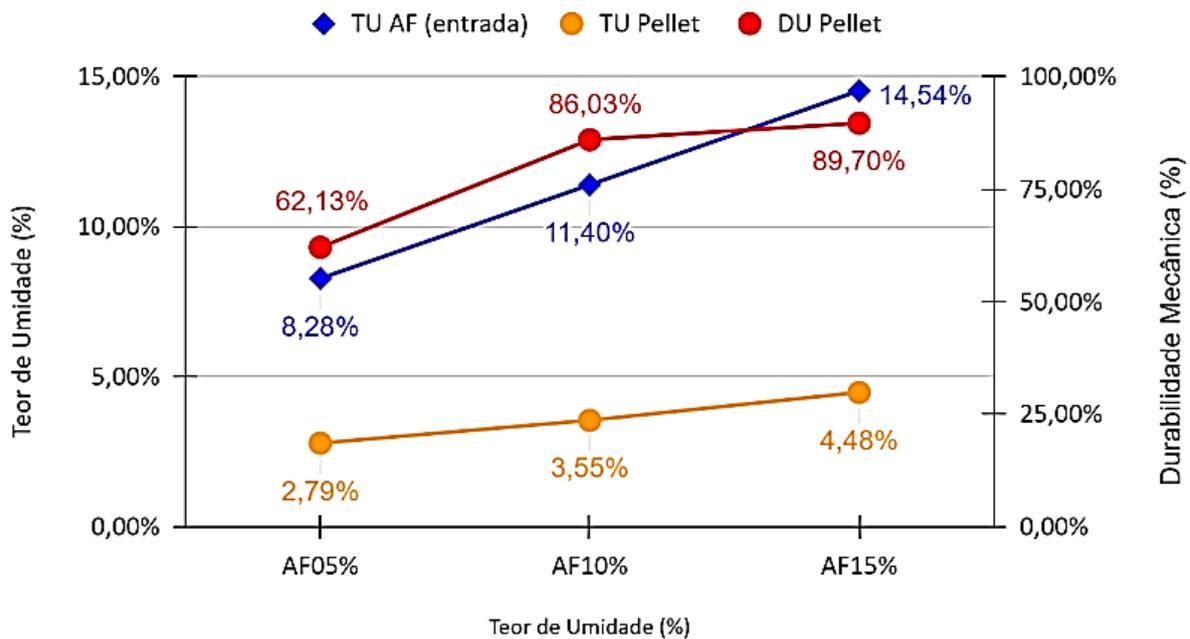


Figura 5: Durabilidade Mecânica nos três teores de umidade dos pellets.

A peletização realizada nos três diferentes teores de umidade da poda de árvores frutíferas demonstrou um aumento na durabilidade mecânica à medida que a umidade da amostra bruta aumenta, variando de 62,13% a 89,70%. Apesar de não atingir o nível de durabilidade mecânica estabelecido pela norma EN Plus ($\geq 97,5\%$), os resultados evidenciaram a forte influência da umidade no processo de peletização.

A análise imediata e poder calorífico superior da poda de árvore utilizada para produção dos pellets foram quantificados conforme apresentado na Figura 6.

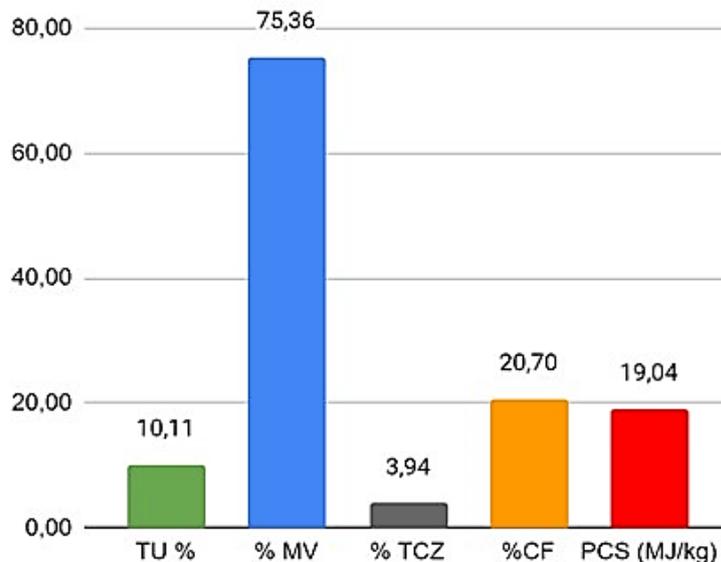


Figura 6: Análise imediata e poder calorífico da poda de árvore frutífera

Observa-se que a biomassa na sua forma bruta, possui alta quantidade de material volátil e o poder calorífico obtido foi de 19,04 MJ/kg. Vale ressaltar que, com o adensamento da biomassa em *pellets* uma maior quantidade de biomassa pode ser estocada favorecendo um maior abastecimento de energia.

A próxima etapa do trabalho consistirá na avaliação dos resultados obtidos e na comparação com os dados encontrados na literatura para discussão. Além disso, serão realizadas novas adaptações no processo visando alcançar melhores resultados.



Comentários finais

A pesquisa realizada sobre a peletização de resíduos provenientes de podas de árvores na Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo (EEL/USP) evidenciou a importância de explorar alternativas sustentáveis para a gestão de resíduos urbanos. Em face do aumento populacional e dos padrões crescentes de consumo, a destinação apropriada desses resíduos se torna um desafio crucial para garantir a preservação ambiental e o bem-estar das comunidades.

A partir da análise da literatura e de uma revisão sistemática, foi possível compreender a relevância da biomassa como fonte de energia renovável, especialmente no contexto brasileiro, onde recursos naturais abundantes, como a cana-de-açúcar, desempenham um papel significativo na matriz energética. Nesse contexto, a utilização de resíduos provenientes de podas de árvores para a produção de *pellets* surge como uma alternativa promissora, não apenas para reduzir a dependência de fontes fósseis, mas também para agregar valor a materiais anteriormente descartados de forma inadequada.

Entretanto, o processo de peletização enfrenta desafios específicos, como a otimização dos parâmetros de umidade e tamanho de partícula, bem como a garantia da conformidade com normas de qualidade, como a EN 14961-1:2010 para exportação. Os resultados dos ensaios de laboratório indicaram que, embora os *pellets* produzidos atendam a certos critérios estabelecidos, como densidade aparente, o mesmo não pode ser dito em relação à durabilidade mecânica, que não alcançou os padrões exigidos pela norma europeia.

Esses achados destacam a importância contínua da pesquisa e desenvolvimento nesta área, visando otimizar o processo de peletização e garantir a produção de biocombustíveis de alta qualidade. Além disso, ressaltam a necessidade de uma abordagem integrada para a gestão de resíduos, que leve em consideração não apenas aspectos técnicos, mas também econômicos, sociais e ambientais.

Agradecimentos

As autoras agradecem à Pró-Reitoria de Graduação da Universidade de São Paulo (PRG-USP) pela bolsa de iniciação científica concedida a aluna.

Referências Bibliográficas

Alves, B.L.G. Subtração de volumes em aterros sanitários: Gestão dos resíduos de poda de árvores urbanos. Anais do 13º Seminário Internacional NUTAU 2020, 8, 6- 13, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL – ASTM. D3174-12: Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke form Coal, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL – ASTM. D3175-18: Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke form Coal, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA - norma Brasileira - ABNT NBR 14929. Determinação do teor de umidade de cavacos - método por secagem em estufa, 2017.

Brand, M.A.; Jacinto, R.C. Apple pruning residues: Potential for burning in boiler systems and pellet production, Renewable Energy, 152, 458-466, 2020.

Castelanno, J.M.; Gomez, M.; Fernandes, M.; Esteban, L.S.; Carrasco, J.E. Study on the effects of raw materials composition and pelletization conditions on the quality and properties of pellets obtained from different woody and non woody biomasses. Fuel, 139, 629-636, 2015.

European Standardization EN 14961-1 – Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 1: General requirements, 2010.

IBA. Indústria Brasileira de Árvore, Pellets. Acesso em: maio de 2022. Disponível em: <https://www.iba.org/pellets>

Jacinto, R.C. Produção de pellets para energia usando diferentes resíduos de biomassa agrícolas e florestais. Dissertação de mestrado. Universidade do Estado de Santa Catarina, 2017.

Li, Y.; Kang, K.; Wang., W. Quality Improvement and Cost Evaluation of Pellet Fuel Produced from Pruned Fruit Tree Branches. Energies, 15, 113, 2022.

Parikh, J.; Channiwala, S.A.; Ghosal, G.K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. Fuel, 84, 5, 487-494, 2005.

Pradhan, P.; Arora, A.; Mahajani, S.M. Pilot scale evaluation of fuel pellets production from garden waste biomass. Energy for Sustainable Development, 43, 1- 14, 2018.



Reis, T.E.V. Produção de pellets de resíduos de poda para aproveitamento energético. Exame de qualificação. Faculdade de Saúde Pública Ambiente, Saúde e Sustentabilidade – Universidade de São Paulo, SP, 2020.

Scareli, G. N.; Conte, R.A.; Romão, E.L. Análise das características físicas dos pellets de eucalipto produzido com óleo vegetal como aglutinante. 31º Simpósio Internacional de Iniciação Científica e Tecnológica da USP – SIICUSP, Lorena, 2023.

Setter, C.; Costa, K.L.S.; De Oliveira, T.J.P. The effects of kraft lignin on the physicochemical quality of briquettes produced with sugarcane bagasse and on the characteristics of the bio-oil obtained via slow pyrolysis. Fuel Processing Technology, 210, 106561, 2020.



ANÁLISE E PERCEPÇÃO DO USO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA EM CONCEIÇÃO DO ARAGUAIA, PARÁ

1Pamela Madeira de Oliveira, 2Iane Brito Tavares, 3Fabiana Bassani

1 Instituto Federal do Pará, Campus Conceição do Araguaia-PA, e-mail: pamela.madeira026@gmail.com; 2 Instituto Federal do Pará, Campus Conceição do Araguaia-PA, e-mail: iane.tavares@ifpa.edu.br; 3 Instituto Federal do Pará, Campus Conceição do Araguaia-PA; Univ. Coimbra, ADAI, Departamento de Engenharia Mecânica, Coimbra, Portugal, e-mail: fabiana.bassani@ifpa.edu.br

Palavras-chave: economia financeira; energia solar; preservação ambiental.

Resumo

O uso de energia solar fotovoltaica tem crescido no mundo devido a demanda por energias de fonte renovável e alternativa. No entanto, ainda não tem ganhado o devido espaço em investimento público e privado para a implementação em larga escala, especialmente em regiões de clima tropical, abundantemente providas desse recurso natural o ano todo. Por isso este trabalho tem como objetivo avaliar a percepção ambiental da população na cidade de Conceição do Araguaia – Pará, sobre a geração de energia por sistema fotovoltaico, identificando os principais desafios da utilização da energia solar do ponto de vista ambiental, social e econômico. Para isso, foram elaborados e aplicados dois questionários, aos usuários e não-usuários de energia fotovoltaica, em dois diferentes bairros da cidade. Os usuários de energia fotovoltaica afirmaram que a economia financeira é o principal motivo que os levou à instalação, seguido de benefícios ambientais. Esse público se mostrou satisfeito com o sistema, e o recomendariam para outras pessoas. Enquanto isso, os não-usuários de energia fotovoltaica demonstraram interesse na instalação se for mais acessível economicamente. Aspectos sociais como baixo poder aquisitivo e não possuir habitação permanente podem ser limitantes na implementação desse tipo de tecnologia. Dentre os desafios e oportunidades para melhoria e expansão do sistema, sugere-se: reduzir os custos de instalação para ser mais acessível às diferentes classes socioeconômicas; melhorar os serviços de suporte técnico e de informação às pessoas pelas empresas de instalação, concessionária da energia e o poder público; e equipamentos complementares (como baterias) para armazenamento da energia gerada mais acessíveis. Este trabalho apresenta os principais desafios da utilização de energia solar numa região com abundância desse recurso o ano todo, e elucida aspectos norteadores à inserção em uma maior escala desta energia alternativa, visando diminuir a sobrecarga da rede pública predominantemente a base hídrica.

Introdução

A demanda mundial por energia tem crescido concomitantemente à preocupação com a descarbonização do setor e a necessidade de se produzir energia através de fontes renováveis complementares ao abastecimento elétrico atual (da SILVA; CÂNDIDO, 2015). Essa preocupação é impulsionada pela necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, mitigar os efeitos das mudanças climáticas, e reduzir os impactos causados pelas tecnologias de geração de energia não renovável.

No entanto, até mesmo a energia renovável pode afetar negativamente o meio ambiente, que é amplamente considerado menos severo do que os recursos de energia fóssil (SAYED et al., 2021). A energia hidrelétrica, por exemplo, abundantemente utilizada no Brasil, tem uma interferência negativa à fauna e a flora nas fases de construção, geração e distribuição (SILVA et al, 2018).

Do mesmo modo, a produção de energia eólica se associa à morte de aves que colidem com turbinas e outras estruturas que geram vento. As turbinas também emitem ruídos mecânicos e aerodinâmicos, gerando poluição sonora, além de causar interferências eletromagnéticas por reflexão de sinais das pás (AZEVEDO et al., 2017). Em contrapartida, a fonte solar fotovoltaica possui uma vantagem nesse aspecto porque oferece baixa interferência no meio biótico (SILVA et al., 2018).

A energia solar é uma fonte limpa e eficiente (BLASZCZAK, 2017), que de não emite gases de efeito estufa em seu processo de geração, e as perdas de energia elétrica são mínimas (LIRA et al., 2019). Trata-se de uma opção atrativa baseado na perspectiva de pesquisas científicas e de mercado, o seu uso possui baixo custo de manutenção (DA SILVA; ARAÚJO, 2022), e elevado potencial para ser incorporada de forma complementar à matriz energética brasileira (LANA et al., 2016).

As políticas de incentivo aos sistemas fotovoltaicos são utilizadas em diversos países (IZADIAN et al., 2013), uma vez que são simples para instalação em pequeno porte (da SILVA et al., 2017). Além disso, a segurança energética é ampliada devido à redução de pontos únicos de falha, ou seja, o sistema elétrico passa a contar com fornecedores diversificados de energia, o que leva à redução de sobrecarga e de custos operacionais decorrentes das falhas (LOSEKANN; HALLACK, 2018).

Os consumidores que possuem o sistema fotovoltaico podem reduzir os custos com a energia elétrica, sendo esse mínimo relacionado às taxas de contribuição para iluminação pública. Essas informações podem não ser conhecidas da população, causando um atraso na disseminação da tecnologia (GONÇALVES et al., 2022). Gonçalves et al., (2022) investigaram a percepção das pessoas ligadas à Universidade Federal do Maranhão sobre a energia solar fotovoltaica, e identificaram que as pessoas despertam interesse em instalar o sistema majoritariamente pelo benefício econômico. Cruz Junior et al., (2023) também analisaram a percepção das pessoas que vivem em Joinville (SC) e identificaram que todos os entrevistados gostariam de possuir o sistema fotovoltaico, mas não o fazem devido ao alto custo de investimento inicial para a instalação. É



conhecido que o Brasil apresenta um alto potencial de geração solar devido sua larga extensão e pelos altos índices de radiação solar em seu território. De modo comparativo, podemos citar a Alemanha, que embora haja níveis de radiação substancialmente menores em relação ao Brasil, detém atualmente uma capacidade instalada fotovoltaica 30 vezes superior à do Brasil (BEZERRA, 2018).

A região Norte do Brasil é a que possui menos unidades geradoras de energia solar do país (GONÇALVES et al., 2022). Embora seja uma das regiões que menos recebe incidência de raios solares junto da região Sul, existe um grande potencial de obtenção de energia na região Norte (SOLAR GIS, 2020). As políticas de incentivos existentes ainda precisam evoluir para melhorar a viabilidade desta forma de geração de energia nessa região. “O investimento inicial elevado acaba inibindo a expansão principalmente nas unidades consumidoras do tipo residencial. O crescimento desta fonte de geração de energia também fica prejudicado devido aos obstáculos tributários e institucionais” (ROSA; GASPARIN, 2016, p. 140).

Assim, com a finalidade de contribuir com a discussão sobre este tema, objetivo deste artigo é avaliar a percepção ambiental da população de Conceição do Araguaia – Pará, sudeste do Pará (região Norte), sobre a geração de energia fotovoltaica, procurando identificar os principais desafios da utilização da energia solar considerando o aspecto ambiental, social e econômico. Este trabalho analisa a percepção dos usuários e não-usuários do sistema de geração de energia fotovoltaico, elucidando aspectos norteadores ao setor público e privado à inserção desta energia alternativa em maior escala, especialmente em regiões abundantemente providas deste recurso o ano todo.

Material e Métodos

O município de Conceição do Araguaia localizado na região sudeste do estado do Pará, é caracterizado pelo clima tropical Aw (com estação seca no inverno), segundo a classificação de Köppen. A região está em uma área de transição do bioma Cerrado-Amazônia, com efeitos nos fatores climáticos, como temperatura, pluviosidade e umidade relativa (RIBEIRO; TELES, 1998). As áreas de estudo foram selecionadas, considerando a representatividade da heterogeneidade de características sociais e econômicas, foram dois bairros da zona urbana de Conceição do Araguaia: Centro e Setor Universitário, que possuem uma população representativa 14% em relação ao quantitativo do município (IBGE, 2022). O Bairro Centro é predominantemente comercial, com lojas, mercados, bancos e algumas residências, e o Setor Universitário é ocupado especialmente por residências.

A pesquisa foi realizada por meio de dois questionários eletrônicos elaborados e aplicados para dois públicos distintos: i) usuários e ii) não-usuários de sistemas fotovoltaicos de geração de energia em suas casas e estabelecimentos. Ambos os questionários são compostos por perguntas de múltipla escolha e incluem questões sobre o perfil do entrevistado, interesse e conhecimento sobre sistemas fotovoltaicos, vantagens e desvantagens, e a conexão entre o fator ambiental e a energia renovável.

Os questionários foram elaborados na plataforma *Google Forms* e distribuídos digitalmente aos moradores dos dois bairros através de aplicativos de mensagens instantâneas e chamadas de voz para *smartphones*, e na rede social de compartilhamento *online* de fotos e vídeos entre seus usuários, procurando a divulgação em massa nesses dois bairros. Outra estratégia para obter maior número de respostas, especialmente dos que possuem sistema fotovoltaico, foi obter o contato das pessoas através de boca-a-boca, sendo esta uma das estratégias mais práticas e simples de obter mais respostas para os questionários propostos.

Os resultados foram tabulados e analisados com auxílio do *Microsoft Excel*. De posse dos dados, é possível analisar a percepção da comunidade, interesse positivo ou negativo e os desafios econômicos e socioambientais da energia fotovoltaica. Foi garantido a privacidade de todos os dados pessoais dos entrevistados, bem como a finalidade acadêmica da pesquisa, de modo a obter respostas mais fidedignas à percepção das pessoas.

Complementarmente, foram realizadas duas entrevistas junto ao setor de comercialização de sistemas fotovoltaicos no município, com o objetivo de compreender o ponto de vista do setor em relação a implementação do sistema de energia solar, visando complementar a qualidade da discussão.

Resultados e Discussão

Esta seção apresenta os resultados dos dois questionários aplicados. Foram obtidos no total 76 respostas, sendo 10 de usuários e 66 de não-usuários de energia fotovoltaica. A figura 1 apresenta o perfil social dos entrevistados, usuários e não-usuários de energia fotovoltaica. Em relação ao grupo de usuários de energia fotovoltaica, 70% residiram no bairro Centro e 30% no Setor Universitário de Conceição do Araguaia. A faixa etária predominante dos entrevistados (70%) foi entre 35-45 anos, enquanto os demais possuíam entre 45-60 anos (20%) e acima de 60 anos (10%) (figura 1b), distribuídos entre homens e mulheres (80 e 20 % respectivamente). O nível de escolaridade foi igualmente distribuído entre o médio e pós-graduação, ambos representando 40 %, enquanto o superior representou 20% dos entrevistados, não havendo respostas com nível de escolaridade abaixo do nível médio. A renda familiar mensal dos usuários foi acima de três salários-mínimos (100% dos entrevistados).

No grupo de não-usuários de energia fotovoltaica, 55% residiram no bairro Centro e 45% no Setor Universitário de Conceição do Araguaia. A faixa etária predominante dos entrevistados (41%) foi entre 25-35 anos, enquanto os demais possuíam entre 18-25 anos (32%) e acima de 45 anos (27%) (figura 1b), distribuídos igualmente (50%) entre homens e mulheres. O nível de escolaridade predominante foi o superior (47%), seguido do nível médio (30%) e pós-graduação (23%), não havendo respostas com nível de escolaridade abaixo do nível médio. Sobre a renda familiar mensal dos não-usuários, 25% tinham renda média mensal acima três salários, 33% entre 1-2 salários, 21% entre 2-3, e 11% menor que um salário-mínimo mensal.

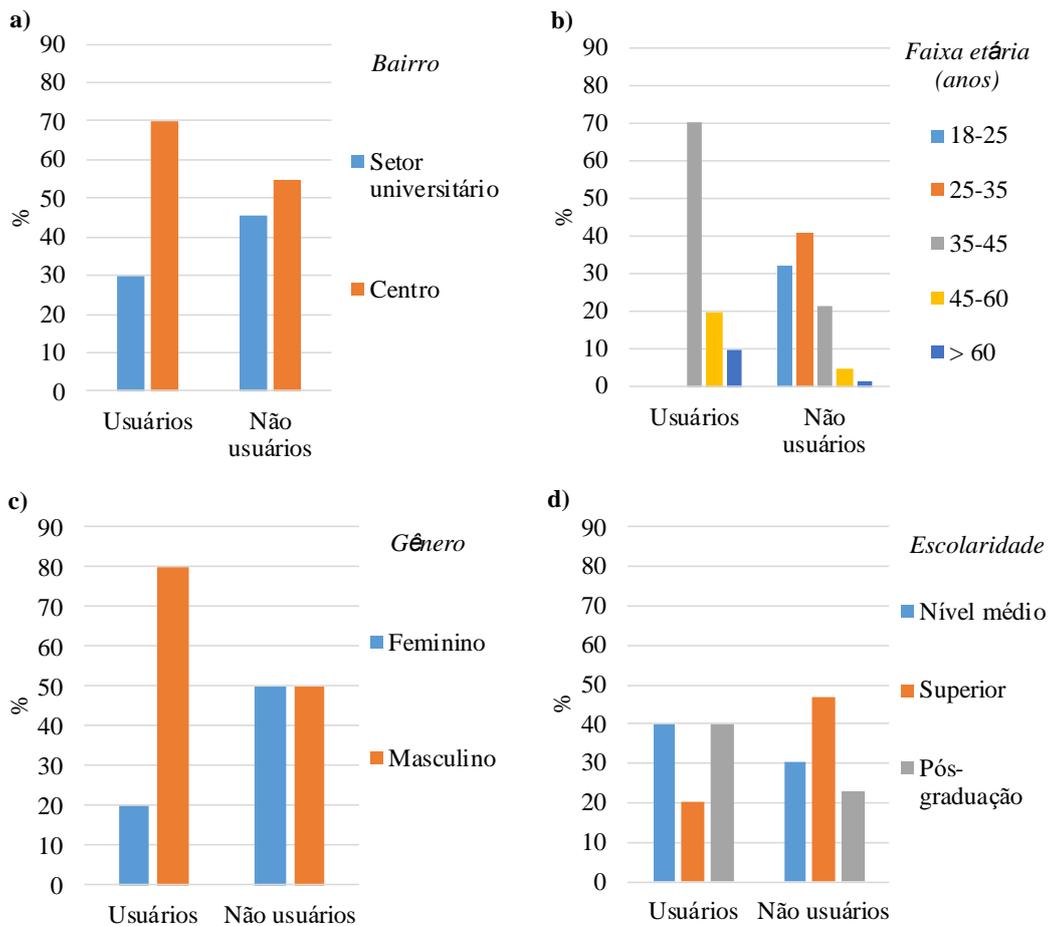


Figura 1: Perfil dos usuários e não-usuários de energia fotovoltaica: a) bairro; b) faixa etária; c) gênero; e d) escolaridade.

Relativamente às vantagens e desvantagens, as respostas dos usuários e não-usuários são apresentadas na Figura 2. Com base nas respostas da percepção dos usuários de energia fotovoltaica, a maioria (50%) despertaram ou interessaram na instalação devido a recomendações de amigos, colegas de trabalho e/ou familiares, outros através de anúncios na internet e redes sociais (33%) ou 17% por notícias em telejornais e revistas (17%). A maioria dos usuários, (representando 60%) declarou que instalou o sistema de geração de energia solar há menos de um ano, enquanto os demais (40%) possuem o sistema instalado entre 1-3 anos. Quando questionados se a capacidade de energia é suficiente para atender a sua necessidade da sua residência e/ou empresa, 90% afirmaram que é suficiente, enquanto 10% relataram insuficiência.

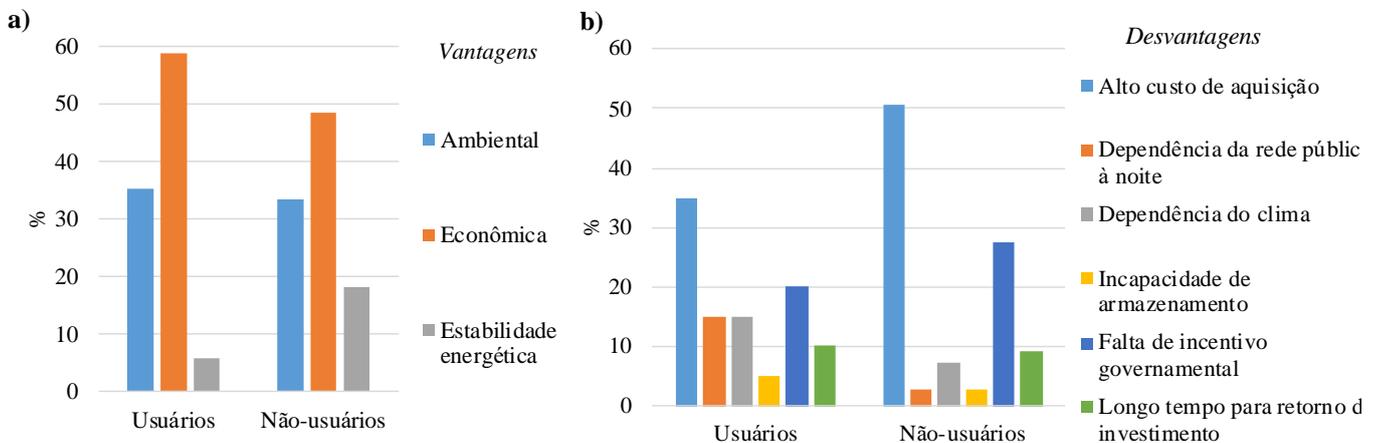


Figura 2: Percepção dos usuários e não-usuários de sistema fotovoltaico: a) vantagens e b) desvantagens



Quando questionados sobre o tempo de vida útil do sistema fotovoltaico, a maioria dos usuários (70%) declarou ter conhecimento que o tempo de vida é cerca de 25 anos, enquanto os demais (30%) dividiram-se em respostas como menos de 10 anos, de 11-20 anos e 60 anos ou mais. Todos os entrevistados (100%) responderam não possuir sistema de armazenamento da energia produzida, assim quando há a falta da energia elétrica convencional, ficam desabastecidos de eletricidade. Além disso, todos afirmaram que a energia excedente é injetada na rede convencional de energia elétrica da concessionária e compensada no período noturno.

Quando questionados sobre os motivos (vantagens – figura 2a) que os levaram a instalar um sistema de energia solar fotovoltaico (podendo selecionar mais que uma alternativa), 59% dos usuários responderam a economia financeira, 35% a preservação do ambiente e 6% a independência da energia elétrica convencional. Relativamente as possíveis desvantagens (podendo selecionar mais que uma alternativa), 35% dos usuários responderam o alto custo de investimento, 20% a falta de incentivo público, e outros fatores foram selecionados com menor frequência, como a dependência do clima, a falta de armazenamento de energia e o longo tempo para retorno do investimento (figura 2b).

Observa-se que o meio de comunicação predominante à instalação foi através de boca-a-boca entre o seu grupo social, e que a instalação dos sistemas nos bairros investigados ainda é bem recente, comparado a realidade mundial, que desde a década de 1970 passou a receber investimentos em pesquisa e avanços tecnológicos e para expandir as tecnologias solares, que resultaram em painéis solares mais acessíveis e eficientes ao longo do tempo (BRITO; SERRA, 2015). Corroborado a isso, as empresas de sistemas fotovoltaicos passaram a atuar no município há menos de 5 (cinco) anos, segundo informações do setor entrevistado.

Os resultados mostram ainda que os sistemas fotovoltaicos instalados têm se mostrado suficientes para atender a demanda de residências e estabelecimentos, que a maioria das pessoas está satisfeita e recomendaria a outras pessoas, devido à economia financeira e a preservação ambiental. Dentre as dificuldades apresentadas pelos usuários, estão os custos de instalação, a incapacidade de armazenamento de energia, a carência em alguns serviços e apoio técnico, algumas delas corroborando com os resultados de Gonçalves et al. (2022), Cruz Junior et al. (2023) e Rosa e Gasparin (2016) realizados em outras regiões do Brasil. O alto custo de investimento e o longo tempo para retorno do investimento podem estar relacionados a falta de incentivo público em energias alternativas, bem como, a ausência de equipamentos para armazenamento de energia gera dependência da rede pública convencional e limitando a disponibilidade do recurso quando há corte/falta de energia pública.

Relativamente às respostas dos não-usuários sobre o sistema fotovoltaico, os resultados mostraram que 42% dos entrevistados possuem poucas informações sobre sistemas fotovoltaicos, enquanto 56% que já ouviram falar. Entre os motivos (vantagens – figura 2a) que os não-usuários apresentaram para instalar um sistema de energia fotovoltaico, a maioria (54%) respondeu como motivo principal a economia financeira, em segundo lugar (32%) a preservação do ambiente e por último (14%) independência energética. Entre os motivos pelo qual não instalariam (desvantagens – figura 2b), a maioria (69%) referiu o alto custo de investimento e 31% por morar de aluguel. Foi questionado se os não-usuários têm conhecimento que o excedente da energia gerada durante o dia é compensado à noite, quando o sistema não tem geração (conforme o Sistema de Compensação de Energia determinado pela Resolução Normativa 1059/2023 da ANEEL). Os resultados mostram que 57% dos não-usuários possuem pouca ou nenhuma informação sobre o assunto, enquanto 43% responderam ter conhecimento da possibilidade de compensação.

Nesse caso, observa-se que eles percebem a energia fotovoltaica como algo benéfico, pois alegam ter conhecimento da sua vantagem econômica, além do aspecto de preservação ambiental e da necessidade de investimento em energias mais limpas. Provavelmente essa percepção possui relação com o nível de escolaridade dos entrevistados (nível médio e superior - somados 77%), mas a maioria desconhece a capacidade de compensação dos créditos de energia fotovoltaica.

O principal desafio apresentado pelos entrevistados é a questão econômica (alto custo de investimento), o que pode corroborar com a situação econômica dos mesmos, uma vez que a maioria (65%) tem rendimento abaixo de 3 salários-mínimos. Dentre as principais dificuldades para a instalação, incluem não possuir casa própria e a falta de incentivo público, indicando a necessidade de maior apoio público não só em tecnologias ambientais menos poluentes como também em habitação.

Do ponto de vista dos entrevistados do setor de comercialização de sistemas fotovoltaicos, há muito interesse por parte das pessoas em instalar o sistema, mas a principal limitação alegada pelos interessados (que visitam o estabelecimento comercial e desistem de instalar) é a condição financeira. O setor de comercialização declarou que há o retorno do investimento a longo prazo, mas concorda que envolve um custo inicial relativamente elevado. Além disso, o setor afirmou que as pessoas que adquirem o sistema fotovoltaico optam por equipamentos mais econômicos que não incluem baterias de armazenamento, tornando-os dependentes da concessionária de energia elétrica no período noturno e impossibilitando o acesso à energia quando não fornecida pela rede pública. Isso ocorre porque “o custo dos equipamentos que formam o sistema solar fotovoltaico é determinante na formulação do preço da energia elétrica gerada por fonte solar. Por este motivo que as atividades como pesquisa e desenvolvimento possuem papel fundamental para que aconteça a redução de custos da energia solar fotovoltaica no Brasil” (ROSA; GASPARI, 2016, p. 145).

Considerações Finais

Este trabalho teve como objetivo avaliar a percepção da população dos bairros Centro e Setor Universitário em Conceição do Araguaia – Pará, sobre o sistema fotovoltaico de geração de energia solar, procurando identificar os principais desafios do ponto de vista ambiental, social e econômico. Foram aplicados dois questionários para públicos distintos: os usuários e não-usuários de energia fotovoltaica em suas residências e estabelecimentos comerciais.



Os usuários de sistemas fotovoltaicos mostram que a economia financeira é o principal motivo que leva à instalação do sistema de geração de energia fotovoltaica, incluído por segundo os benefícios ambientais. Este público se mostra satisfeito com o sistema, não se arrependem de ter instalado e o recomendariam para outras pessoas. Os não-usuários de sistemas fotovoltaicos têm interesse em instalar a energia fotovoltaica se for mais acessível economicamente e, por compreenderem as vantagens do ponto de vista ambiental, como uma fonte alternativa de geração de energia. Aspectos sociais como baixo poder aquisitivo e não possuir moradia própria podem ser limitantes na implementação desse tipo de tecnologia.

Com base no estudo realizado, algumas sugestões identificadas como desafios e potenciais oportunidades para melhoria e expansão do sistema são apresentadas: i) reduzir os custos de instalação (através de incentivos governamentais, por exemplo) para diminuir o custo inicial bem como o tempo de retorno do investimento, e ser mais acessível às diferentes classes socioeconômicas; ii) melhorar os serviços de suporte técnico e de informação às pessoas pelas empresas de instalação, concessionária e o poder público, para elucidar aspectos sobre o funcionamento e as vantagens (econômicas, sociais e ambientais), através de programas de educação ambiental, por exemplo; e iii) instalação de equipamentos complementares para armazenamento da energia solar gerada (como baterias) acessíveis, para que as pessoas não fiquem desabastecidas quando houver falta de energia e para diminuir a sobrecarga na rede pública.

Por fim, este trabalho pode incentivar à instalação de sistemas fotovoltaicos no município de Conceição do Araguaia e região, evidenciando alguns benefícios do uso da energia fotovoltaica, surgindo expectativas à sua inserção em uma maior escala e promover a expansão do uso desta energia renovável e alternativa.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA), Campus Conceição do Araguaia, e a Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI), ligada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. 2023. Resolução Normativa nº 1059, de 07 de fevereiro de 2023: Aprimora as regras para a conexão e o faturamento de centrais de microgeração e minigeração distribuída em sistemas de distribuição de energia elétrica, bem como as regras do Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Diário Oficial da União.

Azevedo, J. P. M.; Nascimento, R. S.; Schram, I. B. 2017. Energia eólica e os impactos ambientais: um estudo de revisão. Revista Uningá, Maringá, v. 51, p. 101-106.

Bezerra, F. 2018. Energia Solar Fotovoltaica. Caderno Setorial ETENE. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil/ETENE - Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste, ano 3, n. 57.

Blaszczak, V. 2017. Análise de eficiência de painel fotovoltaico com sistema tracker seguidor solar. (Trabalho de conclusão de curso). Erechim, RS, Universidade Federal da Fronteira Sul, 39 p.

Brito, M. C.; Serra, J. M. 2015. Células solares para a produção de energia eléctrica. Physical Review, v 74, 230 p.

Cruz Junior, E.; Catsuraiama, L.; Santos, W. 2023. Impactos sociais e ambientais da produção de energia solar. Sociedade Educacional de Santa Catarina (UniSociesc), Engenharia Elétrica (Trabalho de conclusão de curso), 21 p.

Da Silva, H. M.; Araújo, F. J. C. 2022. Energia Solar Fotovoltaica no Brasil: Uma Revisão Bibliográfica. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, São Paulo, v. 8, n. pp. 859-869.

Da Silva, S. S. F.; Cândido, G. A. 2015. Matriz energética limpa e renovável: um desafio para o planejamento energético nacional e uma oportunidade para a região nordeste do Brasil. Revista Espacios, v. 36, n. 15, p 13.

Gonçalves, B.; Martins, A.; De Lima, S. 2022. Mercado solar e a percepção do usuário quanto ao ambiental e financeiro. Anais do IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, p. 695-700.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2010. Maiores Bairros de Conceição de Araguaia. Disponível em: http://populacao.net.br/os-maiores-bairros-conceicao-do-araguaia_pa.html.

Izadian, A.; Girrens, N.; Khayyer, P. 2013. Renewable Energy Policies: A Brief Review of the Latest U.S. and E.U. Policies. IEEE Industrial Electronics Magazine, v. 7, n. 3, p. 21-34.

Lana, L. T. C.; Almeida, E.; Rosa, A. C.; Santo, O, C, E.; Sacramento, T, C, B.; Braz, K, T, M. 2016. Energia Solar Fotovoltaica: Revisão Bibliográfica. Revisa Engenharias On line. v. 1, n. 2.



Lira, M. A. T.; Melo, M. L. S.; Rodrigues, L. M. R.; Souza, T. R. M. 2019. Contribuição dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica para a Redução de CO₂ no Estado do Ceará. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 34, n. 3, p 389-397.

Losekann, L.; Hallack, M. C. M. 2018. Novas energias renováveis no Brasil: desafios e oportunidades. In: De Negri, J. A.; Araújo, B. C.; Bacelette, R. (Org.). Desafios da Nação: Artigos de Apoio. IPEA, Brasília, p. 631-655.

Rosa, A. R. O.; Gasparin, F. P. Panorama da energia solar fotovoltaica no brasil. Revista Brasileira de Energia Solar, v. 7, n. 2, p. 140-147.

Sayed, E. T.; Wilberforce, T.; Elsaid, K.; Rabaia, M. K. H.; Abdelkareem, M. A.; Chae, K. J.; Olabi, A. G. 2021. A critical review on environmental impacts of renewable energy systems and mitigation strategies: Wind, hydro, biomass and geothermal. Science of The Total Environment, v. 766.

Silva, L. R. J. R.; Shayani, R. A.; Oliveira, M. A. G. 2018. Análise comparativa das fontes de energia solar fotovoltaica, hidrelétrica e termelétrica, com levantamento de custos ambientais, aplicada ao distrito federal. Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia Solar.

Solar Gis. 2020. Poster maps for solar energy. Disponível em: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/brazil>.



USO DO BIODIGESTOR COMO TECNOLOGIA SOCIAL APLICADA ÀS COMUNIDADES RURAIS DO MUNICÍPIO DE LAJES PINTADAS/RN

1Príncia Gomes Alves, 2Nixdali Freire de Oliveira, 3Nathércia Larisse do Nascimento Silva,
4Nathália Adelalde Loureiro, 5Paulo Gabriel Moreira Soares, 6Cibele Gouveia Costa Chianca,
7Hérika Cavalcante Dantas da Silva, 8Sandra Rufino Santos.

1 Graduanda em Engenharia Civil - UFRN, e-mail: princiagomess16@gmail.com; 2 Mestranda em Engenharia Civil e Ambiental-PPcivam UFRN, e-mail: nixdalifreire@gmail.com; 3 Graduada em Engenharia Ambiental - UFRN, e-mail: nathercialarisse@gmail.com; 4 Graduanda em Engenharia Química - UFRN, e-mail: adelaydenathalia@gmail.com; 5 Graduando em Zootecnia - UFRN, e-mail: paulogmoreiras@gmail.com; 6 Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - UFRN, e-mail: cibelegc@gmail.com; 7 Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - UFRN, e-mail: herika.cavalcante@ufrn.br; 8 Professora Associada do Departamento de Engenharia de Produção - UFRN, e-mail: sandra.rufino@ufrn.br

Palavras-chave: Biodigestor; Energias Renováveis; Engenharia Popular.

Resumo

O projeto biodigestor atua baseado nos princípios da Engenharia Popular com o objetivo de utilizar a tecnologia social para as comunidades rurais com vulnerabilidade social. A implementação do biodigestor em comunidades rurais do município de Lajes Pintadas/RN foi realizada por meio da incubadora de tecnologia social Engenheiros sem Fronteiras (ESF-Natal) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), em parceria com o Serviço de Apoio aos Projetos Alternativos Comunitários (SEAPAC). O modelo de biodigestor adotado é o sertanejo, uma vez que apresenta uma tecnologia mais viável, economicamente e ecologicamente. O sistema adotado é resultante do aproveitamento dos dejetos animais por meio da biodigestão anaeróbica, gerando como produto o biogás e o biofertilizante. Dessa maneira, a tecnologia substitui o gás de cozinha e a lenha geralmente utilizada para cozinhar nessas comunidades, e produz o biogás, o qual é mais benéfico para o meio ambiente e para a saúde da população local. Essa tecnologia social é sustentável e promove saúde e bem-estar para a comunidade. Foram implementados cinquenta e um biodigestores para famílias em suas propriedades rurais. Os depoimentos dos agricultores sobre a tecnologia social são recolhidos durante as visitas da SEAPAC e do ESF-Natal para a avaliação do funcionamento do biodigestor. É realizado também ajustes de problemas operacionais in loco, formação técnica para construção, operação do sistema e modificações com base na experimentação dos agricultores familiares participantes. Esse artigo tem por objetivo apresentar o alinhamento técnico e científico com o popular, buscando melhorias e desenvolvimento ao sistema biodigestor, a partir do diálogo e participação das famílias contempladas com a tecnologia. O procedimento metodológico adotado consistiu no planejamento da implementação do Sistema de Biodigestor na comunidade, dividido em 4 fases: a primeira fase foi o alinhamento de expectativas e necessidades da comunidade; a segunda fase consistiu no encontro com a comunidade para propor a implementação do biodigestor na região; a terceira fase envolveu o treinamento e a implementação, com foco na educação e no método construtivo; por fim, a quarta fase abrangeu o teste do biodigestor e a validação, com o sistema em operação para a produção de biogás e o uso de biofertilizante. Os resultados dos sistemas já implementados têm proporcionado diversos benefícios para a comunidade, não apenas pela substituição dos botijões de gás, mas também pelo uso do biofertilizante, gerando impactos significativos tanto sociais quanto financeiros. É importante destacar que também se executa o esforço para promover a democratização das políticas públicas, pois o intento do projeto é colaborar para uma vida mais equitativa e digna para os grupos de baixa renda, as comunidades e os agricultores de pequena escala que residem nas regiões de difícil acesso e no Semiárido Potiguar. Observa-se que o projeto está alinhado com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) delineados pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015, os quais representam uma iniciativa global para a formulação e aplicação de políticas públicas. Os ODS abordados no projeto são: 3 - Promoção da saúde e bem-estar, 11 - Promoção de cidades e comunidades sustentáveis, 13 - Mitigação das alterações climáticas e 15 - Preservação da vida terrestre, além do ODS 10 - Redução das desigualdades. Além disso, observa-se que o trabalho social realizado na comunidade possibilitou a troca de saberes e conhecimento compartilhado, por meio dos depoimentos sobre a adaptação da tecnologia das famílias beneficiadas. Portanto, para possíveis ajustes em futuras implementações da tecnologia social, com o objetivo de alcançar o maior número possível de famílias, é fundamental manter os encontros com a comunidade, promovendo uma mobilização e participação social mais eficazes. Ademais, é importante promover discussões sobre o uso e a manutenção da tecnologia, visando encontrar soluções com base na integração do conhecimento popular com o conhecimento técnico e científico, para resolver quaisquer eventuais problemas que possam surgir relacionados à tecnologia social adotada.



Introdução

A arte de engenhar, segundo Freyre (1987, p. 9), significa “inventar, engendrar, maquinar”. Então, os engenheiros estão diretamente ligados a novas tecnologias e ao desenvolvimento.

Contrapondo o padrão da engenharia de visão tecnicista e capitalista do ambiente, a Engenharia Popular (EP) se manifesta para promover o engajamento dos profissionais frente às questões sociais para a construção de um mundo mais justo e equitativo social e ambientalmente. Nesse contexto, faz-se uso de Tecnologias Sociais com foco em temas como a preservação ambiental, incentivando o respeito pela diversidade e reflete-se sobre o impacto negativo causado pela lógica do desenvolvimento por meio do crescimento econômico infinito (Rufino; Moreira, 2020). Neste cenário, a Incubadora de Tecnologia Social Engenheiros Sem Fronteiras núcleo Natal (ESF-Natal) surgiu para preencher esse espaço e atuar em parte da demanda, de modo que a equipe busca construir soluções para problemas enfrentados por pessoas e comunidades vulneráveis. Ressalta-se que o desenvolvimento sustentável e solidário precisa interagir com a realidade dos profissionais, participando do seu cotidiano, de modo a tornar-se ponto de articulação e reflexão da diversidade de experiências culturais, simbólicas, econômicas e políticas vivenciadas pelas comunidades rurais e urbanas.

O ESF-Natal atua com Engenharia Popular por meio da extensão tecnológica universitária da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), desenvolvendo atividades em comunidades rurais através de ações sociais, formação e desenvolvimento de tecnologias sociais, implementando técnicas de engenharia aliadas ao saber popular de maneira participativa. Como também, realiza práticas extensionistas que buscam assessorar tecnicamente grupos populares, empreendimentos de economia solidária, agricultura familiar campesina para a construção ou reaplicação de tecnologias sociais.

Ademais, a Incubadora Social desenvolve projetos contínuos em vários campos de atuação, dentre eles há o projeto biodigestor, que busca alcançar um público-alvo caracterizado por famílias que desenvolvem a pecuária familiar em comunidades rurais inseridas no município de Lajes Pintadas, Rio Grande do Norte (RN). Sabe-se que 70% do RN está dentro da região semiárida (ASA, 2023). Isto significa que qualquer projeto de desenvolvimento regional sustentável necessariamente precisa considerar esta realidade.

Segundo o relatório anual do desmatamento (RAD) no Brasil, referente ao ano de 2021, a cobertura vegetal típica da região semiárida nordestina, a caatinga, perdeu em apenas um ano, cerca de 116 mil hectares, o equivalente a 7% da sua área total. Ocupando assim, a 3ª posição entre os biomas mais afetados pelo desmatamento no Brasil, principalmente devido a utilização da vegetação nativa como fonte de energia térmica, mas também devido a uma intensa atividade agropecuária existente na região. Portanto, a disposição inadequada de dejetos de animais, a retirada de vegetação e a quantidade de animais de grande porte no meio rural são nocivos ao meio ambiente, podendo se tornar uma grande carga poluidora, principalmente quando esses resíduos atingem cursos d'água.

Nesse contexto o projeto biodigestor que é uma tecnologia social de baixo custo e fácil implantação utiliza excretas de animais da pecuária para gerar biogás e biofertilizante através de um processo de decomposição anaeróbia. Em comunidades rurais, o biodigestor se mostra uma alternativa interessante, considerando o fato de que dejetos de animais são um recurso de fácil obtenção, e utilizado para alimentar o biodigestor diariamente. Além disso, a implantação de um biodigestor traz benefícios tanto no aspecto social e econômico quanto no aspecto ambiental, pois além do manejo adequado e reaproveitamento de detritos, o biogás produzido tem grande potencial energético, reduzindo a necessidade do uso de lenha ou de gás de cozinha e, por consequência evitando o desmatamento da caatinga, proporcionando economia financeira e de recursos naturais, autonomia e segurança energética para as comunidades beneficiadas. Diante do exposto, este artigo tem por objetivo apresentar o alinhamento técnico e científico com o contexto popular, visando aprimorar e promover avanços no sistema biodigestor, por meio da interação e envolvimento das famílias beneficiadas pela tecnologia social aplicada às comunidades rurais do município de Lajes Pintadas/RN.

Materiais e Métodos

A parceria entre o ESF-Natal com a comunidade de Lajes Pintadas provém da parceria com o Serviço de Apoio aos Projetos Alternativos Comunitários (SEAPAC), a qual desenvolve o trabalho de promoção à democratização de políticas públicas, visando contribuir com a vivência mais justa e digna, tendo como foco comunidades e assentamentos com dificuldade de acesso, baixa renda e pequenos agricultores do Semiárido Potiguar.

O modelo adotado na região é o Modelo Sertanejo, uma adaptação do Modelo Indiano, tendo em vista sua alimentação contínua e o clima da região, fundamental para a efetivação de seu processo.

Nele, a disposição de dejetos é posta na chamada caixa de carga, a qual é encaminhada para o tanque de fermentação, local onde ocorre o processo de formação de gases decorrente da ação anaeróbia das bactérias, que eventualmente servirão como alimentação da chama do fogão da residência. Alguns desses gases produzidos são: gás metano, carbônico e sulfídrico. Diretamente ligado ao tanque, temos a tubulação responsável pelo transporte do gás até o fogão, a qual passa por um sistema de filtragem através da água para a retirada de seus odores, para seguidamente ir para seu destino. Após esse processo, na caixa de descarga ocorre o despejo do resto de substâncias utilizadas na fermentação, sendo separadas em dois espaços da caixa, o primeiro para itens sólidos e o segundo para líquidos, posteriormente usados na adubação de solos para o plantio, evitando seu uso em raízes tuberosas, a qual tem contato direto com sua parte comestível. Seu modelo pode ser observado abaixo:

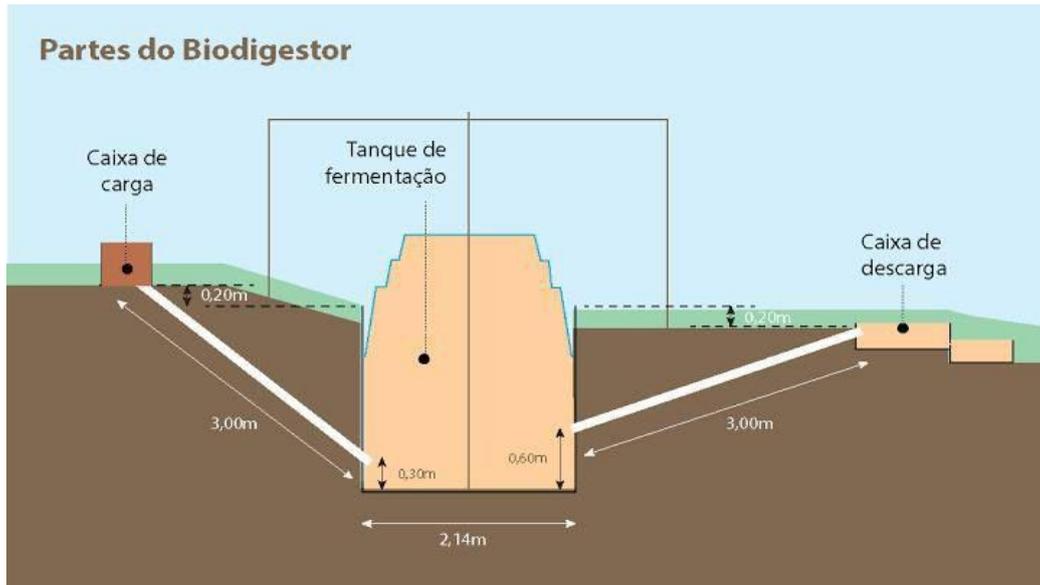


Figura 1: Sistema Biodigestor - Modelo Sertanejo.
Fonte: Fundação Banco do Brasil (2018)

O plano de construção adotado pelo projeto é de um biodigestor executado com uma caixa d'água de 3.000 L, seguindo o modelo abaixo:

PLANO GERAL - BIODIGESTOR

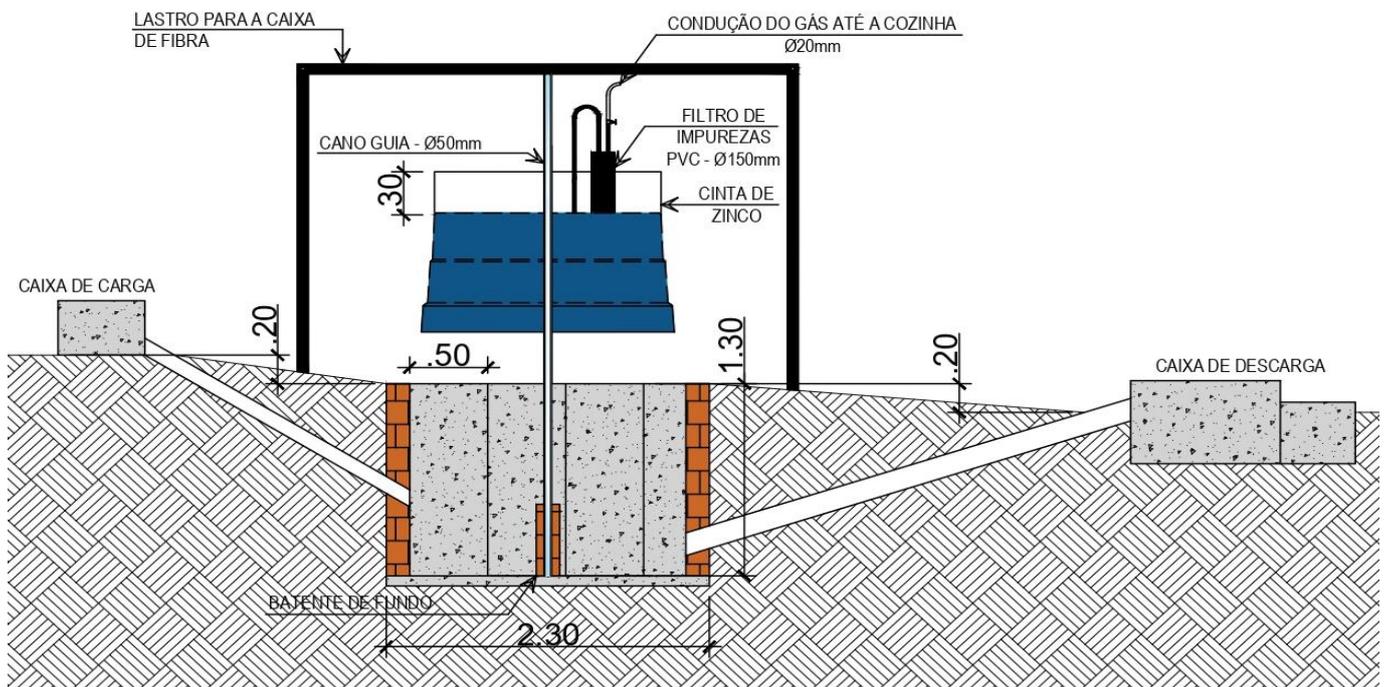


Figura 2: Plano de construção do Modelo Sertanejo.
Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

A relação entre população e projeto é de suma importância para o desenvolvimento do sistema, o qual necessita de alinhamento conforme sua execução, pois apesar de serem replicados o mesmo modelo, sua implantação tem que ser analisada de forma particular, tendo em vista alguns pontos como a geologia do terreno a ser escolhido, sua posição estratégica com relação à residência, o fluxo de animais e o manejo de sua alimentação. Com isso, a parceria com os agricultores familiares é fundamental para a análise de dados do sistema, fornecendo o tipo de alimentação, periodicidade e a sua produção, servindo como dados para estudos que visam o aprimoramento da contribuição do gás para a residência, sendo amplamente acompanhados de forma remota



e presencial.

O Projeto Biodigestor acompanha seus sistemas através de formações, visitas mensais e *feedbacks* da comunidade, tendo importante participação da SEAPAC, responsável por sua implementação nas localidades, sendo um parceiro fundamental para o êxito do projeto. Durante as suas visitas, faz-se necessário um alinhamento sobre suas necessidades e adversidades, conhecendo seus membros, suas rotinas, objeções e expectativas, visando o melhor desenvolvimento e instalação do sistema para se adequar às expectativas dos agricultores familiares participantes.

Dado isso, a aproximação do projeto com a comunidade é fundamental para a sua ampliação e desenvolvimento, sempre buscando entender as dificuldades enfrentadas junto à população e alinhando melhorias para o equipamento, contando com conhecimentos populares e alinhando aos conhecimentos técnicos.

A SEAPAC é a responsável por sua fase de execução, contando com profissionais habilitados que repassam seus conhecimentos para a comunidade por meio de treinamentos e discussões em encontros, visando repassar seus métodos construtivos para futuramente serem replicados na localidade, podendo assim abranger mais famílias na localidade. Após a conclusão do sistema, são feitos testes em sua operação, visando minimizar os riscos de seu uso. Em seguida, sua produção é iniciada, com foco no tratamento de seus dejetos e formação do biofertilizante e biogás, posteriormente usados para adubação e geração da chama utilizada no fogão.

Posto isso, o alinhamento dos processos para a sua fase de operação segue uma linha contínua: em sua primeira fase são traçadas as necessidades da família a ser atendida pelo biodigestor, visando entender seu núcleo familiar e suas demandas para a residência, tendo como objetivo ajustar a alimentação diária de seu sistema. Posteriormente, na segunda fase são realizadas reuniões com os agricultores familiares para apresentar as propostas de implementação dos biodigestores, visando adequar melhor o sistema na região.

Por conseguinte, na terceira fase, o projeto visa apresentar seu método construtivo, oferecendo treinamentos a fim de futuramente serem replicados pela população, como também fornecer debates sobre os sistemas já em funcionamento, alinhando as necessidades e adaptações possíveis para sua melhor produção. Na quarta e última fase acontece a execução e operação do sistema, seguindo de testes para o êxito da operação. Consequentemente, ao serem validados, os sistemas começam a ser alimentados e, com o auxílio da decomposição anaeróbia, são produzidos biogás e biofertilizante, contribuindo com a diminuição das despesas familiares. A esquematização desse processo pode ser observada na figura abaixo, reunindo as fases para a sua conclusão:



Figura 3: Planejamento da implementação do Sistema Biodigestor na comunidade.

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Resultados e Discussão

As comunidades rurais do semiárido nordestino comumente situadas em áreas geograficamente isoladas, enfrentam sérias limitações financeiras e lidam com os efeitos da desertificação, agravados pelas estiagens prolongadas. Adicionalmente, essas comunidades enfrentam um contexto de desigualdade social, o que intensifica os desafios existentes. Dessa forma, o modelo de biodigestor proposto adaptado às condições do local sem comprometer o funcionamento e a segurança da tecnologia,



se constitui como uma solução social que visa o acesso ao saber, desenvolvimento local, atendimento às necessidades sociais, educação e preservação ambiental.

Na comunidade, observa-se um crescente interesse pelo projeto, impulsionado por motivações similares. Há uma preocupação com a saúde das mulheres, que são, em sua maioria, responsáveis pela alimentação no lar, uma vez que estas se desgastam na coleta e corte da lenha, e estão expostas à fuligem e sujeira gerada com a queima. Desta forma, tal procura se justifica sobretudo pelo anseio por um espaço seguro para as necessidades básicas da família, em virtude da potencialidade de risco de acidentes domésticos. Além disso, os moradores buscam evitar o gasto financeiro associado à aquisição de botijões de gás, que têm um custo médio na região de R\$ 130,00 e uma durabilidade de cerca de 35 dias para famílias comumente compostas por 4 residentes.

Além da economia, conforto e proteção para as famílias, ressalta-se ainda a contribuição ambiental da tecnologia com a destinação dos dejetos dos animais que produziram CH₄ (metano) na atmosfera, e é reaproveitado com CO₂ para utilização doméstica. Tal solução social cumpre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS's) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015 que compõem uma agenda mundial de construção e implementação de políticas públicas que visam guiar a humanidade até 2030. Um biodigestor contribui para o cumprimento das seguintes ODS: 3 - Boa saúde e bem estar, 11 - Cidades e comunidades sustentáveis, 13- Combate às alterações climáticas e 15- Vida sobre a terra, 10 - Redução das desigualdades. Uma vez que reduz a exposição a doenças relacionadas à contaminação ambiental, pelas fezes dos animais de forma aleatória, e a não inalação dos gases emitidos na queima da lenha e carvão, promovendo saúde pública. A produção de biogás ainda é auto suficiente energeticamente, constituindo-se como uma fonte de energia renovável através da conversão de resíduos e auxilia na mitigação do efeito estufa visto que captura o metano e o converte em biogás. A tecnologia social ainda combate a degradação ambiental da atmosfera com a erradicação da queima da lenha e protege o solo de contaminação, além de o fortalecer com o enriquecimento de nutrientes por meio do biofertilizante gerado, auxiliando na fertilidade do mesmo. Adicionalmente, o impacto social causado pelas mudanças citadas anteriormente afetam positivamente em quesito financeiro, podendo aumentar a quantidade de renda adquirida pela família e diminuição de custos, gerando impacto financeiro, e social, uma vez que esse lucro extra pode permitir que membros da família não precisem de meios a mais para adquirir renda, podendo aliviar possíveis sobrecargas.



Figura 4: Biodigestor do modelo sertanejo em Lajes Pintadas/RN.
Fonte: Acervo do Projeto (2023)

Como pode-se observar na Figura 2, o biodigestor sertanejo é projetado para ser construído com materiais de fácil acesso nos territórios sertanejos como, por exemplo, caixa d'água, tubos e conexões plásticos, madeiras de construção e alvenaria simples que é semelhante ao processo de construção das cisternas, apresentando estrutura circular amplamente difundida e conhecida pelos pedreiros das comunidades sertanejas. De modo geral, as adaptações para o desenvolvimento do biodigestor sertanejo prezam por torná-lo uma tecnologia de fácil apropriação, manutenção e reaplicação pelas famílias sertanejas, objetivo de uma tecnologia social a ser gerenciada socialmente pelas comunidades rurais.

Apesar de haver modelos padronizados, diversos parâmetros diferenciam os biodigestores, seja o local de instalação e os materiais disponíveis. Destaca-se que o biodigestor sertanejo o qual foi apresentado à Lajes não apresenta a mesma configuração que os instalados hoje. Tal fato se deve às modificações inerentes às condições em que o dispositivo foi submetido. Observa-se que tais soluções desenvolvidas para problemas e ajustes, a partir da auto mobilização comunitária são sobretudo inéditas, e empíricas, de forma que se exercita a criatividade e inovação da comunidade para adaptação e aprimoramento do dispositivo dentro das ferramentas disponíveis no semiárido e revela o profundo conhecimento da dinâmica e hidráulica envolvida no sistema por parte dos envolvidos.

A partir da instalação inicial de vinte e cinco biodigestores, a comunidade começou a interagir com a tecnologia, revelando tanto os benefícios quanto os desafios associados à sua adoção no contexto cotidiano. Este período inicial marcou o início de um processo de adaptação à nova tecnologia. Durante essa fase, foram identificados alguns problemas pelas famílias,



como rachaduras nos galões de água utilizados nos filtros, além do desgaste do material. Como resposta a esses desafios, foi decidido substituir o material dos filtros, substituindo os galões de água por canos de PVC. Essa mudança foi motivada pela suscetibilidade dos galões às condições climáticas adversas, especialmente à exposição solar intensa, o que resultava em vazamentos de gás e perdas. Além disso, foram fornecidas orientações aos moradores sobre a distribuição adequada do peso sobre a caixa d'água, a fim de mitigar potenciais impactos na produção de gás.

Diante de uma recepção favorável das famílias assistidas, a SEAPAC solicitou uma formação para mobilizar e incentivar mais famílias a adotarem a tecnologia. Na formação foram apresentadas as funcionalidades do biodigestor, dissipadas dúvidas e estabelecido um vínculo mais estreito entre o projeto e a comunidade, além de facilitar a compreensão de conceitos anteriormente complexos para os novos interessados. Após esse período inicial de interação teórica sobre a tecnologia, os agricultores familiares participantes compartilharam suas experiências e percepções com vizinhos e conhecidos em um ambiente de troca de experiências com a comunidade como um todo.

Após sensibilização, mobilização e formação iniciou-se a construção de mais vinte e cinco biodigestores para as famílias rurais e novas contribuições de melhoria do biodigestor foram feitas pelos agricultores familiares que observavam a construção e funcionamento do equipamento no seu dia a dia. A substituição da caixa d'água de polietileno por uma de fibra de vidro foi realizada devido à tendência da primeira em tornar-se instável e ser muito maleável, resultando em perdas e dificuldade de manejo para retirada. Além disso, foi desenvolvido um equipamento para levantar a caixa d'água quando necessário para manutenção e limpeza, considerando a dificuldade que as famílias demonstraram em desmontar o dispositivo, levando em conta o peso e a quantidade de pessoas necessárias para tal ato, e outro para nivelar a base de concreto, onde o tubo guia seria inserido, visando evitar desalinhamentos que pudessem afetar o desempenho da tecnologia social, já que algumas caixas estavam visivelmente fora do eixo central, fato observado e relatado pela SEAPAC.

Com um total de cinquenta e uma famílias participantes - a primeira com o protótipo, seguida por vinte e cinco famílias iniciais e mais vinte e cinco posteriormente - os resultados demonstraram promissor impacto positivo. Foi relatado uma extensão do período de utilização dos botijões de gás (ou a não necessidade de uso), em comparação ao período anterior à adoção do biodigestor, o que permitiu às famílias diminuir o custo com o gás de cozinha. Também foi relatado que o uso do biofertilizante contribuiu para o crescimento e saúde das plantações consumidas, melhorando a alimentação e segurança alimentar e com o excedente usado para comercialização pelas famílias aumentando a sua renda. Relatos de plantas mais vigorosas e saudáveis, com redução de problemas como folhas amareladas ou murchas, evidenciaram também os benefícios da tecnologia implementada. Além de que, o excesso de biofertilizante gerado estava sendo doado e até mesmo vendido por aquelas famílias que o produziam de forma que excedia o uso pessoal.

Observa-se como resultado do trabalho social, que os moradores se engajaram, assumindo papéis proativos de forma voluntária em colaboração com a associação parceira para construção, auxiliando seus vizinhos e amigos, o que fortaleceu os laços comunitários. O biodigestor ainda suscita visitas, e diálogos entre famílias que trocam conhecimentos sobre o uso do equipamento, como alguns aditivos (soro de leite e palma forrageira) usados para acelerar a produção de gás, além de quantas vezes o biodigestor era alimentado por semana e a eficácia do biogás para queima e geração de chama. Tal protagonismo contribuiu para apropriação da tecnologia, de forma que quando há interrupção de funcionamento da tecnologia, seja por interrupção no abastecimento, ou diminuição da chama, as famílias entram em contato com a assistência do projeto para informar a problemática e a solução já efetuada pelos mesmos.

Sabe-se que são necessários estudos avaliativos e monitoramento contínuo sobre os biodigestores já instalados sob este padrão no sertão nordestino para verificar sua qualidade, e será a etapa seguinte de atuação do projeto. Tal atividade, destaca-se uma vez que a legislação estadual não possui parâmetros limite para aplicação de biodigestores de monitoramento. Atualmente, após a fase de instalação, a equipe do ESF-Natal visa analisar a produção de gás e biofertilizante gerada e em campo suscitar o registro de informações da operação do tanque para melhor avaliá-lo e otimizá-lo. Como também o fichamento e construção documental das ações já realizadas.

Apesar da quantidade de biogás gerada ser satisfatória, depoimentos dos agricultores relatam que no período de estiagem há dificuldade em se obter água para homogeneizar a biomassa. Como também que no período de chuva, há a diminuição do abastecimento e assim o biofertilizante gerado se torna muito líquido. Os próprios moradores experimentaram e comprovaram a eficiência de inserir o biofertilizante aquoso para homogeneizar a biomassa na alimentação. Esses aspectos serão cuidadosamente examinados na próxima etapa do projeto, que tem como objetivo principal fornecer feedback e credibilidade por meio do monitoramento contínuo da tecnologia implementada na comunidade. A partir disso, serão delineadas estratégias de otimização para o padrão atual. Ou seja, apesar das dificuldades enfrentadas e particularidades de cada dispositivo, observa-se um ganho financeiro, ambiental, social e educacional com o projeto. Em relação ao engajamento social, observa-se que o biodigestor resultou em impactos importantes nos aspectos de mobilização e participação social, conectando comunidades isoladas entre si. A intervenção espontânea da comunidade gerou discussões sobre o uso e a manutenção da tecnologia até alcançar soluções para o projeto.

Considerações Finais

Portanto, é válido enfatizar a importância do projeto para a comunidade de Lajes Pintadas, o qual contribui para a popularização de políticas públicas para os agricultores familiares, auxiliando em sua produção de alimentos tanto para o consumo do núcleo familiar como para auxiliar em outras fontes de renda, visando a implementação de tecnologias sociais que estejam associadas à região, disseminando a informação e contribuindo para uma vida mais justa para a população.



Dado isso, ressalta-se o papel ativo da parceria entre o ESF-NATAL e a SEAPAC, que, além de implantar técnicas voltadas para o desenvolvimento da comunidade utilizando tecnologias sociais, também oferecem treinamentos para que não dependam exclusivamente da instituição, podendo assim reproduzir os sistemas em maior escala. Isso é facilitado pelo fácil acesso aos materiais para a população, visando a redução de custos através da fácil construção, e contando com o apoio de uma comunidade participativa.

Agradecimentos

Gostaríamos de expressar nossa profunda gratidão às instituições e indivíduos que tornaram possível a realização deste projeto. Ao Serviço de Apoio aos Projetos Alternativos Comunitários - SEAPAC, estamos profundamente agradecidos pelas visitas à comunidade, pela assistência no projeto e pelo compromisso em ajudar a promover o desenvolvimento sustentável nas comunidades com vulnerabilidade social. À Universidade Federal do Rio Grande do Norte, reconhecemos com gratidão o suporte valioso que nos foi oferecido, fornecendo recursos para o desenvolvimento deste projeto. À incubadora Engenheiros Sem Fronteiras núcleo Natal, a qual fazemos parte, expressamos nossa apreciação pela colaboração e pelo suporte contínuo ao longo de todo o processo. A todos os membros do projeto biodigestor, cujo comprometimento e trabalho árduo foram essenciais para alcançarmos uma boa vivência com a comunidade, prestando suporte técnico aos beneficiados. As estimadas professoras e orientadoras do projeto, expressamos nossa profunda gratidão pela orientação, encorajamento constante e pelo compartilhamento de conhecimento, que foram fundamentais para o desenvolvimento do projeto e dessa maneira, da comunidade. Por fim, gostaríamos de agradecer à comunidade de Lajes Pintadas pelo caloroso acolhimento, confiança e troca de saberes, os quais foram fundamentais para a implementação deste projeto. Que esta tecnologia social alcance o maior número de famílias e novos beneficiados.

Referências Bibliográficas

ASA, 2023 - ARTICULAÇÃO DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO (Brasil) (org.). Semiárido - É no semiárido que a vida pulsa! 2023. Disponível em: <https://www.asabrasil.org.br/semiarido>. Acesso em: 05 abr. 2023

FREYRE, Gilberto. Homens, engenharias e rumos sociais. São Paulo: Record, 1987.

RAD, 2021 - RELATÓRIO ANUAL DO DESMATAMENTO NO BRASIL- Disponível em: https://s3.amazonaws.com/alerta.mapbiomas.org/rad2021/RAD2021_Completo_FINAL_Rev1.pdf. Acesso em: 10 abr. 2024.

RUFINO, S; MOREIRA, F. D [Orgs.]. “Engenharia Popular - Construção e gestão de projetos de tecnologia e inovação social”. Livro eletrônico. Viçosa, MG: Engenheiros sem Fronteiras, 2020.

Serviço de Apoio aos Projetos Alternativos Comunitários - SEAPAC. Disponível em: <https://www.seapac.org.br/>. Acesso em: 10 abr. 2024.

QUIRINO, Kelly. Sabe o que é um biodigestor? FUNDAÇÃO BB, 2018. Disponível em: <https://fbb.org.br/pt-br/ra/conteudo/ods-7>. Acesso em: 12 abr. 2024.



ESTIMATIVA PRELIMINAR DO POTENCIAL HIDRELÉTRICO DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BRAÇO DO NORTE, SANTA CATARINA, BRASIL

1Lauanne Oliveira Pimentel, 2Elaine Ribeiro Grassi, 3Diana Paula Hoffmann

1 Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail: lauanne.p@hotmail.com; 2 Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail: elainergrassi@gmail.com; 3 Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail: dianap.hoffmann@gmail.com

Palavras-chave: Energias renováveis; Potencial hidrelétrico; Delimitação de bacia hidrográfica.

Resumo

A energia hidrelétrica representa uma opção significativa para a geração de eletricidade, especialmente no Brasil, onde 58% da capacidade instalada na matriz energética é proveniente desse recurso. A abundância de recursos hídricos no país impulsiona esse método de aproveitamento, visando a autossuficiência energética e o desenvolvimento regional. Nesse sentido, o presente estudo teve como objetivo avaliar o potencial de aproveitamento hidrelétrico da sub-bacia hidrográfica do rio Braço do Norte, Santa Catarina, Brasil, utilizando técnicas de geoprocessamento e um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Para tanto, realizou-se a delimitação da sub-bacia hidrográfica do rio Braço do Norte utilizando o *software* ArcGIS 10.8. Em seguida, calculou-se o potencial de geração de energia hidrelétrica e determinou-se o tipo de usina apropriado com base no manual da Eletrobrás. Os resultados indicaram que a sub-bacia hidrográfica do rio Braço do Norte, apesar de ter uma queda concentrada, não se mostrou adequada para aproveitamento hidrelétrico por Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), mas sim para Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGHs), com uma capacidade de 4.741,1 kW, utilizando turbina Francis. Esse estudo contribui para a identificação de potenciais locais de aproveitamento hidrelétrico, ressaltando a importância de uma abordagem holística que considere não apenas aspectos técnicos, mas também impactos ambientais e sociais.

Introdução

Uma das opções para gerar eletricidade envolve a conversão da energia hidráulica disponível. Esse método de aproveitamento é particularmente vantajoso no Brasil, representando 58% da capacidade instalada na matriz energética, devido à abundância de recursos hídricos no país (EPE, 2023). De acordo com o MME (2007), o aproveitamento do potencial hidrelétrico do Brasil tem crescido, principalmente por meio da construção de grandes empreendimentos, visando tornar o país autossuficiente em energia elétrica, usando tecnologia nacional.

Além disso, mudanças institucionais e regulamentares, que resultaram na reestruturação do setor elétrico brasileiro, incentivaram a descentralização da geração de energia, favorecendo a disseminação de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs). As PCHs são definidas pela Resolução Normativa nº. 875 da ANEEL como empreendimentos destinados a autoprodução ou produção independente de energia elétrica, cuja potência instalada seja superior a 5.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW e com área de reservatório de até 13 km², excluindo a calha do leito regular do rio (ANEEL, 2020). Geralmente este tipo de empreendimento procura atender demandas próximas aos centros de carga, em áreas periféricas ao sistema de transmissão e em pontos marcados pela expansão agrícola nacional, promovendo o desenvolvimento de regiões remotas do país.

Por ser um dos grandes usuários dos recursos hídricos no Brasil, o setor de energia elétrica tem a responsabilidade de estudar e planejar a implantação de novas iniciativas de forma racional e otimizada, contemplando os usos múltiplos da água preconizados pela Lei nº. 9.433/97 (BRASIL, 1997), que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH).

Sendo assim, no projeto para a implantação de um empreendimento hidrelétrico são necessários estudos e projetos, compreendendo cinco etapas: (a) estimativa do potencial hidrelétrico, (b) inventário hidrelétrico, (c) viabilidade, (d) projeto base e (e) projeto executivo. De acordo com MME (2007), a primeira etapa, estimativa do potencial hidrelétrico, trata-se de um estudo preliminar de características da bacia, como hidrológicas e topográficas, com o objetivo de avaliar sua aptidão para geração de energia. Essa análise é realizada em escritório, com dados existentes disponíveis e permite uma primeira avaliação do potencial hidrelétrico e a estimativa do custo de aproveitamento na bacia hidrográfica.

A aplicação de técnicas de geoprocessamento oferece grande benefício na avaliação preliminar do potencial hidrelétrico em pequenas bacias hidrográficas. Através de cruzamentos, superposições e análise de dados espaciais, é possível aprimorar os procedimentos de mapeamento temático e estudo hidrológico de bacias que, anteriormente, eram dispendiosos e demorados. Devido às suas características técnicas distintas, o Sistema de Informações Geográficas (SIG), um dos principais componentes do geoprocessamento, representa uma ferramenta de grande eficácia para auxiliar no planejamento, gerenciamento e análise de projetos e, também, iniciativas socioeconômicas e ambientais. De acordo com a definição de Maguirre *et al.* (1991), esse sistema pode ser caracterizado por três propriedades fundamentais: a habilidade de apresentar informações cartográficas complexas, uma base integrada de elementos espaciais e um instrumento sofisticado para a análise espacial.

Sob essa perspectiva, destaca-se que o estado de Santa Catarina possui um grande potencial hidrelétrico devido aos diversos cursos d'água que atravessam seu território e ao regime de chuvas abundantes, principalmente através de PCHs e CGHs. Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de aproveitamento hidrelétrico da sub-bacia hidrográfica do rio Braço do Norte, Santa Catarina, Brasil, utilizando técnicas de geoprocessamento e um SIG.

Material e Métodos

Área de estudo

A área de estudo é a sub-bacia do rio Braço do Norte (Figura 1), localizada na bacia hidrográfica do rio Tubarão. O rio Braço do Norte está situado na Região Hidrográfica 9 (Sul Catarinense) do estado de Santa Catarina. De acordo com a classificação climática de Köppen, essa região possui clima subtropical úmido nas áreas de menor altitude e clima temperado úmidos nas áreas de maior altitude.

A escolha desse local se deu pelo fato de ser o maior rio da bacia hidrográfica do rio Tubarão em termos de comprimento, e o que apresenta a maior vazão já que sua área de drenagem é maior que os demais. Ademais, ainda é o rio com o melhor potencial de aproveitamento, pois abriga quatro dos cinco empreendimentos de geração hidrelétrica por PCHs na bacia, sendo eles: Santa Rosa, Rio Fortuna, São Maurício e Barra do Rio Chapéu. Considerando o exposto, o trabalho visou avaliar o potencial para aproveitamento hidrelétrico, aproveitando-se da existência de uma queda concentrada e de potenciais outorgados para comparação dos cálculos.

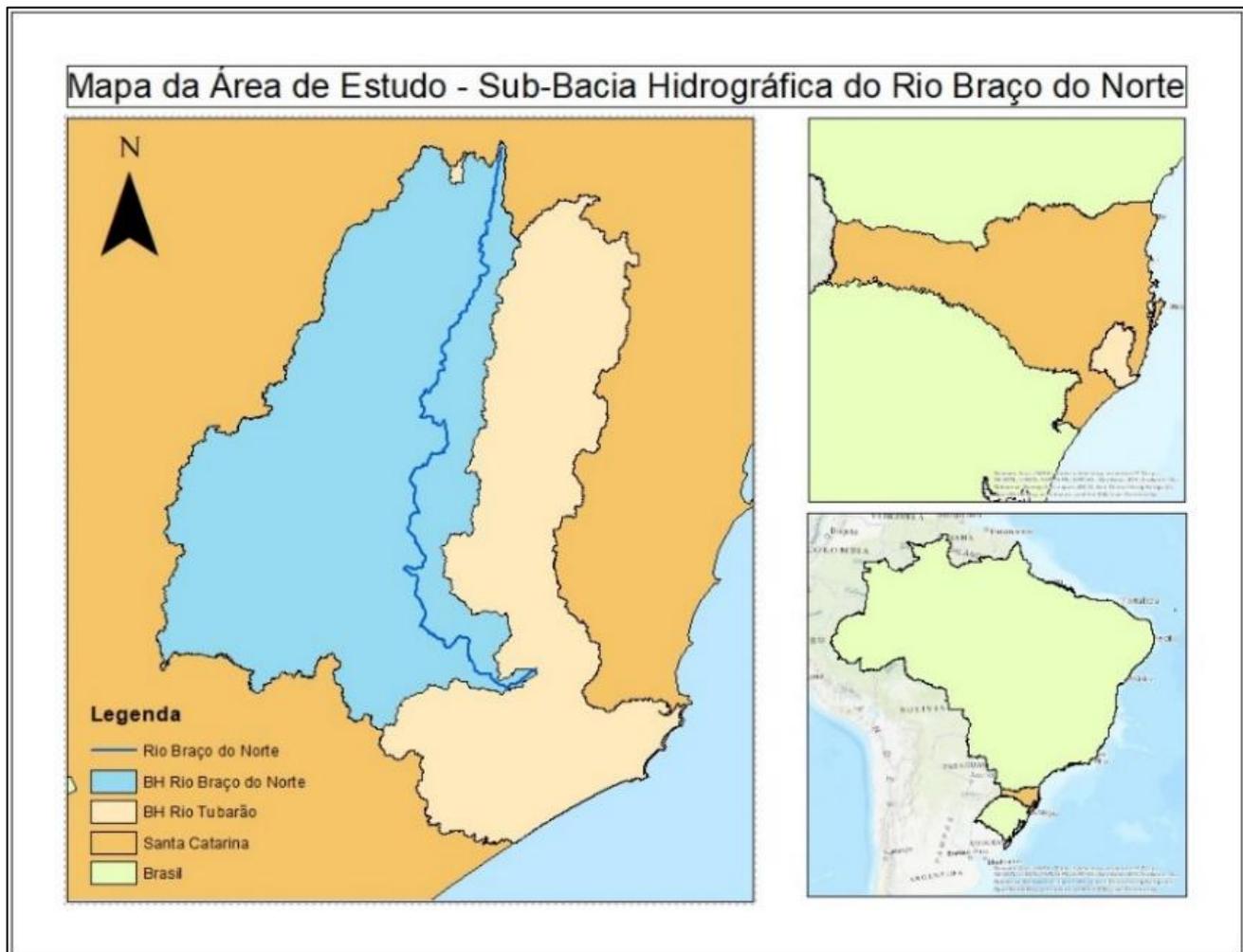


Figura 1: Mapa de localização da sub-bacia hidrográfica do rio Braço do Norte.

A Figura 2 apresenta o Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia hidrográfica do rio Braço do Norte (local de estudo).

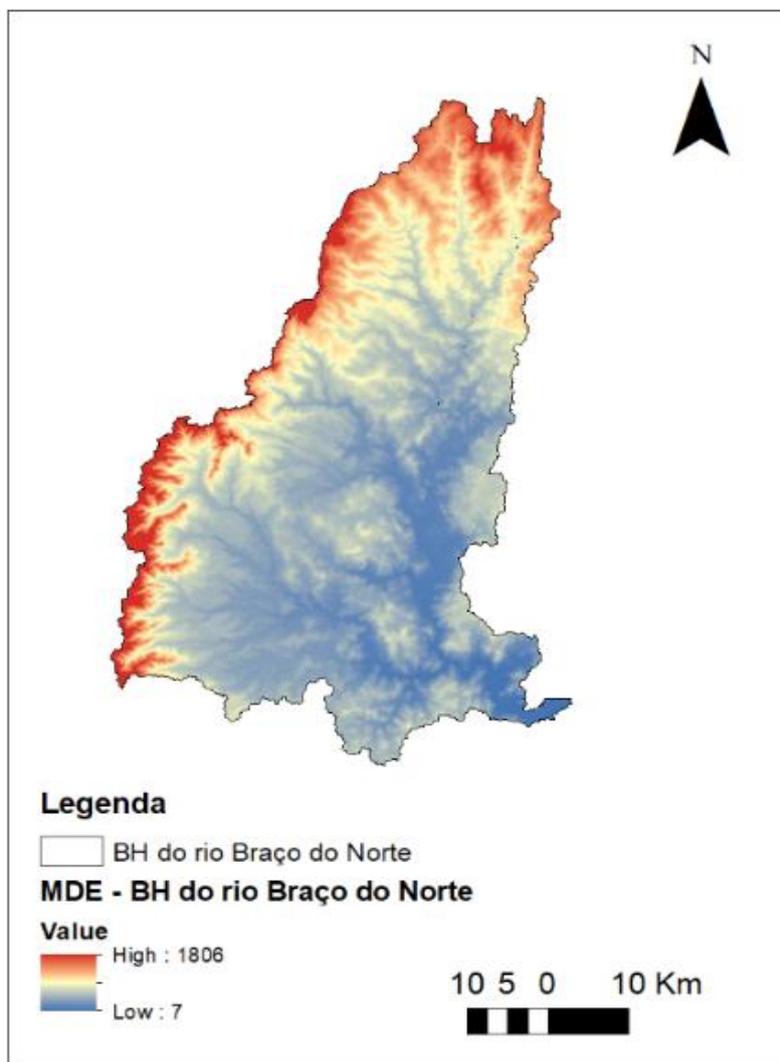


Figura 2: Modelo Digital de Elevação da bacia hidrográfica do rio Braço do Norte.

A Tabela 1 mostra um resumo das características físicas da bacia do rio Braço do Norte, sendo que os parâmetros área, perímetro, comprimento do rio principal, comprimento total de rios, declividade média da bacia, declividade média do rio principal e ordem do rio principal foram calculados através do *software* ArcGIS, após a realização da delimitação da sub-bacia do rio Braço do Norte. Os demais (densidade de drenagem, coeficiente de compacidade e fator de forma) foram calculados por fórmulas clássicas disponíveis na literatura.

Tabela 1: Características físicas da sub-bacia do rio Braço do Norte

Parâmetro	Valor obtido	Unidade	Interpretação
Área	2.832,24	Km ²	
Perímetro	379,05	Km	
Comprimento do rio principal	130,40	Km	
Comprimento total de rios	7.464,97	Km	
Declividade média da bacia	0,01	m.m ⁻¹	
Declividade média do rio principal	0,007	m.m ⁻¹	
Densidade de drenagem	2,63	Km.Km ⁻²	Bacia bem drenada
Coeficiente de compacidade	1,99	-	Bacia não sujeita a grandes enchentes
Fator de forma	0,16	-	Bacia não sujeita a grandes enchentes
Ordem do rio principal	6 ^a	-	



Delimitação da sub-bacia hidrográfica

Com o intuito de realizar a delimitação da sub-bacia hidrográfica do rio Braço do Norte, utilizou-se o programa ArcGIS 10.8, uma aplicação de Sistema de Informação Geográfica (SIG) que simplifica a gestão de repositórios de dados georreferenciados, a consolidação de informações cartográficas, a análise de dados geoespaciais e a criação e utilização de representações cartográficas digitais em formatos vetoriais (.shp) e matriciais (.GRID/.TIN).

Para a elaboração dos cálculos e das tabelas foi utilizado a planilha eletrônica Excel. Todos os dados utilizados neste trabalho estão listados na Tabela 2 e foram obtidos gratuitamente.

Tabela 2: Dados utilizados para delimitação da sub-bacia

Dado	Formato	Fonte
Cartas topográficas	Vetorial	EPAGRI/CIRAM
Limite das unidades hidrográficas de Santa Catarina	Vetorial	EPAGRI/CIRAM
Série histórica de precipitação	Planilha eletrônica	ANA/HidroWeb
Localização estações pluviométricas	Vetorial	ANA/HidroWeb
Série histórica de vazão	Planilha eletrônica	ANA/HidroWeb
Diretrizes para os projetos de PCH	Documental	Eletrobrás

As cartas topográficas foram adquiridas no *site* da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), através da Mapoteca Digital de Santa Catarina (<http://ciram.epagri.sc.gov.br/mapoteca/>). Foram adquiridas as seguintes cartas topográficas: Aiurê, Anitápolis, Bom Jardim da Serra, Bom Retiro, Criciúma, Grão Pará, Jaguaruna, Lagoa de Garopaba do Sul, Laguna, Orleans, Rancho Queimado, São Bonifácio, São Martinho, Urubici e Tubarão. Todas as cartas são disponibilizadas no formato *shapefile* e escala 1:50.000, georreferenciados no *Datum* SAD 1969. Também foi adquirida a divisão das unidades hidrográficas de Santa Catarina no formato *shapefile* e georreferenciada no *Datum* SAD 1969.

Nas cartas topográficas, foram escolhidos os elementos geográficos incluindo cursos d'água, curvas de nível e pontos cotados presentes nas quinze cartas utilizadas como base para a definição dos limites da bacia do rio Tubarão e sub-bacia do rio Braço do Norte, dentro do ambiente do *software* ArcGIS. Usando as funcionalidades disponíveis no *software*, efetuou-se o processo de recorte da bacia, começando a partir do seu ponto de origem e abrangendo as áreas de maior elevação do terreno, resultando na criação de um polígono delimitador.

A identificação das estações pluviométricas a serem estudadas foi realizada através do Mapa das Estações Pluviométricas de Santa Catarina e da sua respectiva tabela de informações das estações, ambos disponíveis no portal do Sistema Nacional de Informações de Recursos Hídricos da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) <<http://www.ana.gov.br/portalsnrh/>>. Neste portal foram adquiridos os dados históricos de precipitação mensal de cinco estações e o arquivo vetorial em formato *shapefile* das localizações das mesmas (Tabela 3 e Figura 3).

Tabela 3: Resumo das informações das estações pluviométricas utilizadas no estudo.

Código estação	Nome	Município	Fonte	Altitude (m)	Série disponível		Precipitação média anual (mm)
					Período	Falhas	
2848000	Armazém Capivari	Armazém	ANA	21	1946-2019	6	1.323,70
2849028	Pedras Grandes	Pedras Grandes	ANA	40	1987-2019	2	1.508,24
2848006	Vargem do Cedro	São Martinho	ANA	166	1977-2019	3	1.884,20
2749010	Povoamento	Anitápolis	ANA	400	1943-1971	0	1.571,02
2748018	São Bonifácio	São Bonifácio	ANA	410	1977-2019	1	1.720,43

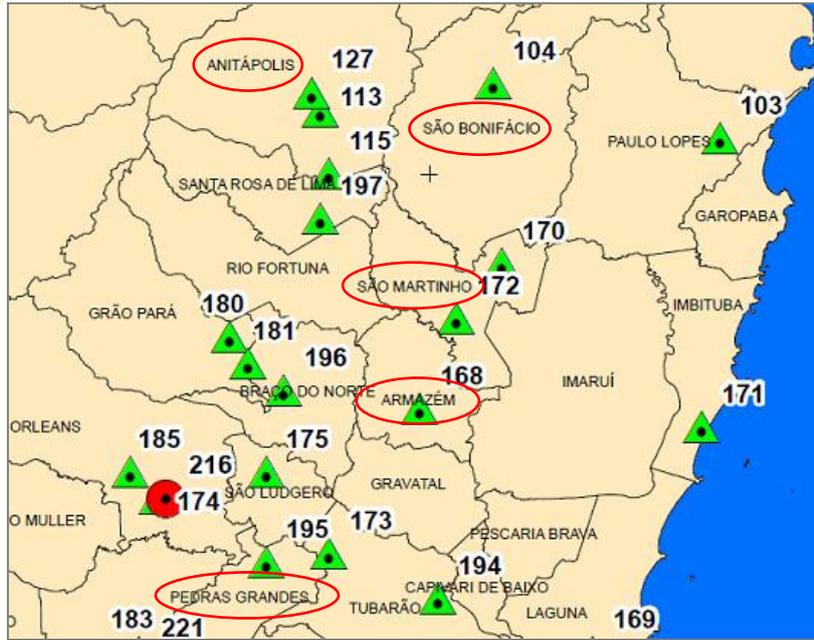


Figura 3: Localização das estações pluviométricas utilizadas.

Com base nas informações obtidas, possibilitou-se calcular a chuva média mensal e anual considerando todo o período de registro disponível, através de uma tabela dinâmica no Excel. Somado a isso, efetuou-se o mapa de isoietas para a sub-bacia hidrográfica do rio Braço do Norte, através da ferramenta de interpolação IDW no ArcGIS.

Para efetuar a estimativa da vazão, utilizaram-se dados provenientes da estação fluviométrica de Anitápolis (Figura 4), que se destacou como a mais próxima ao local de estudo. Essa estação, identificada pelo código ANA 84520000, abrange uma área de 380 m² e apresenta um conjunto de registros hidrológicos que abrangem o período de 1944 a 2014 (70 anos).

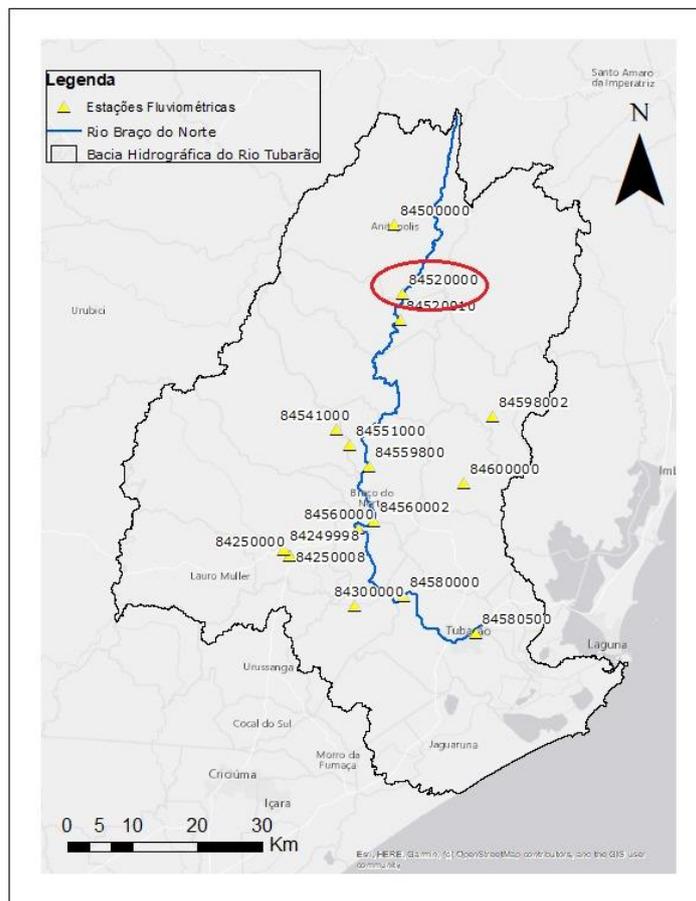


Figura 4: Localização da estação fluviométrica de Anitápolis.



A vazão sanitária/outorgável adotada por Santa Catarina, de acordo com as Portarias da SDS nº. 36 de 29/07/2008 e nº. 51 de 02/10/2008, será equivalente a 50% da vazão de referência, considerada a Q_{98} .

Para avaliar a disponibilidade hídrica frente às demandas de um rio, empregou-se o método da curva de permanência, uma das análises estatísticas mais simples e importantes na hidrologia, que expressa a relação entre a vazão e a frequência com que essa vazão é igualada ou superada durante um intervalo de tempo. A vazão avaliada na curva de permanência diz respeito ao local onde a estação fluviométrica está localizada. Como não havia disponibilidade de dados precisos para o local de interesse, recorreu-se ao método de regionalização de vazão, o qual transfere os dados levando em conta as áreas de drenagem. Assim, uma vez calculado as vazões de permanência, executou-se o cálculo das vazões regionalizadas, conforme Equação (1).

$$Q_1 = \frac{A_1}{A_2} \times Q_2 \quad (1)$$

Onde: Q_1 é a vazão do local de aproveitamento ($m^3.s^{-1}$), A_1 é a área de drenagem do local de aproveitamento (km^2), calculada via ArcGIS, A_2 é a área de drenagem do posto existente (km^2), fornecida pela ANA, e Q_2 é a vazão do posto existente ($m^3.s^{-1}$), calculada através da curva de permanência.

Com base nessa vazão de referência regionalizada, calculou-se o potencial de geração de energia hidrelétrica e determinou-se o tipo de usina a ser construída, conforme manual da Eletrobrás. Para estimar o potencial, calculou-se: (a) energia firme, (b) quedas bruta e líquida do local de aproveitamento, (c) potência instalada. A energia firme é dada pela Equação (2).

$$EF_e = 9,81 \times \eta \times Q \times H_{liq} \quad (2)$$

Onde: η é a eficiência da turbina-gerador (0,75-0,95), Q é a vazão volumétrica do rio ($m^3.s^{-1}$) e H_{liq} é a queda líquida. A queda bruta e líquida é dada pelas Equações (3) e (4), respectivamente.

$$H_{br} = Cota_{maior} - Cota_{menor} \quad (3)$$

$$H_{liq} = H_{br} - P_h \quad (4)$$

Onde: H_{br} é a queda bruta em metros e P_h são as perdas hidráulicas. As P_h foram adotadas no valor de 5%, pois os arranjos considerados no presente trabalho são do tipo adução em túnel/canal.

A potência instalada é dada pela Equação (5).

$$Pot = \frac{EF_e}{F_e} \quad (5)$$

Onde: EF_e é a energia firme estimada em kW, e F_e é o fator de capacidade, adotado, para esta fase, igual 0,55, conforme as diretrizes da Eletrobrás.

Resultados e Discussão

Dados hidrológicos básicos

Com base nos dados de chuva média mensal, foi possível calcular a precipitação média anual de todas as estações (Figura 5) e realizar o mapa de isoietas da sub-bacia do rio Braço do Norte (Figura 6).

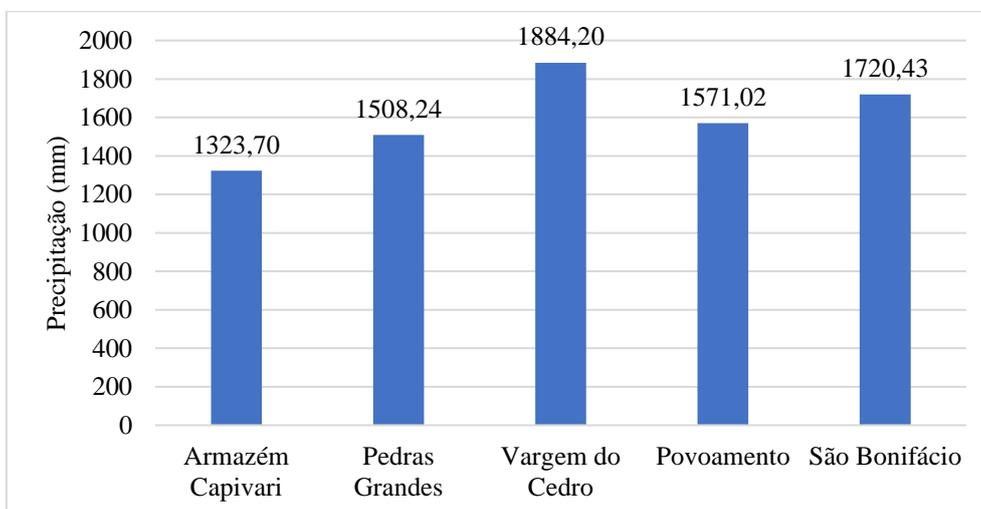


Figura 5: Precipitação média anual das cinco estações pluviométricas.

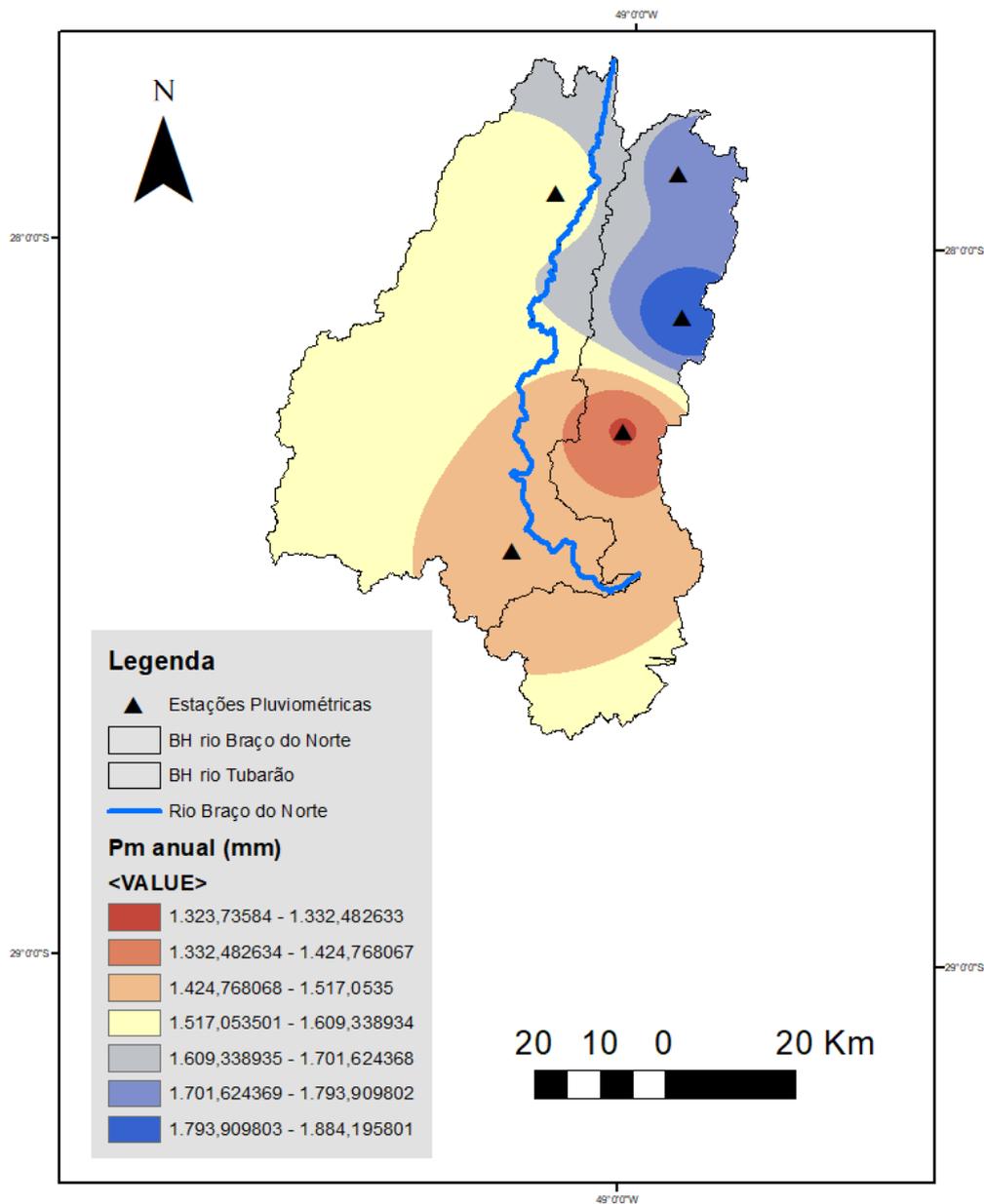


Figura 6: Mapa de isoietas da sub-bacia do rio Braço do Norte.

Diante do exposto, pode-se notar que o maior volume de precipitação, cerca de $1.880 \text{ mm.ano}^{-1}$, ocorre nas regiões mais altas da bacia. Já nas regiões mais baixas, próximo ao exutório, a precipitação é de aproximadamente $1.330 \text{ mm.ano}^{-1}$. As estações que mais influenciam na sub-bacia do rio Braço do Norte são Vargem do Cedro e São Bonifácio. Dessa forma, na ocorrência de um evento de precipitação, por probabilidade, essas regiões forneceriam uma maior descarga de precipitação para o rio Braço do Norte. De um modo geral, a precipitação se distribui bem por todos os meses do ano.

Com relação aos dados de vazão, a Figura 7 apresenta a curva de permanência de vazões média e mínima mensais para a estação de Anitápolis.

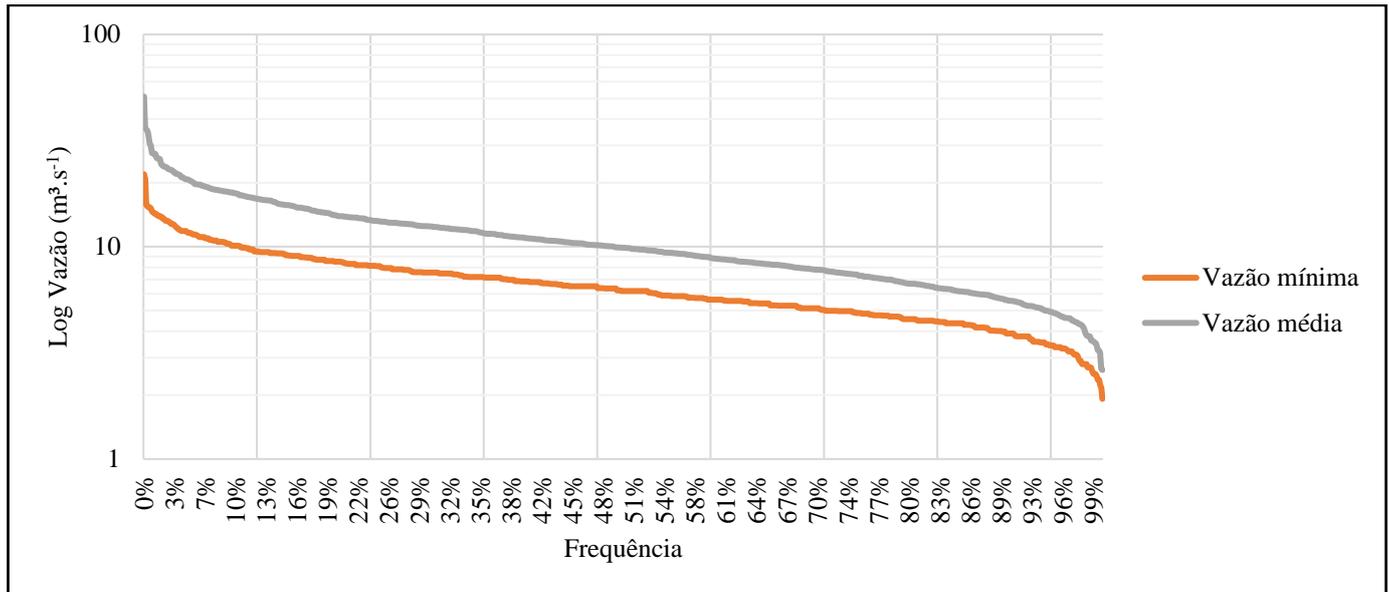


Figura 7: Curva de permanência das vazões média e mínimas mensais.

Pela análise da Figura 11 verifica-se que as vazões média e mínima mensais de referência, Q_{98} , são $4,179 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $2,797 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente. A Tabela 4 apresenta as vazões de referência e sanitárias.

Tabela 4: Vazão mínima e média referente a curva de permanência

Vazão de Permanência	Mínima mensal ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Média mensal ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
Q_{98}	2,797	4,179
$Q_{\text{sanitária}}$	1,3985	2,08954

Após a obtenção das vazões referente à curva de permanência, calculou-se as vazões regionalizadas, resultando nos valores apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Vazão mínima e média regionalizada

Vazão Regionalizada	Mínima mensal ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Média mensal ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
Q_{98}	2,720	4,064
$Q_{\text{sanitária}}$	1,360	2,032



Dados do potencial hidrelétrico

A Figura 8 apresenta o perfil longitudinal do rio Braço do Norte e o trecho escolhido para ser avaliado. Vale salientar que neste local já existe um empreendimento, nomeado PCH Santa Rosa, com capacidade instalada de 6.700 kW. Essa escolha levou em consideração a queda para aproveitamento hidrelétrico e a presença de um empreendimento, confirmando o potencial de geração de energia no trecho. Assim, realizou-se um comparativo entre a potência outorgada e a potência calculada na presente pesquisa.

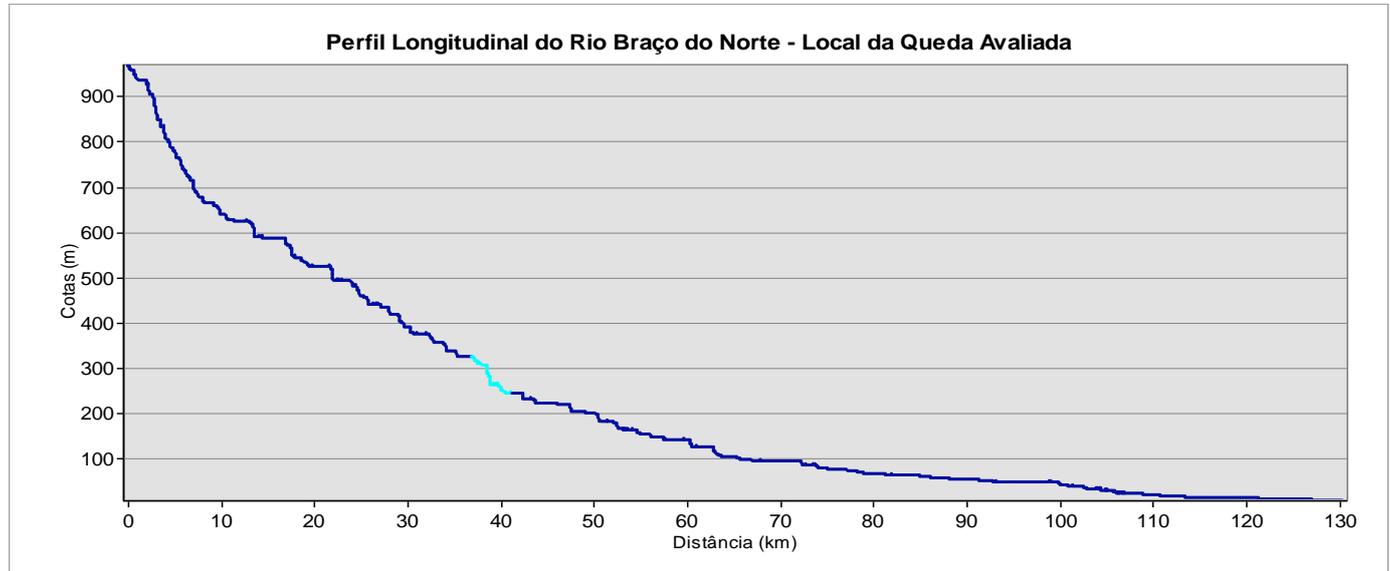


Figura 8: Perfil longitudinal do rio Braço do Norte e local de queda avaliado.

De acordo com a Figura 8, o trecho analisado (identificado em azul claro) possui a cota maior no valor de 324 m, e menor 243 m, resultando em uma queda bruta de 81 m, e queda líquida de 76,95 m. Considerou-se um canal de adução entre os arranjos. A área de drenagem da bacia é de 370 km². Com essas informações, obteve-se a energia firme (Tabela 6) e a potência instalada (Tabela 7).

Salienta-se, que, apesar da melhor vazão se dar mais próxima ao exutório, foi utilizado um ponto de verificação onde o rio apresentava uma queda concentrada, o que reduz a necessidade de grandes barragens e área de inundação. Ademais, conforme mostra o perfil longitudinal, o rio apresenta grande parte de sua extensão em área de planície, com baixa declividade média ou até mesmo com ausência de quedas concentradas.

Tabela 6: Energia firme em kW

Energia Firme	Mínima mensal (m ³ /s)	Média mensal (m ³ /s)
EF _e	1.745,237	2.607,609

Tabela 7: Potência instalada em kW

Potência instalada	Mínima mensal (m ³ /s)	Média mensal (m ³ /s)
Pot	3.173,2	4.741,1

Conforme apresentado na Tabela 7, a potência outorgável seria de 4.741,1 kW, não indicando potencial para aproveitamento hidrelétrico por PCH, e sim CGH. Presume-se que as diferenças nos valores de potência instalada e calculada ocorrem por conta das variáveis como o fator de capacidade e eficiência de turbina-gerador. No presente trabalho, adotou-se os valores genéricos sugeridos pela Eletrobrás, no documento “Diretrizes para estudos e projetos de PCHs” publicado em janeiro de 2000, e que desde então não tiveram atualizações.

Ademais, o empreendimento para ser instalado/outorgado precisa passar por outras avaliações minuciosas, a fim de avaliar as características geológicas, socioambientais, econômicas e de infraestrutura. Com isso, são feitos estudos utilizando dados de equipamentos reais, como turbinas e geradores, além dos dados de estrutura de barramento e nível do eixo de turbina.

Para escolher de forma preliminar o tipo de turbina, utilizou-se a queda líquida e a vazão de referência, conforme o Manual da Eletrobrás, ilustrado no gráfico da Figura 9. Com isso, o resultado obtido foi turbina do tipo Francis.

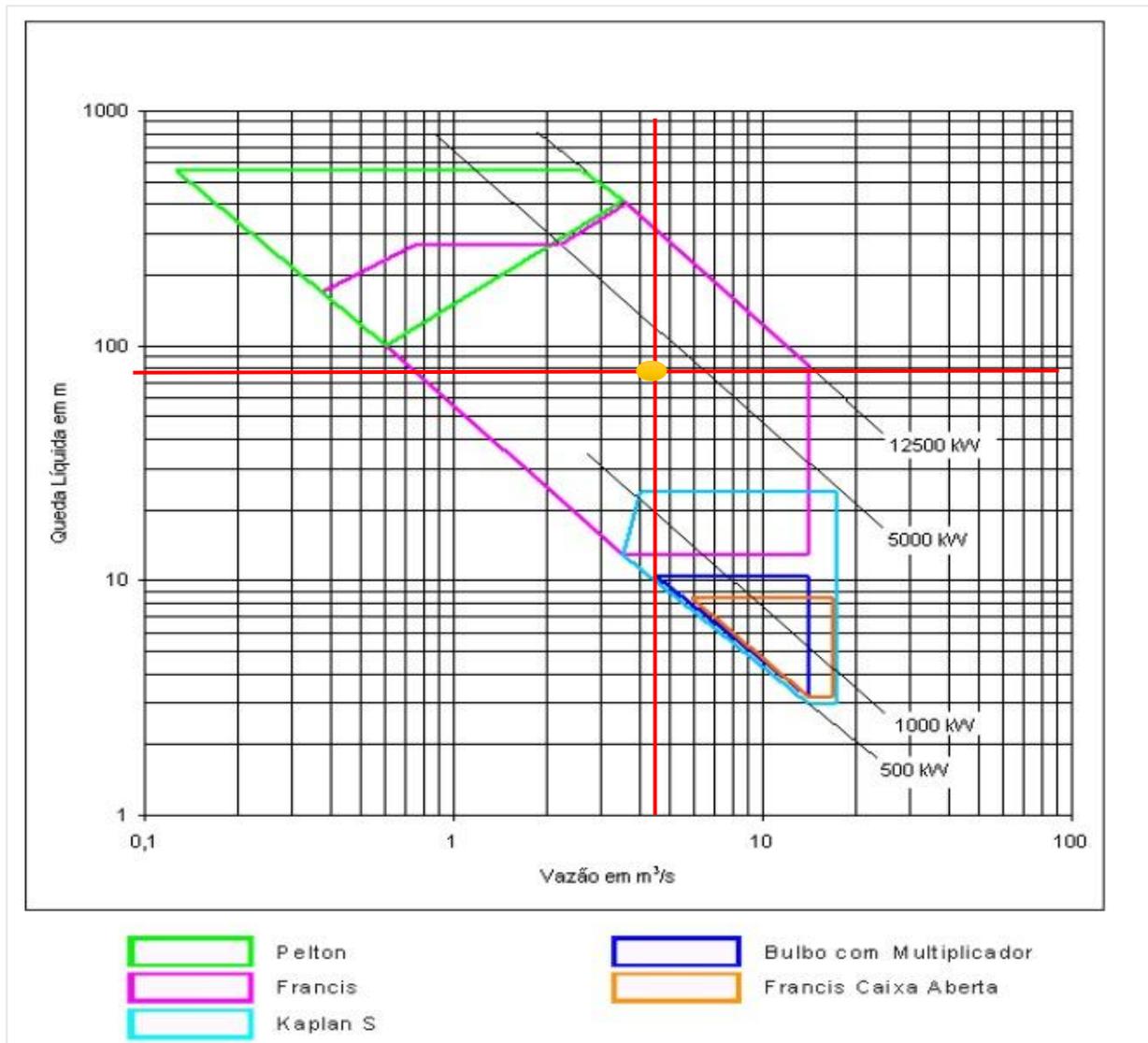


Figura 9: Escolha do tipo de turbina.

Considerações Finais

O geoprocessamento demonstrou ser uma ferramenta ágil e eficaz na caracterização hidrológica e topográfica das bacias hidrográficas, permitindo a integração de diversos aspectos, como hidrografia, precipitação e relevo, e viabilizando uma análise conjunta das informações.

O local avaliado na sub-bacia do rio Braço do Norte, apesar de possuir uma queda concentrada, não apresentou potencial para aproveitamento hidrelétrico por PCH, e sim CGH, no valor de 4.741,1 kW, com o tipo de turbina Francis.

É importante destacar que os resultados obtidos neste estudo abordam uma perspectiva teórica das condições físicas e hidrológicas favoráveis para empreendimentos hidrelétricos, sendo essencial uma análise mais aprofundada das implicações econômicas, sociais e ambientais envolvidas. Tal análise abrangeria aspectos como a viabilidade financeira da construção no local, a conformidade com a legislação vigente, a presença de Áreas de Preservação Permanente (APPs), Unidades de Conservação (UC) e outros fatores que possam influenciar a viabilidade do projeto.

Agradecimentos

As Autoras agradecem o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e do Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).



Referências Bibliográficas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. 2020. *Resolução n.º. 890, de 21 de julho de 2020*. Retifica a Resolução Normativa n.º 875, de 10 de março de 2020, que estabeleceu, de forma consolidada, as normas referentes aos procedimentos e requisitos para realização de estudos de inventário hidrelétrico de bacias hidrográficas, exploração e outorga de empreendimentos hidrelétricos. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2020890.pdf> . Acesso em: 28 set. 2023.

BRASIL. 1997. *Lei n.º. 9.433, de 8 de janeiro de 1997*. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei n.º 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei n.º 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9433.htm. Acesso em: 25 set. 2023.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. 2023. *Balanço Energético Nacional (BEN) 2023: Ano base 2022*. Disponível em < <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf> >. Acesso em: 05 out. 2023.

Maguirre, D. J.; Goodchild, M. F.; Rhind, D. W. 1991. *Geographical information systems: principles and applications*. Longman Scientific and Technical: Londres, 1096 p.

MME – Ministério de Minas e Energia. 2007. *Manual de inventário hidroelétrico de bacias hidrográficas*. MME/CEPEL Rio de Janeiro, 684 p.



A UTILIZAÇÃO DE BIODIGESTORES E DA COMPOSTAGEM COMO UMA SOLUÇÃO ENERGÉTICA SUSTENTÁVEL PARA O SANEAMENTO RURAL

1Héckzon Antonio Monteiro de Oliveira, 2Tatiana Rodrigues da Silva Baumgartner

1 Mestrando de Bioenergia da Unioeste Campus Toledo - PR, heckzon.oliveira@gmail.com; 2 Doutora em Engenharia Química da Unioeste Toledo - PR, tati.rb@hotmail.com

Palavras-chave: Agroenergia, Biomassa, Desenvolvimento Rural Sustentável

Resumo

Com a necessidade em produzir cada vez mais alimentos devido a alta demanda da população mundial, associado à necessidade de se produzir cada vez mais alimentos, faz com que o setor agroindustrial tenha que buscar formas de se adaptar à nova realidade de mercado, desenvolvendo, novas técnicas de manejo e confinamento, de animais, aumentando assim a densidade de animais por unidade de produção. Surge então, a necessidade de realizar um manejo correto desses resíduos agroindustriais, vistos até então como um problema de saneamento rural, causando inúmeros danos ao meio ambiente. A biomassa é vista na atualidade, como uma fonte de energia alternativa, na solução da atual crise energética mundial, minimizando assim a dependência de combustíveis fósseis, como o petróleo e seus derivados, reduzindo as emissões de GEE o principal causador do efeito estufa. O objetivo do artigo é demonstrar que a utilização da biomassa, associada ao uso de biodigestores e com ajuda da compostagem, podem gerar agroenergia trazendo inúmeros benefícios aos usuários. A presente pesquisa, surge em um cenário, onde foi realizada uma revisão bibliográfica com base em inúmeros trabalhos já publicados em plataformas de busca científica, literaturas e relatórios que desenvolvidos sobre o tema, como também a utilização de instrumentos como tabelas e gráficos irão auxiliar na melhor compreensão sobre o tema. Tanto a compostagem como os biodigestores são tecnologias, auxiliam na otimização do gerenciamento desses resíduos agroindústrias, mitigando os danos ambientais causados por determinadas atividades, trazendo inúmeros benefícios aos seus usuários, contribuindo para melhor Desenvolvimento Rural Sustentável.

Introdução

Segundo dados estimativos, pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) a população mundial em 2050 é estimada por volta de 9 milhões, o que leva a pensar como produzir cada vez mais para atender a demanda. É necessário que haja um abastecimento estável, para que os preços permaneçam acessíveis, e seja garantida à segurança alimentar de todos. Pelo aspecto social que é um dos três pilares fundamentais do Desenvolvimento Rural Sustentável, é importante que determinada localidade, mantenha sua produção ativa, evitando assim que seus empregados, evitem movimentos migratórios. Conforme (CEPAL, FAO e IICA, 2019) alguns países da América Latina e Caribe a pobreza é notável em áreas rurais, chegando a cerca 1,8 vezes em comparação as áreas urbanas. Portanto, é necessário a intensificar à produção agrícola, com base em um modelo cada vez mais sustentável, tendo como consequência direta uma produção em massa de resíduos agroindustriais, o que causa, impactos ao meio ambiente, trazendo inúmeros problemas de saúde pública e animal. Destaca-se, portanto a importância e tema a ser discutido, devido as alterações climáticas vem ocorrendo aos longos anos, como fenômenos como El Niño e El Nina e demais alterações climáticas, causando enchentes e estragos em diversas partes do planeta, o alto percentual de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) em cerca de 23% devido à utilização inadequada do solo (IPCC, 2014). Existem algumas particularidades sobre os tratamentos dos resíduos, vejamos algumas delas. Em primeiro lugar, são muito heterogênicos, constituídos por resíduos sólidos, líquidos, camas de animais como é caso da cama de aviário, restos de alimentos, produtos fitossanitários, produtos zootécnicos e alguns casos restos de embalagens. Em segundo lugar, a separação na sua geração dos resíduos. Em terceiro lugar, não menos importante é a complexidade e perigosidade de determinados resíduos próximos a biomas, ecossistemas sensíveis com é caso de rios e nascentes conforme (Rico, 2016; Rodrigez, 2002). Os resíduos agroindústrias possuem uma classificação, conforme a sua natureza química em abiogênicos (Incluem resíduos de origem mineral ou substâncias fabricadas em laboratório), resíduos orgânicos ou biogênicos (São todos aqueles que tem origem em animais e vegetais). Os resíduos orgânicos possuem suas particularidades, possuem elevados níveis de fosforo e nitrogênio e devido à presença de agentes patogênicos tanto para o homem como para os animais. Já por outro lado temos os resíduos sólidos inorgânicos como é caso dos fitossanitários tem uma certa preocupação devido à sua alta periculosidade segundo (Blázquez, 2003; Sztern et al., 1999; Tullio, 2007). O setor agroindustrial é responsável por cerca de 58% de todos os resíduos produzidos, sendo que boa parte desses resíduos podem ser reutilizados. Conclui-se então, que o sistema de produção agroindustrial é linear atual é ineficiente, trazendo como consequência a geração de um volume significativo de resíduos, sendo necessário a substituição, para um modelo circular utilizando, os dos processos de biodigestão e da compostagem. Para (Cervantes, 2021) tais processos, nos permitem, reduzir os impactos ambientais causados durante todo o ciclo produtivo e obtendo maior eficiência e de queda vem como uma solução viável ao relacionar-se com a crise energética, trazendo aos produtores a busca por novas fontes energéticas diminuindo a dependência dos combustíveis fósseis em seu ciclo produtivo. A compostagem é processo de misturas de material orgânico em estado avançado de decomposição, sob a ação das bactérias anaeróbicas, trazendo inúmeros benefícios



nutrientes ao ser incorporados ao solo (FAO, 2013). Segundo (Grand e Michel, 2020; Pascale e Gebler 2014), a opção pela utilização de fertilizantes de origem orgânicas, tem fator econômico, pois diminuem drasticamente a utilização de fertilizantes minerais. Além dos benefícios já mencionados ao solo a compostagem reduz drasticamente a presença de vetores como ratos e baratas e insetos. Já os biodigestores são equipamentos totalmente fechados, onde todo material orgânico é depositado e diluído com água, e pela a fermentação anaeróbica e ação dos microrganismos produz-se um gás com características semelhantes ao Gás Natural Veicular (GNV) um gás derivado do petróleo. Além do gás produzido durante o processo há a geração de um digestato, um coproduto desta biodigestão chamado de biofertilizante ou biol, muito empregado para fertirrigação de áreas com deficiência em micro e macro nutrientes (León et al., 2019). Por apresentar características semelhantes ao GNV, o biogás pode ser utilizado como energia térmica, podendo ser convertida para energia elétrica, como também através de processo de um processo de purificação onde será extraído a água, H₂S (Sulfeto de Hidrogênio) e CO₂ (Dióxido de Carbono), sendo assim considerado uma fonte renovável de energia que substitui efetivamente, o GNV. Partindo, desta premissa, a hipótese, surge que através da utilização de biodigestores na produção do biogás, da utilização da compostagem a partir da biomassa, produzida nessas atividades, contribui de uma forma sustentável, na busca do Desenvolvimento Rural Sustentável. O objetivo deste trabalho, e demonstrar os benefícios que a compostagem como também os biodigestores, podem gerar, ao pensarmos no surgimento de uma nova matriz energética sustentável os seus benefícios aos seus usuários, a agricultura e ao meio ambiente.

Material e Métodos

Para a realização deste estudo, foi utilizada uma metodologia qualitativa, com bases em revisões literárias sistêmicas e crítica sobre o tema em fontes primárias e secundárias, pesquisas bibliográficas em bases de dados como: Google Scholar, Dialnet, Plataforma Sucupira, Plataforma Capes, Plataforma Mendelley, como também documentos e relatórios organizações nacionais e internacionais que discorrem sobre o tema. A pesquisa procurou estruturar o artigo em partes, a primeira parte onde destaca-se os impactos negativos gerados pelo mal gerenciamento de resíduos, a segunda parte busca elencar, características sobre a compostagem e os biodigestores, e por fim é realizada uma análise de dados, gráficos, imagens e tabelas e através de ferramentas administrativa, como a análise SWOT na obtenção de uma visão mais crítica e mais ampla do assunto que nos permite chegar em algumas conclusões sobre o assunto.

Resultados e Discussão

Impactos ambientais causados pelos resíduos agroindústrias no meio ambiente

Com os dados obtidos de referência no Outlook elaborado OCDE (Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico) e pela FAO (Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura) as perspectivas do setor agroindustrial, durante o período de 2021–2030, há uma previsão de que na próxima década haja uma busca em relação sobre os produtos agroindustriais, entorno de 1,2% ao ano. Por outro lado, o aumento das áreas agrícolas ficaria em torno de 6,0% por meio de recolações em áreas de diferentes culturas, onde será necessário a intensificação e aumento significativo da eficiência será fundamental. Essa complexidade e pouco maior e preocupante uma vez que segundo a FAO mais de um terço das áreas agrícolas produtivas, estarão em processo de degradação. Todas essas implicações são devidas ao exposto e alta extração desenfreada dos recursos naturais e do meio ambiente. Segundo a CEPAL (Comissão Econômica para América Latina e Caribe), FAO e IICA (Instituto Interamericano Cooperação para Agricultura), 2019. Contudo é necessário realizar um gerenciamento adequado dos resíduos para evitar-se muitos dos problemas ambientais que serão discutidos logo a seguir.

Poluição Ambiental

A água é nosso principal insumo na produção agrícola, sendo fundamental para toda a existência humana, sendo necessário para a sua conservação e preservação de rios, lagos, córregos, nascentes como também os lençóis freáticos, contribuindo fundamentalmente para realização das atividades econômicas a serem desenvolvidas. De acordo com o relatório da PNUMA (Organização das Nações Unidas para Meio Ambiente) os ecossistemas de água doce são mais prejudicados, com atividades agroindustriais, associado ao crescimento populacional e ao desenvolvimento socioeconômico. Tais fatores associados, com as descargas constantes de águas residuais e demais fontes poluidoras agrícolas. Outro fato a considerar é o despejo indevido de dejetos de matéria orgânica produzida em algumas criações de animais. Por decorrência dos altos níveis de matéria orgânica, há uma sobrecarga nas águas, devido ao aumento de nutrientes, ocasionando um fenômeno chamado de eutrofização. Neste caso em particular, a poluição está no estado oligotrófico (com baixa produtividade), para estado eutrófico (com alta produtividade), favorecido principalmente pela presença de P (Fosforo) e N (nitrogênio) que estão disponíveis pela ação da temperatura do ambiente. Já para (Garcia e Rosales, 2018) todo esse resultado, gera aumento exagerado de algas, causando o esgotamento do oxigênio. Ocasionalmente a mortalidade de peixes, conseqüentemente uma degradação de toda vida aquática. Quando falamos de contaminação de águas subterrâneas, tais compostos orgânicos, chegam através de filtração pelo solo, observando a sua capacidade de sua absorção, e na sua formação e composição dos compostos solúveis ou insolúveis. O nitrogênio amoniacal ou amônia por ser altamente solúvel, onde é incorporado à água de precipitação ou águas utilizadas em irrigação, acompanhando toda sua jornada pelo solo até atingir os lençóis subterrâneo. Já para (Blázquez, 2003; Rodriguez, 2002) essa poluição, causa certa preocupação tendo em vista alto grau de toxicidade do Nitrato para os seres humanos, causando doenças tais como meta-hemoglobina.



Poluição do Ar

Quando nos referimos aos resíduos que são aglomerados devido à alta umidade, especialmente em altas temperaturas, geram inúmeros problemas, um deles é emissão de odores proveniente do processo de decomposição, afetando a qualidade de vida de todos aqueles que habitam nessas áreas ou localidades que são afetadas. Outro aspecto que merece destaque, está relacionado as mudanças climáticas. De acordo com o relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). A agricultura é elencada como o principal causador das mudanças climáticas, assim como todos seus efeitos que são gerados, o uso indevido da terra, como exemplo o desmatamento, que ocupa posição de destaque como sendo o principal causador das emissões de GEE (Gases de Efeito Estufa) representando cerca de 23% de toda emissão de GEE, podendo alcançar até os incríveis 37% ao levar em consideração a cadeia agroalimentar total, durante o efeito de pré e pós colheita segundo dados (IPCC, 2020). No caso de resíduos em particular, de acordo com mesmo relatório, as emissões de GEE representam cerca 4% de todas essas emissões CO₂ (Dióxido de Carbono) e em menor quantidade N₂O (Óxido Nitroso). Segundo o Ministério da Habitação e Ordenamento Territorial do Meio Ambiente do Uruguai (MHOTMA), essas emissões estão relacionadas ao processo de decomposição, como também àquelas relacionadas a incineração controlada a céu aberto. Apesar das mudanças climáticas não serem abordadas com uma certa profundidade, o tema deve ser tratado com mais importância devido a agricultura estar intimamente ligada as condições climáticas.

Contaminação do Solo

A saúde dos solos é fundamental para bem-estar do planeta, como sumidouros de carbonos ou também conhecidos como depósitos naturais de CO₂ reduzindo sua presença no ar, tendo em vista que mais de 95% dos alimentos produzidos são oriundos do solo, a contaminação de toda essa importância já elencada temos a contaminação do solo. Com base nos dados da FAO (2016) traz um dado alarmante, cerca de 1/3 do solo do mundo está degradado ou seja por erosão, salinização, compactação, acidificação e contaminação química. Os solos são fontes da maior biodiversidade, porem depende muito das condições adequadas. Para ONU Meio Ambiente (2016) devido à presença e mal gerenciamento de resíduos urbanos, industriais, mineração, e práticas consideradas insustentáveis são vistas como principal causador da poluição e contaminação dos solos. Para (FAO, 2015; Rodriguez, 2002) o uso contínuo do solo leva a extração dos nutrientes do solo, sendo necessário que haja uma reposição evitando assim a degradação desta área. Para repor micro e macro nutrientes, como exemplo N (Nitrogênio), P (Fosforo) se feita de forma desorganizada, danifica o solo e seus lençóis subterrâneos. Segundo (Pacheco, 2014; Perez, 2021; Quijano, 2016) ocorre, portanto, que o uso excessivo de fertilizantes minerais ou naturais, neste caso podem conter resquícios de antibióticos e remédios que podem afetar a biodiversidade dos solos.

Problemas de Saúde Pública e Animal

O mal gerenciamento de resíduos provoca o aumento de fontes de pragas, vetores e insetos, espalhando-se em plantações e na própria população por estar mais próximas, acabam gerando graves problemas de saúde pública. Tendo como uma solução mais viável neste caso, seria a incineração descontrolada, acarretando mais malefícios do que benefícios, gerando uma grande fonte de contaminação e incômodos aos vizinhos, vale ressaltar que nestes resíduos, pode-se conter restos de medicamentos ou até mesmo resíduos fitossanitários, que podem durante a sua incineração emitir gases tóxicos na atmosfera. Para (Del Puerto, Suarez e Palácio, 2009) esse quadro é infelizmente muito comum e causa preocupação, pois alguns desses resíduos de fitossanitários, podem acabar contaminando alguns animais. Além disso cabe ressaltar, que resíduos produzidos em criação de animais, geram uma enorme fonte de contaminação, como por exemplo, a pecuária onde carregam uma enorme quantidade de bactérias, vírus e fungos. Temos como exemplo a Clostridium presente no esterco do gado leiteiro. Outra fonte patológica preocupante é a contaminação por salmonelas, onde essa os animais encontram-se no centro da epidemiologia, representando assim, um ambiente de difícil controle. Segundo (Pellicer et. al, 2016) há estudos que comprovam a persistência das bactérias salmonelas por até 06 meses. Durante o decorrer do trabalho, será verificado que o mal gerenciamento dos resíduos, é considerado inadequado e ainda não é desejável pela Organização Mundial de Saúde (OMS) e pela Organização Mundial de Saúde Animal (OIE) de "One Health" conforme descrito na figura 1 abaixo, fortalecem os estudos realizados mundialmente, para que seja alcançado o ideal em saúde para as pessoas, animais e meio ambiente, o que também acaba nos interligando com conceito de sustentabilidade (OIE, 2021).



Figura 1: Infograma da One Health.
 Fonte: Instituto de Saúde Global de Barcelona. 2021



Temos, portanto, alguns projetos circulares que nos permitem o correto gerenciamento de resíduos agroindustriais em propriedades rurais. Contudo com crise ambiental e frequentes alterações, climáticas tais como El niño e a El niña fazem refletir, sobre o modelo atual econômico, tendo em vista a necessidade de ter uma visão linear, com base na necessidade de utilização de novos modelos circulares que permitam, a recirculação de matéria e de energia, sendo necessário o envolvimento de todos os setores econômicos e produtivos. A economia circular é uma alternativa, dentro do sistema linear de produção e consumo permitindo, o que permite responder, certos questionamentos e desafios que surgem ao longo do tempo, sobre atual modelo de crescimento econômico e produtivo, promovendo assim, um fluxo cíclico na extração, transformação, distribuição no uso e na recuperação de materiais e energia de produtos que estejam à disposição no mercado. Portanto a mudança de comportamento, nos leva a redução e mitigação dos impactos ambientais negativos como também sobre o aspecto da área econômica linear, mas também pode representar um modelo de mudança mais amplo e sistêmico, com base na construção de resiliência ao longo do prazo. Segundo (Arroyo, 2018; Burgo et al., 2019) tal oportunidade nos traz para diversos campos, comerciais, econômico, trazendo benefícios social e melhorias no campo do meio ambiente. Já para (Cervantes, 2021) o setor agroindustrial opera em um sistema de produção linear, gerando uma quantidade significativa de resíduos, causando grande impacto ao meio ambiente, sendo necessário para mudança circular no qual a partir desse permitirá, fechar os ciclos dos materiais, reduzindo os impactos ambientais e com isso obtendo melhor eficiência no sistema. Através de todas essas diretrizes, temos que a reciclagem, a recuperação de nutrientes e a energia produzida desses resíduos devem ser incentivadas. Segundo (FAO, 2018; Lett, 2014) para impulsionar o reaproveitamento de resíduos, é necessário dar mais ênfase em práticas cada vez mais sustentáveis, na busca da internalização de externalidades negativas como por podemos citar a taxaço do carbono, a criação e implementação de legislações mais efetivas, a remoção de subsídios dos insumos atuais existentes como por exemplo os dos combustíveis fósseis e dos fertilizantes, buscando assim incentivar as empresas, a se adaptarem ao novo modelo sustentável, apresentando a elas novas técnicas e tecnologias. Agora será desenvolvido, casos específicos de compostagem e a utilização de biodigestores na permitem verificar o aproveitamento e eficiência empregada nesses dois sistemas.

Compostagem

A compostagem é vista hoje como uma solução para mitigação dos problemas ambientais e sociais causados em áreas urbanas e rurais, aquilo que até então, parecia um problema torna-se solução viável e sustentável, principalmente na área rural onde esse resíduo é reaproveitado e surge então uma fonte nutritiva para solo e áreas degradadas o que permite uma melhoria significativa tanto no campo econômico, pois o fertilizante orgânico substitui facilmente o uso de fertilizantes minerais. Para a FAO (2013), a compostagem tem como definição sendo uma mistura de matéria orgânica em decomposição, sob ação de bactérias anaeróbicas, resultam em um composto altamente nutritivo, usado, para melhorar a estrutura do solo, fornecendo nutrientes necessários para desenvolvimento de culturas. Através de um processo biológico, e com a simples intervenção de diferentes microrganismos, busca-se sempre as condições ideais de aeração, temperatura, umidade, pH e relação carbono: nitrogênio. Durante o processo de compostagem há redução de maus odores, que resultam da decomposição, como também permite eliminar vetores, insetos e ratos (Pascale e Gebler, 2014). Para (Grand e Michel, 2020) o resultado final tem como um produto com características excepcionais as quais elencaremos a seguir: Em primeiro lugar, por tratar-se de um material altamente higiênico e livre de bactérias patogênicas e parasitas, livre de sementes e de ervas daninhas que podem tornar-se a ser concorrentes em algumas culturas. Em segundo lugar, por possuir altos níveis nutricionais disponíveis e com liberação lenta, altos níveis de matéria orgânica, onde oferecem inúmeros benefícios, relacionados aos aspectos físicos do solo (como por exemplo o aumento da capacidade de retenção de umidade do solo, redução de risco de erosão, reduz a evaporação da água do solo), propriedades químicas (como o fornecimento de micro e macro nutrientes) e no campo biológico (melhora das condições do solo, fornecendo carbono necessário para manter a biodiversidade; fornecimento de microrganismos necessários, como bactérias e fungos, capazes de transformar materiais até então insolúveis presentes no solo em nutrientes úteis para as plantas como também agir como degradante de substâncias nocivas). Segundo a (FAO, 2013) em relação ao aspecto econômico, revela-se um balanço econômico positivo quando observa-se em experiências realizadas anteriormente. Ao relacionarmos aos custos da produção de compostagem, deve-se ter mente, que esses podem variar conforme, a escala do empreendimento, e a técnica realizada. Vale ressaltar alguns pontos devem ser considerados, como por exemplo as despesas relacionadas à coleta de resíduos, o transporte dos resíduos até destinatário, no caso quando houver comercialização, os custos com embalagens para terceiros, certificações quando há uma intenção de agregar valor à mais ao produto, elementos necessários para controle e eficiência técnica como é caso de termômetro, tiras de pH entre outros. Além do mais os custos fixos da produção, tais como a mão de obra, custos na aquisição de material, dependendo da técnica utilizada, a quantidade e o volume a ser trabalhado, podem variar desde do simples uso de um carrinho de mão, como também ao uso de pás carregadeiras ou até retroescavadeiras para criação de leiras e movimentação desses resíduos, quando estamos trabalhando com uma grande quantidade e na escala comercial. Já com relação ao campo econômico essa renda está relacionada, ao custo do composto no mercado e ao preço dos fertilizantes minerais. Através da compostagem, agricultores tem como mais uma alternativa, de melhoria no campo econômico, como é de conhecimento de todos, os maiores custos hoje em uma lavoura ou até em horticulturas é a fertilização e adubação e compra de sementes, tendo em vista que a maior parte desses insumos, utilizados são importados e sofrem variações, conforme a flutuação do cambial, encarecendo, portanto, a atividade agrícola. Logo abaixo será demonstrado um gráfico, onde observa-se a forte tendência a necessidade por fertilizantes minerais.

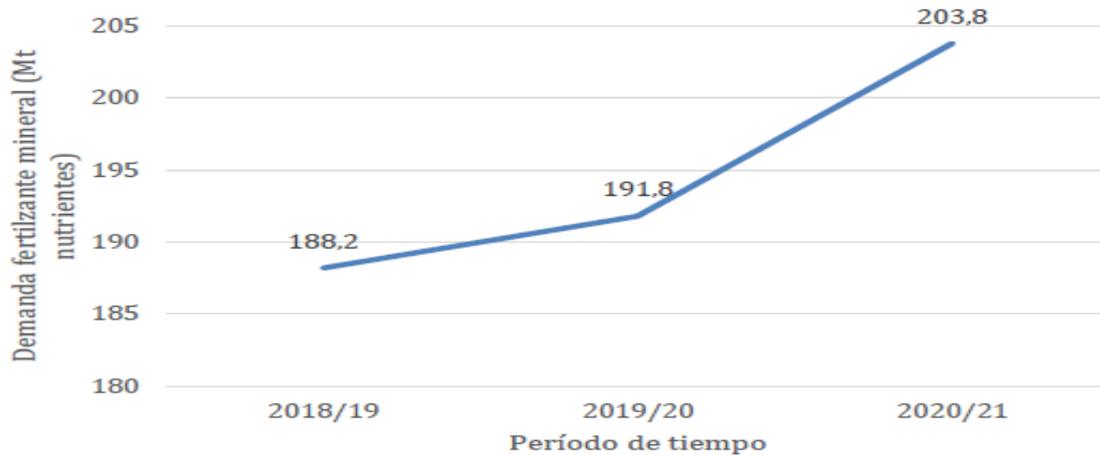


Figura 2. Evolução da demanda global por fertilizantes minerais.

Fonte: Elaborado pelos autores, com base em Dados da Associação Internacional das Industriais de Fertilizantes (IFA, 2021)

Com em relação ao preço dos fertilizantes minerais eles tem aumentado constantemente, desde do ano de 2008. Com base nos indicadores econômicos, variações cambiais, Covid-19 e conflitos internacionais como da Rússia com a Ucrânia, onde ambos são principais exportadores de fertilizantes, nos faz realizar um comparativo entre o preço dos grãos e dos insumos, no qual vemos que essa relação vem se tornando cada vez mais desfavorável, devido à alta dos insumos terem subido mais do que o preço dos grãos o que diminui a margem de lucratividade do produtor, ao compararmos Custo x Rentabilidade, torna-se inviável economicamente a produção agrícola de grãos. Observem que a produção de grãos, há um indicador de fraqueza no campo da sustentabilidade da atividade (veja a Figura 3). Como uma consequência direta daquilo que foi elencado no quadro, podendo haver uma possível repercussão nas áreas de semeadura para a safra 2022/2023.

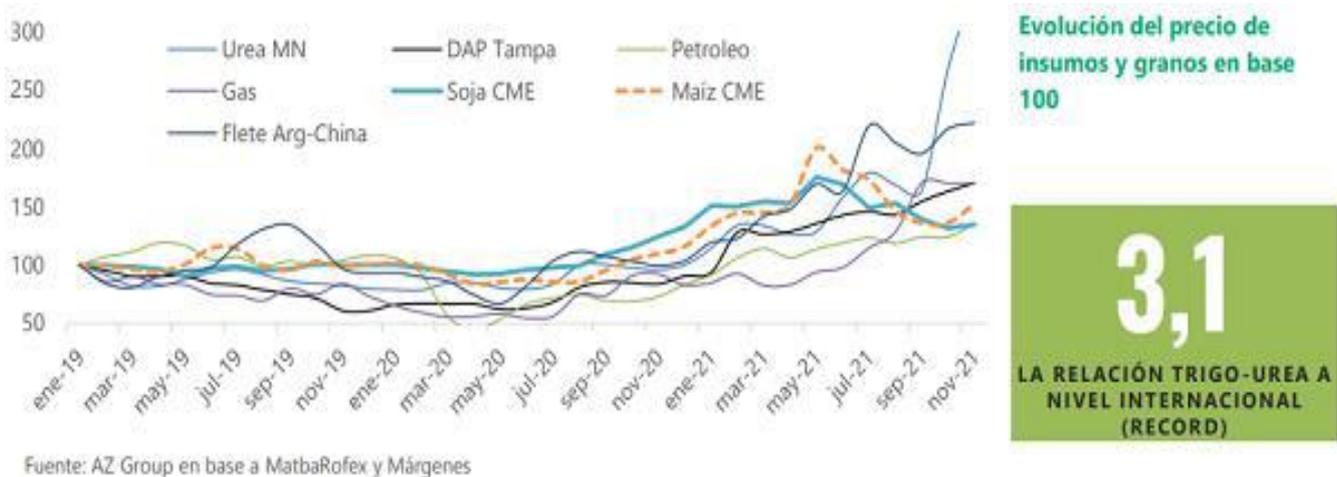


Figura 3: Evolução dos preços de insumos e grãos.

Fonte: Grupo AZ. 2021

Ao observarmos, há inúmeros problemas relacionados a cadeia de suprimentos, o que aumenta cada vez mais as incertezas sobre o futuro. Com base na relação às projeções sobre a demanda de fertilizantes, de acordo com o relatório da Associação Internacional das Indústrias de Fertilizante IFA (2021), pode-se afirmar que, embora se há uma estimativa de queda no período de safra 2021/22, há uma perspectiva de melhora na safra de 2022/23. Onde obtém-se o resultado, de uma previsão positiva na demanda global de fertilizantes com crescimento de 3%. Essa alta repercute uma queda na safra passada de 2021/22, onde houve uma queda de 3%. Outro fato que devesse considerar é a oportunidade de crescimento da compostagem, ao considerar como uma grande oportunidade de crescimento da compostagem nas produções da agricultura orgânica têm aumentado em área, conforme vemos no gráfico da Figura 4.

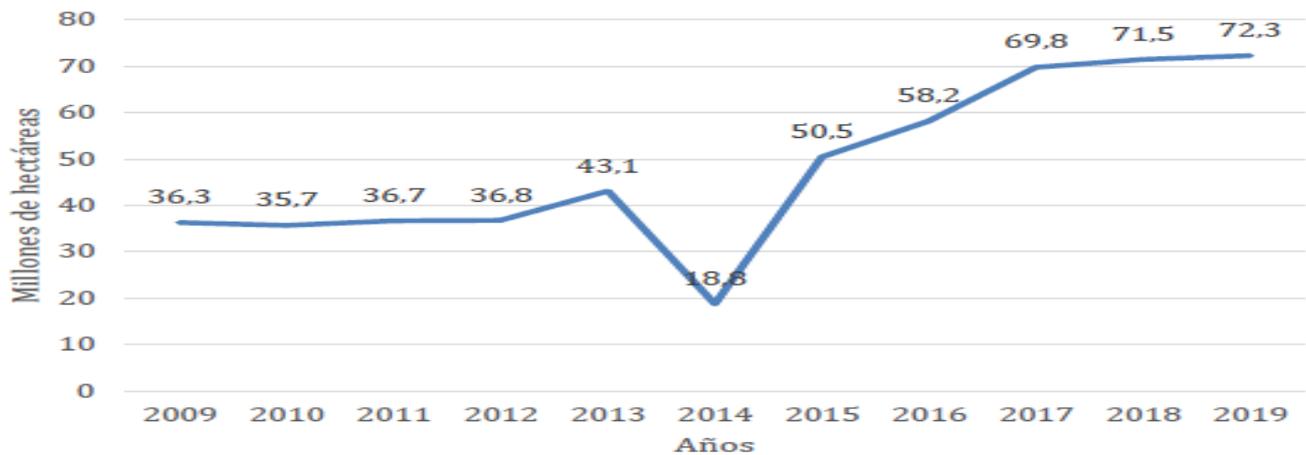


Figura 4: Evolução da área cultivada com agricultura orgânica.
Fonte: Elaboração própria com base em Orús (2021)

Para (Orús, 2021) no final do ano de 2019, cerca de 72,3 milhões de hectares estavam sob produção orgânica, aproximando-se do nível de 2020/21. Sendo a maioria dos hectares, é dedicado a esse tipo de agricultura. Nessas produções usam exclusivamente fertilizantes oriundos da compostagem. Para dar mais clareza e mostrar com mais precisão nas informações até então, em relação a processo de compostagem foi feita uma análise SWOT é uma sigla em inglês para Forças (Strengths), Fraquezas (Weaknesses), Oportunidades (Opportunities) e Ameaças (Threats) esta é uma ferramenta de gestão administrativa na qual permite, realizar os estudos de forças, oportunidades, pontos fracos e ameaças.

Tabela 1 - Análise SWOT da Compostagem

<p style="text-align: center;">Pontos Fortes</p> <ul style="list-style-type: none"> • Conversão de um produto residual em insumo de alta demanda • Reciclagem • Produto final com características excepcionais como corretivo e pelo seu poder fertilizante • Eliminação de bactérias patogênicas, livre de sementes e ervas daninhas • Evita o problema de mal odores, proliferação de insetos e vetores • Diminuição da utilização de fertilizantes minerais 	<p style="text-align: center;">Oportunidades</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aumento na sua demanda em face do aumento projetado da produção orgânica • Aumento da divulgação da técnica e da importância da mesma • Aumento da conscientização por parte dos agricultores sobre os dos graves problemas ambientais globais • Aumento dos problemas de preço e estoque de fertilizantes minerais • Prováveis incentivos para sua produção, como redução de impostos
<p style="text-align: center;">Pontos Fracos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Frequentemente devido a qualidade inadequada, pois o processo não é feito corretamente. • Emissão de CO₂ durante o processo • Tempo extra além das atividades diárias, dos agricultores para realizar o seu controle • Limitações devido ao seu volume, o composto não pode ser transportado por longas distâncias, não é viável economicamente 	<p style="text-align: center;">Ameaças</p> <ul style="list-style-type: none"> • A utilização de outras tecnologias e ferramentas, neste caso os biodigestores.

Fonte: Criação do próprio autor

Biodigestores

Segundo (CLASSEN; et al, 1999) o biogás teve seu início em pântanos, por isso teve a denominação de “gás dos pântanos”. Durante ano de 1667, depois de um século. Alessandro Volta, reconhece que nas regiões pantanosas a presença de metano no. Já (NOGUEIRA, 1986), durante o século XIX e Ulysses Graynon, um aluno brilhante de Louis Pasteur, conseguiu replicar cerca de 100 litros de gás por m³, graças a atuação das bactérias anaeróbia, associadas com uma mistura de estrume e água, em uma temperatura de aproximadamente de 35°C. Pasteur também apresentou os resultados dos seus estudos os seus alunos na Academia



de Ciências em 1884, onde, portanto, foi verificado que o gás produzido, pode ser utilizado como uma fonte de aquecimento e iluminação. Os biodigestores, eles permitem que os agricultores, possam obter um duplo benefício, pois permitem que os agricultores possam obter um duplo benefício, gerando assim duas frações. De um lado, a produção de biogás, sendo uma fonte alternativa de energia renovável, sendo um substituto do GLP que é derivado do petróleo, podendo ser utilizado como combustível para cozinhar, aquecer ou iluminar, diminuindo a dependência energética nas áreas rurais por fontes de combustíveis derivados do petróleo. Além do fim da dependência energética nas áreas rurais, há um subproduto produzido durante processo, chamado biol. ou biofertilizante, muito utilizado para fertirrigação de lavouras e áreas degradadas. Desta forma, os biodigestores permitem resolver problemas sobre o gerenciamento de resíduos das agroindústrias, como também os problemas de saneamento rural. Os biodigestores podem ser definidos como recipientes fechados e herméticos, onde são depositados todo material orgânico no qual passara pelo processo de fermentação excremento animal, esterco animal, resíduos animais etc. Os biodigestores são classificados e caracterizados de acordo com seu regime de alimentação, podendo ser contínuo ou de batelada, desta forma com que é feita a alimentação, ou seja, ascendente ou laminar, como também a concentração de resíduos sólidos dentro do reator (digestão sólida >20%, semissólida 10 a 15% e úmida <10%) e por fim o sistema de agitação (mistura completa, parcial ou sem mistura). Atualmente existem tres modelos mais usados no mundo o Chinês, Indiano e Canadense. Vejamos agora pouco mais dos modelos elencados.

Biodigestores de Lagoa Coberta (BLC)

Este modelo também e chamado popularmente de modelo canadense, onde é formado por um tanque escavado no solo com manta impermeabilizante, com material geossintético (PVC, PEAD entre outros), tem como característica principal a baixa permeabilidade de fluídos e gases, sendo bastante flexível, o que facilita o acúmulo de gás. Também recebe é conhecido, como biodigestor de lona. Por apresentar um baixo custo tecnológico e de fácil operação é bastante empregado nas propriedades rurais brasileiras, no gerenciamento de seus resíduos. Neste modelo não há um sistema de aquecimento nem tão pouco um de agitação. Alguns modelos podem apresentar uma forma tubular, onde apresenta suas dimensões construtivas e um regime de alimentação semi-contínua, geram configurações de fluxo que variam entre laminar e pistolado. Outro aspecto importante é necessidade do tempo de retenção hidráulica o (TRH), aumentando assim o requisito de área.

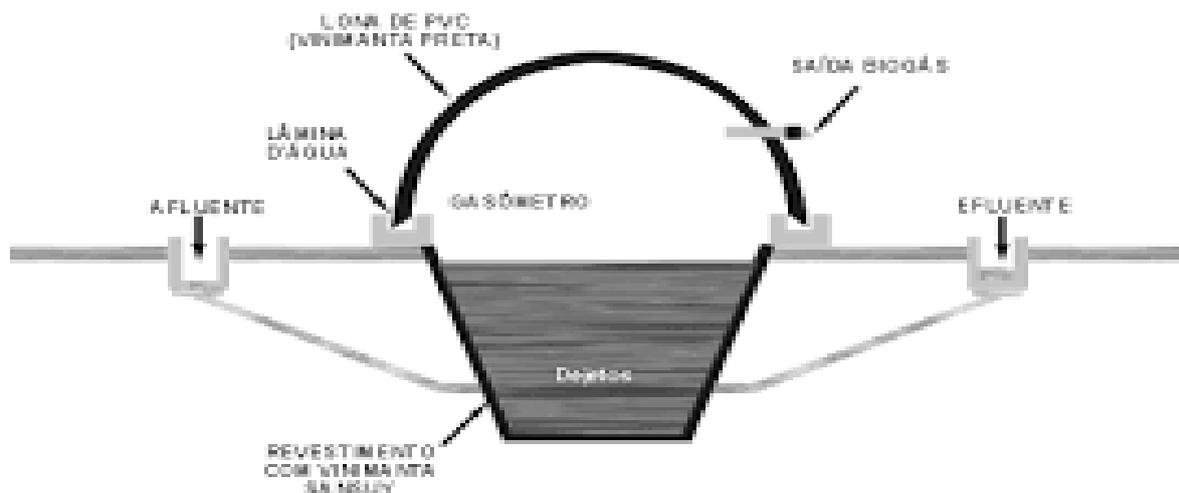


Figura 4 - Modelo de Biodigestor BLC ou “Canadense”.

Fonte: USP Piracicaba (2013, p.05)

Biodigestores Tipo CSTR

Tem como denominação do inglês *Continuous Stirred Tank Reactor*, traduzindo (Reator com tanque agitado continuamente). Conhecido como modelo chinês, este modelo uma carga volumétrica maior (1 a 4 kgsg . m⁻³ . d⁻¹), apresenta um conteúdo mais homogêneo devido ao sistema de agitação. Por ser um modelo mais usado de biodigestores em plantas de biogás, quando se trata codigestão (mistura de substratos) e com concentrações de sólidos mais elevadas (próximos a 10% m.v-1). São mais usados na Europa, representam cerca de 90% de todos os biodigestores instalados. Nestes modelos o tempo de retenção hidráulica (TR,H) e o tempo de retenção de sólidos (TRS) são iguais, partido de premissa que não há acúmulo de lodo. O tempo de TRH normalmente e de 15 a 20 dias, podendo variar, conforme o tipo de substrato a ser digerido. Os biodigestores do tipo CSTR sem recirculação de lodo são mais adequados para altas concentrações de sólidos.

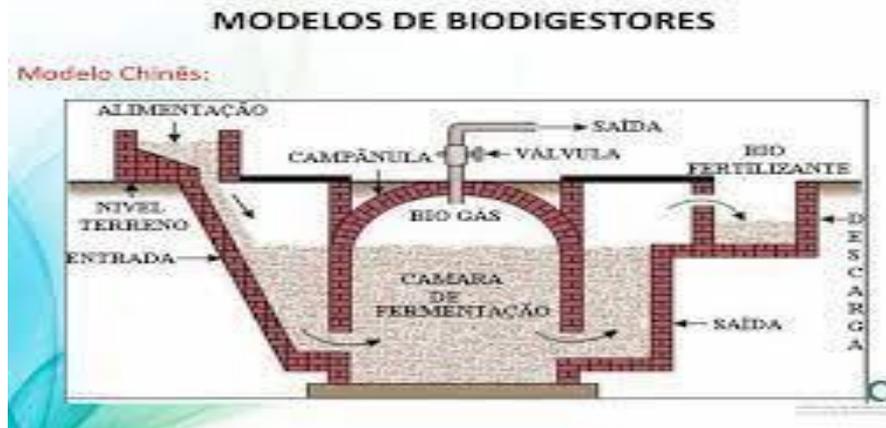


Figura 5 - Biodigestor tipo CSTR.
Fonte: Deganutti, et al., 2002

Biodigestor Tipo UASB

A sigla tem origem no inglês Upflow Anaerobic Sludge Blanket. Também chamado de indiano, tem como principal característica, o fluxo ascendente do afluente, por manta de lodo que percorre até o reator, onde há separador trifásico. Tem como particularidade a retenção de biomassa, que permite que trabalhe em baixo tempo de retenção hidráulica em torno de 4 a 72 horas. Apresentam também estabilidade em situações variáveis, do afluente suportando portanto, altas cargas volumétricas (0,5 a 8,0 Kgsv . m-3 .d-1 ou 2 a 32kgDQOsolúvel . m-3 . d-1

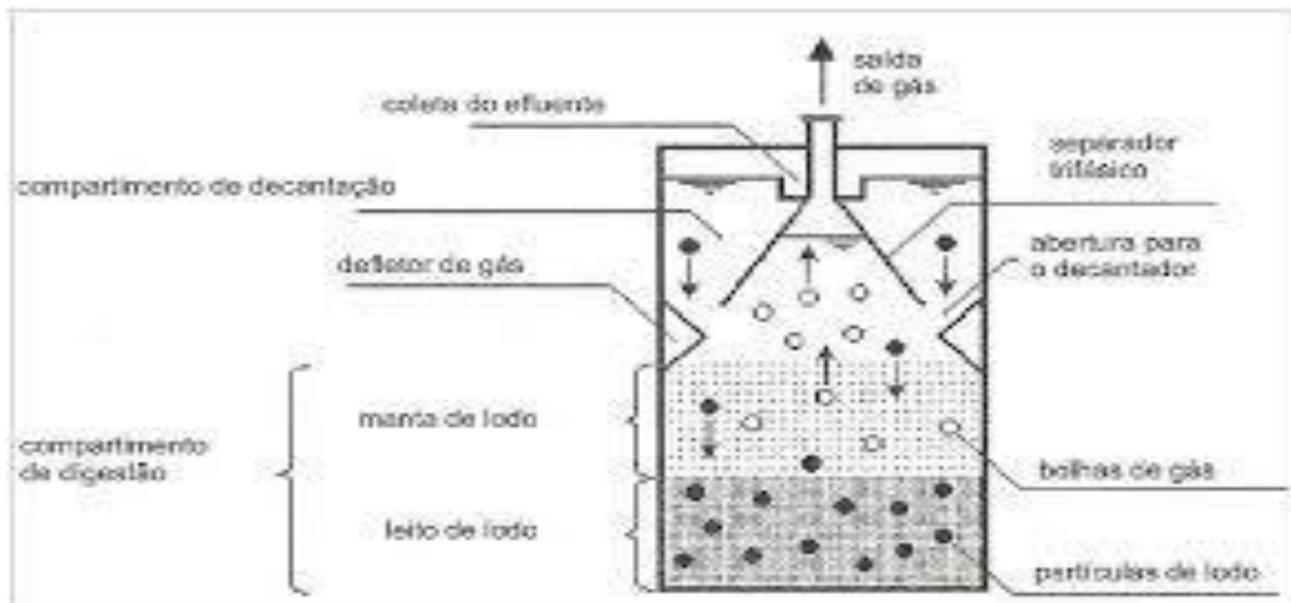


Figura 6 - Biodigestor tipo UASB.
Fonte: Chernicharo, 2007

Para que haja uma eficiência na digestão anaeróbica, dependeremos de certos parâmetros, nos quais iremos elencar logo a seguir:

- a) Devido a composição química dos resíduos, as substâncias que são facilmente degradáveis, como é caso das proteínas, lipídios, carboidratos e outras substâncias facilmente degradáveis, geram uma maior produção de metano ao compararmos com outras substâncias de difícil degradação.
- b) a produção de metano é menor em substâncias difíceis de degradar, como a celulose;
- c) quando se trabalha com biodigestão anaeróbica, ou seja, com temperaturas próximas a 35°C, a essa digestão anaeróbica é mais rápida, porém ao trabalharmos com temperaturas abaixo de 20°C está requer um tempo mais longo para degradação da matéria orgânica;
- d) Segundo (Pascale e Gebler, 2014) o pH ideal para que haja produção de microrganismos para que haja uma produção eficiente de metano está entre a faixa de ação de 6,6 e 7,4.



Segundo (Marti, 2019) o biogás produzido é gerado e tem por características particulares o percentual de 50-70% de metano (CH₄), 40-20% de dióxido de carbono (CO₂) e traços de outros gases, incluindo sulfeto de hidrogênio (H₂S). Sulfeto de hidrogênio (H₂S) e percentual de H₂O (molécula da água) o que inviabiliza o biogás a princípio sem que haja uma purificação seja utilizado, como combustível para veículos.

O biogás, devido às suas características similares ao combustível neste caso o gás GLP, pode ser utilizado para na geração de energia térmica e elétrica. Na geração de energia térmica e/ou elétrica, é usualmente utilizado, para cozimento, para alimentação de sistemas de máquinas, no caso ordenhadeiras, no bombeamento de água em moinhos, cortadores de grama, entre outros usos térmicos ou a produção de eletricidade para consumo próprio. Por ser acessível e ser uma fonte de energia nova e barata, surge como mais uma alternativa de energia renovável de baixo custo. Como substitui o uso da lenha para cozimento e aquecimento, contribui para redução do desmatamento e melhoria da qualidade de vida dos pequenos e médios produtores. As fumaças geradas durante a queima de material lenhoso causavam inúmeros problemas respiratórios aos seus usuários e pessoas próximas. Durante todo o processo biodigestão anaeróbica, alguns nutrientes como (nitrogênio, fósforo, potássio e outros) que estão contidos nos resíduos orgânicos, entram em processo de mineralização ou sejam viram micro e macro nutrientes, que ficam disponíveis para a plantas, o que permitem serem reciclados durante o processo. Também melhora traz inúmeros benefícios tanto no aspecto físico, como químico ao solo. Ao relacionarmos a Biodigestão as emissões de GEE que provem desses resíduos e seus efeitos sobre as mudanças climáticas, esses gases como metano são capturados, no biodigestor, evitando irem para a atmosfera e por fim acabam indiretamente, substituindo as fontes convencionais de energia fóssil mitigando as emissões de metano, o desmatamento, como também resolvendo a questão de saneamento no campo. Vejamos agora pela análise SWOT os benefícios que essa tecnologia pode trazer:

Tabela 2 - Análise SWOT do Biodigestor

Pontos Fortes	Oportunidades
<ul style="list-style-type: none"> • Obtenção de uma fonte de energia barata e renovável fonte de energia renovável e barata • Obtenção um excelente fertilizante tornando possível, a redução de fertilizantes minerais • Eliminação de fontes de vetores e doenças • Redução direta e indireta de lenha reduzindo o desmatamento • Diminuição da emissão de GEE • Baixo custo e manutenção. Podendo ser aplicado em todas as escalas (pequena e média escala e também em nível industrial). 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento da demanda do biofertilizante, diminuindo os custos na lavoura, à incerteza de estoque de fertilizantes minerais. • Aumento produções de hortas orgânicas que usam esse tipo de fertilizante • A possibilidade de alcançar a soberania energética nas áreas rurais • Possíveis incentivos fiscais para produções mais “ambientalmente produções mais “amigáveis” ao meio ambiente
Pontos Fracos	Ameaças
<ul style="list-style-type: none"> • Podem gerar odores • As bactérias anaeróbicas são suscetíveis à inibição de um numero suscetível de inibidores • O digestato não está 100% livre de bactérias patogênicas, sendo necessário análises antes de usa-las 	<ul style="list-style-type: none"> • Surgimento de novas tecnologias

Fonte: Criação do próprio autor

Considerações Finais

Considerando que para ambos, os dois tipos de projetos elencados, é necessária uma maior divulgação, sendo essencial para a conscientização de todos os públicos envolvidos durante os processos sejam eles produtores, usuários da tecnologia, extensionistas, ONGs, cooperativas, bancos, financiadores, investidores, universidades e centros de pesquisa. Devido à alta demanda na produção de alimentos, há uma maior preocupação com meio ambiente, neste caso, o gerenciamento de resíduos sólidos, é fundamental a busca por caminhos mais sustentáveis, onde possamos ver a real mudança no campo ambiental, social e econômico.

Tanto a compostagem como uso de biodigestores, são ferramentas excelentes na solução de gerenciamento de resíduos sólidos, como também apresentam soluções viáveis e econômicas na questão de saneamento rural. Apresentando assim resultados esperados, na geração de energia limpa e renovável, como no cumprimento das 17 ODS que são elencadas pela ONU, colaborando assim para melhorias na qualidade de vida de seus usuários.

É necessário, ressaltar também a implementação de políticas públicas, que permitam uma maior concretização e participação de campos da sociedade, através de incentivos, educação e técnicas que busquem a melhoria continua dos processos.



Referências bibliográficas

- Aguilar, F.X e Botero, R. (2006). The total economic benefits of biogas production using a low-cost polyethylene biodigester (Os benefícios econômicos totais da produção de biogás usando um biodigestor de polietileno de baixo custo). *Produção de biogás usando um biodigestor de polietileno de baixo custo. Tierra Tropical*, 2 (1), 15-25. https://www.researchgate.net/publication/228431561_Los_Beneficios_EconomiaTotal_costs_of_Biogas_Production_Using_a_Low_Cost_Polyethylene_Biodigester.Total_de_Biogás_Produção_Usando_um_Biodigestor_de_Baixo_Custo
- Álvarez, M e Arrieche, P. (2016). Apresentação e diagnóstico de Clostridium Botulinum Clostridium Botulinum em bovinos alojados. [Tese de graduação. Universidad de la República do Uruguai. Faculdade de Medicina Veterinária]. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/10314>
- Arroyo, F. (2018). A economia circular como fator de desenvolvimento sustentável do setor produtivo. *Setor produtivo. INNOVA Research Journal*, 3 (12), 79-98. <https://doi.org/10.33890/innova.v3.n12.2018.786>.
- Associação Internacional de Fertilizantes. (2021). Resumo público das perspectivas de curto prazo para fertilizantes 2021 - 2022. <https://www.ifastat.org/market-outlooks>
- Blázquez, M. (2003). Resíduos agrícolas e animais. <http://www.juntadeandalucia.es>
- Burgo, O., Gaitán, V., Yanez, J., Zambrano, A., Castellanos, G. e Estrada J. (2019). A economia circular: uma alternativa sustentável para o desenvolvimento da agricultura. *Espacios*, 40 (13), 2. <https://www.revistaespacios.com/a19v40n13/a19v40n13p02.pdf>.
- Cervantes, G. (2021). Transição para a economia circular no setor agrícola: Fazendas experimentais em Guanajuato. *Kawsaypacha: Society and Environment*, (7), 45-66. *Ambiente*, (7), 45-66. <https://doi.org/10.18800/kawsaypacha.202101.003>.
- Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (2019). Avaliação e implementação de projetos-piloto em El Salvador. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/45026-evaluacion-implementacionproyectos-piloto-biodigestores-salvador>
- Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe, Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura e Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura e o Desenvolvimento Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura e Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura. para a Agricultura (2019). *Perspectivas para a agricultura e o desenvolvimento rural nas Américas: um olhar sobre a América Latina e o Caribe 2019-2020. As Américas: um olhar para a América Latina e o Caribe 2019-2020*. San José. Costa Rica. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/45111/1/CEPALFAO2019-2020_en.pdf.
- CLASSEN, P.A.M; LIER, J.B.; STAMRS, A.J.M. Utilization of biomass for supply of energy carrier. *Applied microbiology and biotechnology*, v.52, p.741-755, 1999.
- Del Puerto, A., Suárez, S. y Palacio, D. (2014). Efeitos dos pesticidas no meio ambiente e na saúde Cubana de Higiene e Epidemiologia; 52 (3), 372-387. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1561-30032014000300010&script=sci_abstract
- Fernícola, N. (1989). Metahemoglobinemia infantil causada por nitratos. <https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/17754/v106n1p32.pdf?sequence=1>
- García, F. e Rosales, V. (2018). Eutrofização, uma ameaça aos recursos hídricos. http://ru.iiec.unam.mx/4269/1/2-Vol2_Parte1_Eje3_Cap5-177-Garc%C3%ADa-Miranda.pdf.
- Grand, A. e Michel, V. (2020). Composto: vantagens e desvantagens. <https://www.best4soil.eu/assets/factsheets/es/7.pdf>
- Grupo AZ (2021). Ureia a mais de US\$ 1.000 a tonelada: fertilizantes atingem níveis historicamente altos. <https://news.agrofy.com.ar/noticia/196944/urea-mas-us-1000-toneladas-de-fertilizantes-atingem-niveis-historicamente-altos>.
- Instituto de Saúde Global de Barcelona (2021). One Health ou como alcançar a saúde ideal para pessoas, animais e nosso planeta ao mesmo tempo. Saúde ideal para as pessoas, os animais e nosso planeta ao mesmo tempo. <https://www.isglobal.org/healthisglobal/-/custom-blog-portlet/one-health-unasola-health-or-how-to-achieve-at-once-optimal-health-for-people-animals-y-nuestro-planeta/90586/0>
- IDEASS América Latina, Inovação para o Desenvolvimento e Cooperação Sul-Sul (2011). Biodigestores de baixo custo. Para produzir biogás e fertilizante natural a partir de resíduos orgânicos. Resíduos orgânicos. <https://ecotec.unam.mx/wp-content/uploads/Biodigestoresde-low-cost.pdf>



- Lett, L. (2014). Ameaças globais, reciclagem de resíduos e o conceito de economia circular. *Economia. Revista Argentina de Microbiologia*, 46 (1), 1 - 1. 2. <https://www.redalyc.org/pdf/2130/213030865001.pdf>
- León C., Rodríguez, C., Mendoza, G., Bardales, C., Sánchez, J. e Barrena M. (2019). Projeto e implementação de uma planta piloto para produção de biogás, *Biol y Biosol. Arnaldoa*, 26 (3), 1017-1032. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2413-32992019000300011
- Martí, J. (2019). Experiências latino-americanas na implementação de estratégias para democratizar biodigestores entre pequenos e médios produtores agrícolas. *Democratização de biodigestores entre pequenos e médios produtores agrícolas. Produtores. Contribuições para o Equador.* https://www.researchgate.net/publication/334431607_Experiencias_Latinoame.Experiencias_da_América_Latina_na_democratização_dos_biodigestores_Contribuições_ao_Ecuador
- Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (2020). *Climate Change and Land (Mudança climática e terra). Resumo para formuladores de políticas.* Genebra, Suíça. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/02/SPM_Updated-Jan20.pdf
- Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (2014). *Mudanças Climáticas 2014: Relatório de Síntese.* Genebra, Suíça. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf.
- Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (2018a): *O solo é realmente tão importante? Importante? Futuro.* <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/feature/is-soil-so-important?>
- Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (2018b). *Progresso na qualidade da água teste piloto da metodologia de monitoramento da qualidade da água e primeiras conclusões sobre o indicador 6.3.2 dos ODS.*
- Sobre o indicador SDG 6.3.2. http://www.unwater.org/app/uploads/2018/10/SDG6_Indicator_Report_632-progress-on-environment-water-quality-2018_EN.pdf
- Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (2019). *Guia teórico e prático sobre biogás e biodigestores. Tecnologia e Série de Documentos Técnicos*, (12), 104 pp. http://www.probiomasa.gob.ar/_pdf/GuideBiogasyBiodigestores-19-08-29.pdf.
- Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (2018). *Livestock Solutions for Climate Change (Soluções Pecuárias para Mudanças Climáticas).* <https://www.fao.org/3/I8098ES/i8098es.pdf>.
- Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (2017). *The Future of Food and Agriculture: Trends and Challenges, 2050 (O futuro da alimentação e da agricultura: tendências e desafios, 2050).* <https://www.fao.org/3/i6881s/i6881s.pdf>.
- Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (2016). *Status Estado dos recursos do solo. Resumo técnico.* <https://www.fao.org/3/i5126s/i5126s.pdf>.
- Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (2015). *Tendências mundiais tendências mundiais de fertilizantes e perspectivas para 2018.* <https://www.fao.org/documents/card/es/c/db95327a-5936-4d01-b67d-7e55e532e8f5/>
- Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (2013). *Manual de Compostagem para Agricultores. Experiências na América Latina.* <https://www.fao.org/3/i3388s/I3388S.pdf>
- Organização Mundial de Saúde Animal (2021). *A OIE se mobiliza para alcançar a resiliência “One Health”.* resiliência “One Health”. <https://www.oie.int/es/la-oie-se-moviliza-paraalcanzar-one-health-resilience/#:~:text=La%20OIE%20mira%20a%20trav%C3%A9s,2%20tenga%20un%20animal%20origem>
- Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico e Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura. *Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (2021). Perspectivas agrícolas da OCDE-FAO 2021-2030. Resumo executivo.* <https://www.fao.org/3/cb5339en/cb5339en.pdf>
- Orús, A. (2021). *Evolução da área dedicada à agricultura orgânica no mundo. 2004-2019.* <https://es.statista.com/estadisticas/542371/evolucion-de-lasuperficie-destined-to-organic-agriculture-around-the-world/>
- Pacheco, L. (2014). *Resistência aos antibióticos: o efeito colateral.* *Horizonte Sanitário*, 11 (1), 24-31. <https://doi.org/10.19136/hs.a11n1.108>.



Pascale, JC e Gebler, L. (2014). Gestão ambiental agrícola. EMBRAPA, 2, 236-83. <https://www.embrapa.br/documents/1355242/0/Biog%C3%A1sFert+Tecnologias+para+o+tratamento+de+res%C3%ADuos+de+animais.pdf>.

Pellicer, K., Brusa, V., De la Torre, J., Ortega, E., Lasta, G., Cardozo, C., Real D. e Copes, J.A. (2016). Investigação de E. coli O157 e Salmonella spp. em bovinos de um confinamento na província de Buenos Aires.

na província de Buenos Aires. V Congresso Internacional sobre Mudanç as Climáticas e Desenvolvimento Sustentável. Universidade Nacional de la Plata (pp137- 138). <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/123614>

Pérez, L. (2021). A resistência antimicrobiana é um problema de “saúde única”. Investigações Agropecuárias, 46 (3), 278-281 http://ria.inta.gov.ar/sites/default/files/numeros/pubria2020_46n3_dic.pdf.

Quijano, D. (2016). Impacto ambiental dos medicamentos. Uma abordagem a partir do pensamento ambiental. [Dissertação de mestrado. Universidade Nacional da Colômbia. Faculdade de Ciências Econômicas, Instituto de Estudos Ambientais Estudos Ambientais]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/57915?show=full> Rico, J. (2016). Gestão de resíduos em áreas rurais. Como lidar com o triplo de diversidade, dispersão e periculosidade. Desarrollo rural y sostenible, (30), 12-15. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5984792>.

Rodríguez, C. (2002). Resíduos ganaderos. https://www.produccionanimal.com.ar/sustentabilidad/05-residuos_ganaderos.pdf

Sztern, D., Pravia, M., Escritório de Planejamento e Orç mento e Unidade de Desenvolvimento Municipal. Unidade de Desenvolvimento. (1999). Manual para a elaboração do Composto - Bases conceituais e procedimentos. <http://www.ingenieroambiental.com/newinformes/compost.pdf>

Tullio, L. (2007). Resíduos agropecuários. Aspectos legais para seu tratamento e descarte. Eliminação. Seminário: Desafios e Estratégias para Implementar a Digestão Anaeróbica em Agrossistemas. Digestão Anaeróbica em Agrossistemas. Buenos Aires. Argentina. https://www.globalmethane.org/documents/events_ag_20070514_tullio_reg_and_practical_requirements.pdf

Uruguai. Ministério do Meio Ambiente (2021). Uruguay m s Circular. Plano Nacional de Gestão de Resíduos <https://www.ambiente.gub.uy/oan/residuos/>.



VALORIZAÇÃO DE RESÍDUO SÓLIDO DE SISAL (*Agave sisalana*) PARA FINS ENERGÉTICOS

1Maria Fernanda Ribeiro Fernandes Alves, 2Daniel Machado Ferreira, 3Ana Beatriz S. Oliveira, 4Fernando Luiz P. Pessoa, 5Marcos Fábio de Jesus, 6*Silvio A. B. Vieira de Melo, 7*Elaine C. de Magalhães Cabral-Albuquerque

1 Universidade Federal da Bahia (PEI-UFBA), e-mail: m.fernanda@ufba.br; 2 Universidade Federal da Bahia, e-mail: danielmachado@ufba.br; 3 Universidade Federal da Bahia, e-mail: e-mail: beatriz.a@ufba.br; 4 Senai/Cimatec, e-mail: fernando.pessoa@fiab.org.br; 5 PPEAm-UFBA, e-mail: fabiolen@ufba.br, 6 Universidade Federal da Bahia (PEI-UFBA), e-mail: sabvm@ufba.br; 7 Universidade Federal da Bahia (PEI-UFBA), e-mail: elainecmca@ufba.br.

*INCT circularidade em materiais poliméricos

Palavras-chave: Biorrefinaria, Circularidade, Biomassa.

Resumo

A necessidade de garantir a segurança energética tem motivado a maioria dos países a procurar fontes alternativas de energia. Vários países, incluindo o Brasil, têm se comprometido com protocolos ambientais voltados para a inserção de fontes alternativas de energia e a maximização de sua utilização. A valorização de resíduos para fins energéticos é uma alternativa para estimular as economias agrícolas e rurais para alavancar o desenvolvimento em áreas com limitações de recursos energéticos. Além da redução das emissões de gases poluentes, a diversificação da matriz energética, baseada no aproveitamento racional das fontes disponíveis, é uma questão de crucial importância para garantir o desenvolvimento regional. Nessa perspectiva, este trabalho teve o objetivo de caracterizar quimicamente o resíduo sólido de sisal, denominado bucha de campo, e avaliar seu potencial energético. Os resultados obtidos mostraram que o sisal possui umidade de aproximadamente 11%, porcentagem de holocelulose de aproximadamente 70% e lignina em torno de 11%. O poder calorífico do resíduo sólido deste trabalho foi de aproximadamente 15 MJ/kg, sendo comparável ao resíduo sólido de biocombustíveis gasosos como biogás de aterro. Os resultados deste trabalho evidenciam a potencialidade da utilização do resíduo sólido de sisal para aproveitamento de energia pela comunidade do semiárido nordestino, seja através da queima direta ou da produção de briquetes.

Introdução

O agronegócio gera uma variedade de resíduos, incluindo cascas, palhas, bagaços, entre outros, que muitas vezes são considerados problemas ambientais e logísticos. Uma das culturas tradicionais do nordeste Brasileiro, geradora de uma grande quantidade de resíduos, é a do Sisal (*Agave sisalana*). Tradicionalmente, o sisal é valorizado pela sua fibra, que é utilizada na fabricação de cordas, tapetes, papel e uma variedade de outros produtos (Soto; Ramalho, 2012). O Brasil é o maior produtor da fibra longa extraída desta planta e a Bahia, o maior produtor nacional. No entanto, o processo de beneficiamento do sisal gera uma quantidade significativa de resíduos, que constituem uma fração sólida, composta pela mucilagem e bucha de campo, e uma fração líquida, que é chamada de suco. Segundo dados do IBGE (2024), o Brasil produziu 91.923 toneladas de fibra de sisal em 2022. Considerando que a fibra corresponde a cerca de 4 % em massa das folhas, estima-se uma quantidade de resíduos de quase dois milhões de toneladas por ano.

Entre as formas de aproveitamento dos resíduos agro-industriais sólidos em regiões com limitação de suprimento energético, destaca-se a produção de briquetes. Os briquetes são versáteis em seus usos e podem ser produzidos de forma simples. São compostos de diferentes tipos de resíduos, como cascas de coco verde (Miola et al, 2019; Esteves; Abud; Barcellos, 2015), resíduo de açaí (Oliveira.; Trugilho; Oliveira, 2022) e bagaço de cana-de-açúcar (Fernandez et al, 2017), entre outros. Além de serem ambientalmente sustentáveis, os briquetes possibilitam a valorização de materiais que, de outra forma, seriam descartados.

O briquete é produzido a partir de material sólido, como pequenas partículas ou pó, prensado em equipamentos hidráulicos ou mecânicos para formar cilindros ou discos compactados, que são utilizados como combustível (Filippeto, 2008). Durante a prensagem sob alta pressão, a temperatura aumenta cerca de 100°C, permitindo que a lignina atue como aglutinante ao se plastificar.

A lignina, o segundo composto mais abundante na Terra após a celulose, é fundamental para as plantas, agindo como um agente de ligação entre as fibras. Quimicamente composta por três unidades de fenilpropano (C₃₁H₃₄O₁₁), a lignina confere rigidez e resistência mecânica à madeira, entre outras propriedades termoplásticas (Paula, 2010). Por isso, é um dos principais componentes em produtos de madeira densificada, como briquetes e pellets. Durante o processo de densificação, a lignina da madeira, um polímero termoplástico, começa a fluir a partir de 170°C, agindo como aglutinante das partículas de madeira durante a compactação sob alta pressão e temperatura (Rowell, 1997).

Nesse contexto, os resíduos agrícolas podem ser convertidos em biocombustíveis sólidos, mas também podem apresentar potencialidade para ser convertido, via outros processos, em produtos químicos, materiais biodegradáveis, ração para animais e outros produtos de interesse comercial (Alvim, et al., 2014, Parajuli et al., 2015). Dessa forma, não somente os resíduos são valorizados, mas também são criadas oportunidades econômicas e ambientalmente sustentáveis para as comunidades agrícolas que dependem dessa cultura. Essas oportunidades não só contribuem para a redução do impacto ambiental da indústria do sisal, mas também fortalecem a resiliência e a competitividade do setor ao diversificar sua gama de produtos e criar fontes de receita.



Nessa perspectiva o presente artigo tem como objetivo caracterizar o resíduo sólido de sisal (fibra curta) denominado bucha de campo, no intuito de se conhecer o seu potencial energético, uma vez que este material é abundante e pode ser reaproveitado pela própria comunidade ou associação de produtores da região nordeste do Brasil.

Material e Métodos

O resíduo sólido de sisal (bucha de campo - SSW) foi coletado na zona rural do município de Valente, Bahia, Brasil. Após o processamento das folhas, o resíduo sólido foi colocado na peneira rotativa desenvolvida pela EMBRAPA para a separação da mucilagem e da bucha de campo, material utilizado neste estudo. Antes das análises, a bucha foi cortada manualmente com o auxílio de uma tesoura e moída em moinho de facas Willye, da marca Tecnal, em frações não superiores a 1 mm.

Caracterização Química da Biomassa *in natura*

Holocelulose

Para determinação da holocelulose, utilizou-se a norma TAPPI T257 om-85, foram adicionados a um erlenmeyer 3 g de amostra, 120 mL de água destilada, 1 mL de ácido acético e 2,5 g de clorito de sódio. O erlenmeyer foi tampado e submetido à agitação em 70 °C por 4 horas. As mesmas proporções de ácido acético e clorito foram adicionadas após 1 h e 2h30 de agitação. Em seguida, a holocelulose foi filtrada a vácuo, seca em estufa a 105 °C e pesada.

Lignina

O teor de lignina foi determinado adaptando-se a norma TAPPI T222 om-02. Nesse sentido, 1g de amostra foi macerada com 15 mL de H₂SO₄ 72% molar, por 5 minutos. Após 24 horas de repouso, a mistura foi avolumada para 560 mL com água destilada e submetida a refluxo por 4 horas. A lignina foi filtrada a vácuo e seca na estufa a 80° por 10 minutos. Cadinhos foram calcinados na mufla por 30 minutos a 700 °C e, após retirada do equipamento, foram alocados no dissecador por 30 min e depois pesados. Adicionou-se 1g de amostra em cada cadinho, submetido posteriormente à placa de aquecimento a 500 °C na capela até completa inibição de fumaça. Foram colocados na mufla por 4 h, sendo a primeira hora para atingir a temperatura de 600° C, que foi mantida no período restante. Os cadinhos voltaram para o dissecador por 30 min e em seguida foi realizada pesagem.

Extrativos

O teor de extrativos foi determinado a partir da metodologia adaptada descrita pela EMBRAPA 236, ISSN 0103 (2010). A extração ocorreu em aparelho Soxhlet, usando n-hexano como solvente por 3 h. Após esse período, o balão contendo a amostra foi disposto no rotaevaporador até recuperação completa do solvente. Assim, o balão somente com o extrato foi pesado. Devido ao volume baixo de extrato e completa recuperação do solvente não foi necessário o uso da estufa.

Cinzas

Para determinar o percentual de cinza, adaptou-se a norma descrita pela EMBRAPA 236, ISSN 0103 (2010). Em seguida foi pesada.

Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros na região do infravermelho do resíduo de sisal foram obtidos através de um espectrômetro Perkin Elmer Spectrum two FT-IR com módulo ATR com as seguintes definições: resolução de 4 cm⁻¹, 4 acumulações de varredura e intervalo de número de onda de 400 cm⁻¹ – 450 cm⁻¹.

Caracterização Física da Biomassa *in natura*

Umidade

Para determinar o teor de umidade foi utilizada a metodologia descrita pelo manual da EMBRAPA 236, ISSN 0103 (2010).

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A morfologia da bucha de sisal foi investigada utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura (MEV) JEOL JSM-6610lv. As amostras foram fixadas por meio de uma fita de carbono, em um suporte metálico e posteriormente foram revestidas em uma fina camada de ouro.

Caracterização dos Briquetes

Poder Calorífico Superior (PCS)

Para determinar o PCS da bucha de sisal, da lignina e dos briquetes foram confeccionadas pequenas pastilhas com cerca de 1 g do resíduo a ser analisado. A caracterização do material foi feita em bomba calorimétrica digital adiabática modelo IKA C- 2000. De acordo com a norma ASTM D2015-66, sob excesso de O₂ e pressão de 30 atm, a combustão foi realizada. Para



a calibração da bomba calorimétrica foi utilizado ácido benzóico. Amostras com cerca de 0,5 g são colocadas dentro do cilindro de aço, aplica-se pressão de cerca de 30 atm com oxigênio e a amostra é queimada instantaneamente. A tela do equipamento mostra o valor do poder calorífico, que é a quantidade de energia desprendida durante o processo.

Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral dos Briquetes

Os briquetes foram submetidos ao teste de resistência à tração por compressão diametral dos corpos-de-prova cilíndricos, de acordo com a Norma ABNT NBR 7222, em máquina universal de ensaios da marca @PAVITEST, onde a carga foi aplicada no sentido perpendicular à força de compactação (comprimento do briquete). Foram feitos 9 briquetes, sendo 3 para cada tratamento. Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Pelo teste F, a 5% de probabilidade, e comparações múltiplas de médias pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. As análises foram realizadas utilizando o programa estatístico R (R CORE TEAM, 2022).

Resultados e Discussão

As Tabelas 1 e 2 mostram os dados de caracterização química do resíduo sólido de Sisal (SSW).

O resíduo sólido de sisal foi caracterizado quanto ao teor de holocelulose (celulose + hemicelulose), lignina e extrativos solúveis (Tabela 01). Dados obtidos com o resíduo sólido de sisal do semiárido baiano mostram que os teores de holocelulose, lignina e cinza estão compatíveis com os dados existentes na literatura para fibra de sisal. Embora o resíduo sólido seja diferente da fibra, ambos apresentam composição química semelhante quanto ao teor de celulose, holocelulose e lignina.

O teor de cinzas representa a fração inerte da amostra desidratada, que é incombustível. Para a biomassa de sisal estudada, o teor de cinzas foi ~6,6%, enquanto a lignina sozinha apresentou valor médio de ~4,3% (Tabela 02). A lignina influencia na aglutinação entre as partículas. Assim, um grande teor de lignina é desejável nas amostras. Neste trabalho, o teor de lignina no SSW foi de aproximadamente 11 %, ficando abaixo do teor de muitos materiais citados na literatura, como bagaço de cana e sementes de açaí (Tabela 01). Os extrativos podem facilitar a ignição da biomassa nos estágios iniciais de combustão (Oliveira e colaboradores, 2022). No presente trabalho, o teor de lignina foi menor que o das sementes de açaí e bagaço de sisal, citado por Guerra e colaboradores (2019) e Lima e colaboradores (2013). Essa diferença pode ser explicada pelas condições de clima e solo de origem de cada tipo de biomassa, pela idade e fase de desenvolvimento da biomassa e pelo tipo de espécie vegetal, entre outros fatores.

Tabela 1: Valores de Holocelulose, Lignina e Extrativos Solúveis de diversas matérias-primas encontradas na literatura

REFERÊNCIA	MATÉRIA-PRIMA	CELULOSE(%)	LIGNINA(%)	EXTRATIVOS SOLÚVEIS(%)
Autor	Bucha de campo do Sisal	70,77	10,98	3,375
Oliveira et al, 2022	Semente de açaí	51,94	34,04	12,58
Rodrigues, 2014.	Taboa (Jovem Central)	61,64 ± 0,6	21,1 ± 2,2	11,54 ± 1,3
	Bagaço de cana de açúcar	74,37 ± 0,4	26,3 ± 0,7	6,13 ± 0,04
Guerra et al., 2019.	Resíduo sólido de sisal in natura	33,70 ± 2,3	32,7 ± 2,4	21,0 ± 0,6
Bezerra, 2016.	Bagaço de sisal	56,21	15,5	10,2
Prakash, et al., 2020.	Fibra de sisal	84,0	14,0	2,0
Lima et al., 2013.	Fibra de sisal	72,1	13,5	5,8
	Bagaço de sisal	48,2	22,6	8,5
Campilho, 2015.	Fibra de sisal	70 a 92,2	8,0 a 14,0	2,0
Vigneshwaran, et al., 2020.	Fibra de sisal	88,0	8,0	2,0
Gouvêa, 2012.	Resíduo de painéis (MDF e MDP)	61,5	31,8	10,7

Fonte: Adaptado de Rodrigues, 2014; Guerra et al., 2014; Bezerra, 2016; Prakash et al., 2021; Lima et al., 2013; Campilho, 2015; Vigneshwaran, et al., 2020 e Gouvêa, 2012.

A Tabela 2 mostra os dados obtidos neste trabalho e compara com alguns materiais lignocelulosos. O poder calorífico superior (PCS) do briquete é a quantidade de calor que desprende 1 kg de combustível quando de sua combustão completa. Uma quantidade de poder calorífico considerada suficiente para a combustão compreende entre 4.300 e 5.000 kcal/kg, segundo Silveira (2008). O poder calorífico da bucha de campo do sisal foi comparável ao bagaço de cana – variedade 7985, como



relatado por Silva e colaboradores (2021), e ao resíduo sólido de sisal, como relatado por Jambeiro e colaboradores (2018). O poder calorífico superior do SSW de 15,63 MJ/kg é comparável ao de biogás de aterro (~12 MJ/kg) e de biogás de biodigestor (~20 MJ/kg). Vale ressaltar que a bucha de campo é o resíduo sólido sem a mucilagem. A bucha de sisal, fibra curta, apresentou PCS abaixo de 4.300 kcal/kg. No entanto, briquetes produzidos com SSW+lignina 8:2 apresentaram PCS próximo a 4.300 kcal/kg. Assim, a capacidade de aproveitamento do resíduo sólido deste produto para fins energéticos, considerando que toneladas do SSW são descartadas sem qualquer aproveitamento, é extremamente elevada.

Tabela 2: Valores de Poder Calorífico e Cinzas de diversas matérias-primas encontrados na literatura

REFERÊNCIA	MATÉRIA-PRIMA	PODER CALORÍFICO (MJ/kg)	CINZAS (% massa)
Autores	Bucha de campo de Sisal	15,63	6,66
	Lignina	24,53	4,31
	Briquetes Sisal + Lignina 9:1	16,84	6,87
	Briquetes Sisal + Lignina 8:2	17,63	6,36
Adaptado de Silva et al. 2021.	Casca de soja	18,63	6,82
	Casca de amendoim	20,09	2,71
	Bagaço de cana var-7985	19,57	2,59
	Bagaço de sorgo sacarino var-509	18,53	2,67
	Bagaço do extrato de tomate	24,84	3,42

Fonte: Adaptado de Silva et al, 2021; Jambeiro et al, 2018 e Gouvêa, 2012.

O SSW foi caracterizado por Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) para evidenciar os grupos funcionais característicos presentes no resíduo sólido. Sabendo que o sisal é composto principalmente de celulose, foi possível identificar, na Figura 1, a banda de absorção da hidroxila, entre 3625-3000cm⁻¹, com pico em 3300cm⁻¹; a banda que corresponde a (-CH), entre 3000-2750 cm⁻¹, com pico em 2900cm⁻¹; e os picos 1424 cm⁻¹ e 1027 cm⁻¹, correspondendo respectivamente a (-CH₂) e (CO).

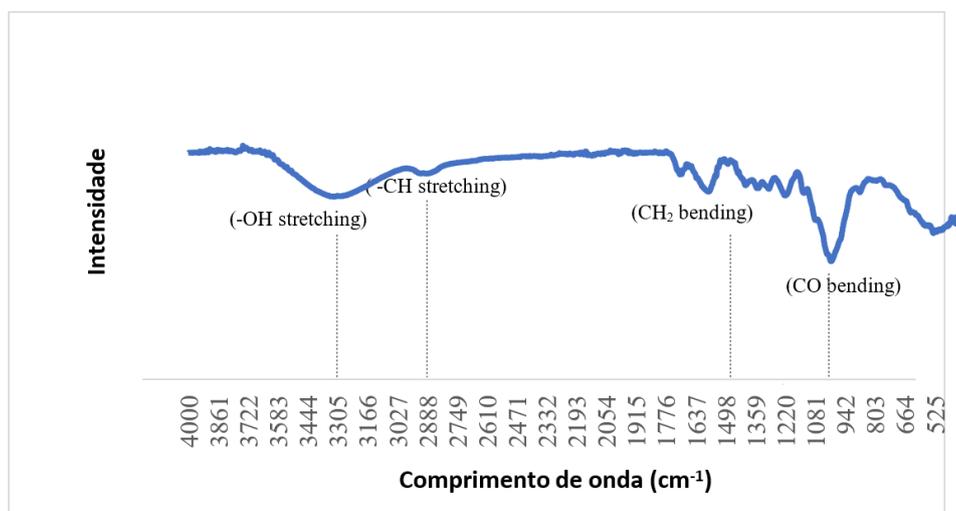


Figura 1: Espectro de FT-IR do resíduo sólido de Sisal (SSW).

Fonte: Os autores

A umidade é um parâmetro importante para determinar a qualidade dos briquetes. Altos níveis de umidade afetam a taxa de ignição, no início da queima, e diminui a taxa de combustão (energia liberada). O teor de umidade encontrado para a bucha de sisal foi de 8%. Segundo Quirino (2002), o processo de compactação exige uma certa quantidade de água, que consiste entre 8 e 15%. Valores acima disso são prejudiciais ao processo. Ao comparar os valores obtidos com os dados encontrados na literatura, pode-se perceber que os valores são compatíveis. P. Vimalanathan, et al: 8%; Mohd. Akram Khan, et al: 9-11%; Y. LI. et al: 11%.

As imagens do resíduo sólido do Sisal (SSW), obtidas por microscopia eletrônica de varredura, evidenciam a estrutura fibrosa do material (Figura 2).

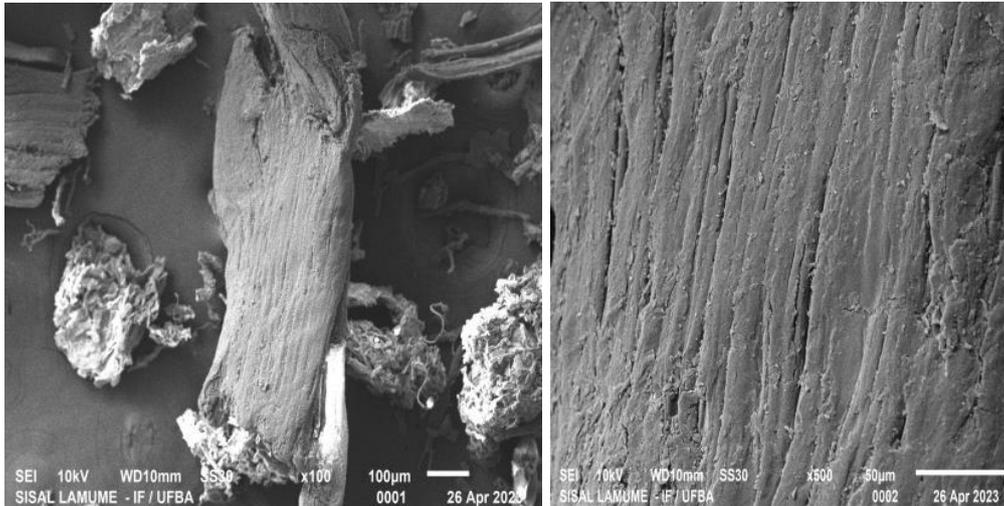


Figura 2: Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da bucha de campo (SSW) em diferentes magnitudes (100x; 500x).

Fonte: Os autores

Para testar a resistência dos briquetes, foram confeccionados 9 briquetes sendo 3 de sisal puro, 3 da mistura sisal + lignina 9:1 e 3 da mistura sisal + lignina 8:2 (figura 3) em prensa hidráulica com carga de 5 N por 30 segundos.



Figura 3: Briquetes de sisal puro (A), sisal+lignina 9:1 (B) e sisal+lignina 8:2 (C).

Fonte: Os autores

É importante conhecer a resistência dos briquetes para que se evite a quebra e o esmagamento dos briquetes durante seu transporte. O tratamento que obteve a maior resistência foram os briquetes de sisal com adição de lignina na proporção 8:2. Fernandez e colaboradores (2017) encontraram os seguintes valores de resistência para briquetes de diversas biomassas: Pinus $0,219 \pm 0,046$ MPa, Bagaço de cana-de-açúcar $0,472 \pm 0,029$ MPa, Angelim-vermelho $0,840 \pm 0,069$ MPa e Blendas (pinus+bagaço+angelim) $0,397 \pm 0,062$ MPa. Assim, neste sentido, o briquete de tratamento sisal+lignina 8:2 apresenta-se melhor para manuseio e transporte em comparação com os demais trabalhos citados na literatura.

De acordo com a tabela 3, a resistência apresentou uma tendência de aumento conforme foi-se adicionando lignina. Entretanto, não foram encontradas diferenças estatisticamente significantes entre os tratamentos, conforme o teste de Tukey com um nível de significância de 5%.

Tabela. 3: Comparação de médias entre os tratamentos (matéria-prima) Sisal, Sisal+ Lignina 9:1 e Sisal + Lignina 8:2

MATÉRIA - PRIMA	RESISTÊNCIA (MPa)
Sisal	1,43 a
Briquetes Sisal + Lignina 9:1	1,67 a
Briquetes Sisal + Lignina 8:2	1,70 a

Fonte: Os autores



Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Conclusões

Os dados obtidos neste trabalho com o resíduo sólido de sisal mostram que os teores de holocelulose, lignina e cinza estão compatíveis com os dados existentes na literatura para fibra de sisal. Embora o resíduo sólido seja diferente da fibra, ambos apresentam composição química semelhante quanto ao teor de celulose, holocelulose e lignina.

Na espectroscopia de Infravermelho (FTIR) foi possível identificar a banda de absorção da hidroxila, entre 3625-3000 cm^{-1} , com pico em 3300 cm^{-1} ; a banda que corresponde a (-CH), entre 3000-2750 cm^{-1} , com pico em 2900 cm^{-1} ; e os picos 1424 cm^{-1} e 1027 cm^{-1} , correspondendo respectivamente a (-CH₂) e (CO).

A umidade encontrada para o SSW foi de 8 %, valor considerado adequado para a produção de briquetes, conforme literatura.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) evidenciou a estrutura fibrosa do sisal.

O Poder Calorífico Superior do SSW e briquetes apresentaram valores compatíveis com os encontrados na literatura, mostrando que o resíduo de sisal é adequado para a briquetagem. Por fim, a resistência dos briquetes foi aumentando à medida que se adicionou lignina, entretanto não difeririam estatisticamente entre si.

Considerações Finais

Os resultados de caracterização da bucha de campo de sisal, proveniente do semiárido baiano, evidenciam a potencialidade da utilização do mesmo para fins energéticos na região, uma vez que apresentou baixa umidade (8%) e poder Calorífico (SSW) de 15,63MJ/Kg e aproximadamente 17,8 MJ/Kg quando misturado com resíduo de lignina na proporção mássica 8:2. Tal potencial calorífico do SSW é comparável a outros resíduos sólidos, citados na literatura, como sementes de açaí, bagaço de cana e casca de arroz.. Assim, briquetes a base de resíduo sólido de sisal mostram-se promissores para fins energéticos em regiões rurais com disponibilidade do SSW.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001” e da FINEP – código de financiamento 01.24.0099.00. Além disso, os autores gostariam de agradecer a APAEB pelo suporte dado a este trabalho.

Referências Bibliográficas

- American Society For Testing And Materials –ASTM. 1977.** ASTM D-2015-66, ASTM D-167-73, D-1762-64. Philadelphia, PA.
- AKRAM KHAN, M. et al. 2011. Characterisation Studies and Impact of Chemical Treatment on Mechanical Properties of Sisal Fiber. **Composite Interfaces**, 18(6), 527–541. doi:10.1163/156855411x610250
- Associação Brasileira de Normas de Normas Técnicas- ABNT. NBR 7222-1994. **Argamassa e Concretos: Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro.
- ALVIM, J. C. et al. 2014. Biorrefinarias: Conceitos, classificação, matérias primas e produtos. **Journal of Bioenergy and Food Science**. Macapá, v.1, n. 3, p. 61-77, out. /dez.
- BEZERRA, G. S. 2016. **Avaliação da produção simultânea de xilitol e etanol a partir do bagaço de sisal**. 2016. 80f. Dissertação(Mestrado em Química) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba.
- CAMPILHO, R. D. S. G. 2015. **Natural fiber composites**. [s.l.] CRC Press.
- EMBRAPA, 2010. **Procedimentos para análise lignocelulósica**. Documentos 236, ISSN 0103 – 0205.
- ESTEVES, M. R. L.; ABUD, A. K. S.; BARCELLOS, K. M. 2015. Avaliação do potencial energético das cascas de coco verde para aproveitamento na produção de briquetes. **Scientia Plena**, v. 11, n. 3, p. 1-8.
- FERNANDEZ, B. O. et al. 2017. Características mecânicas e energéticas de briquetes produzidos a partir de diferentes tipos de biomassa. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 1, p. 29-38.
- FILIPPETTO, D. 2008. **Briquetagem de resíduos agrícolas vegetais: viabilidade técnico-econômica e potencial de mercado**. 61 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo.
- GOUVÊA, A. de F. GOMES. 2012. **Produção de briquete a partir da adição da lignina kraft com resíduo da indústria moveleira**.2012. 112f. Tese. (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Minas Gerais.
- GUERRA, G. N. et al. 2019. Chemical and Physicochemical Characterization of Alkali Pretreated and in Natura Sisal Solid Waste, **Journal of Natural Fibers**, DOI: 10.1080/15440478.2019.1612815.



- HEINZE, T. 2015. Cellulose: Structure and Properties. *Cellulose Chemistry and Properties: Fibers, Nanocelluloses and Advanced Materials*, 1–52. doi:10.1007/12_2015_319
- IBGE (SIDRA) 2024. **Produção agrícola municipal**. Disponível em <<https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/5457>>. Acesso em 23 abr. 2024.
- JAMBEIRO, T. A., et al. 2018. Fast Pyrolysis of Sisal Residue in a Pilot Fluidized Bed Reactor. **Energy & Fuels**. doi: 10.1021/acs.energyfuels.8b01718.
- LI, Y., MAI, Y.-W. AND YE, L. (2000) Sisal Fibre and Its Composites: A Review of Recent Developments. **Composites Science and Technology**, 60, 2037-2055. [http://dx.doi.org/10.1016/S0266-3538\(00\)00101-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0266-3538(00)00101-9)
- LIMA, G. et al. 2013. Characterization of acid hydrolysis of sisal. **Applied Energy**, v. 102, p. 4. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.09.061>
- MIOLA, et al. 2019. Aproveitamento energético dos resíduos de cascas de coco verde para a produção de briquetes. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v 25, n. 4, p. 627-634.
- OLIVEIRA, P. R.; TRUGILHO, P.F.; OLIVEIRA, T.J. 2022. Briquettes of acai seeds: characterization of the biomass and influence of the parameters of production temperature and pressure in the physical-mechanical and energy quality **Environmental Science and Pollution Research**, v.29.
- PARAJULI, R.; et al. 2015. Biorefining in the prevailing energy and materials crisis: a review of sustainable pathways for biorefinery value chains and sustainability assessment methodologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p.244-263.
- PAULA, S. C. da S. 2010. **Precipitation of lignin from kraft black liquor**. 2010 45f. Tese (Mestrado Integrado em Engenharia Química) – Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia. Porto..
- PRAKASH, R. et al. (2020). Mechanical characterisation of sustainable fibre-reinforced lightweight concrete incorporating waste coconut shell as coarse aggregate and sisal fibre. **International Journal of Environmental Science and Technology**. doi:10.1007/s13762-020-02900-z.
- QUIRINO, W. F. 2002. **Utilização energética de resíduos vegetais**. Brasília, DF: IBAMA, Laboratório de Produtos Florestais, 2002.
- R CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2022. Disponível em: <<http://www.r-project.org/index.html>>.
- RODRIGUES, F. S. de C. 2014. **Análise da composição química da *Typha domingensis* e Quantificação de glicose gerada a partir de hidrólise ácida**. 2014. 76f. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, São Paulo.
- ROWELL, R. M. 1997. “Paper and Composites from Agro-Based Resources”, **Lewis Publishers**, New York.
- SILVA, M. F. F. et al. 2021. Avaliação do Potencial Energético de Resíduos Agroindustriais. **Rev. Virtual Quím.** 2021, 14 (1), 46- 49.
- SILVEIRA, M.S. (2008). Aproveitamento das cascas de coco verde para Produção de briquete em Salvador- BA. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- SOTO, I. I.; RAMALHO, M. A.; 2012. **Use of natural sisal fibre in concrete blocks for structural masonry**. In: 15th International Brick and Block Masonry Conference IBMAC, Florianópolis. Proceedings: 15th IBMAC, Florianópolis, Brasil.
- TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY- TAPPI. 1985. **Standard Method T257 om-85: Tappi test methods**. Atlanta.
- TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY- 2002. TAPPI. **Standard Method T222 om-02: Tappi test methods**. Atlanta.
- VIGNESHWARAN, S. et al. 2020. Recent advancement in the natural fiber polymer composites: A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production Elsevier Ltd**, 20 dez. 2020.
- VIMALANATHAN, P. et al. 2021. A Study on Mechanical and Morphological Analysis of Banana/Sisal Fiber Reinforced IPN Composites. **Fibers and Polymers**, 22(8), 2261–2268. Doi:10.1007/s12221-021-0917-x.



TOMADA DE DECISÃO PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL (SAF): UMA ANÁLISE UTILIZANDO O MÉTODO AHP

1Raiane Pereira de Sá Borges, 2Delano Mendes de Santana 3Ednildo Andrade Torres

1 Universidade Federal da Bahia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial, e-mail: raiborges.94@gmail.com;

2 Universidade Federal da Bahia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial, e-mail: delano.mendes@ufba.br;

3 Universidade Federal da Bahia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial, e-mail: ednildotorres@gmail.com;

Palavras-chave: Querosene Sustentável de Aviação; Energia; Biocombustível

Resumo

Os voos aéreos são cruciais na era moderna, impulsionando a economia global e promovendo interações sociais. Diante disso, o biocombustível de aviação sustentável (SAF), derivado de matérias primas renováveis, despertou grande interesse científico como potencial substituto do convencional querosene de aviação, proveniente de combustíveis fósseis. Ademais, diferente do querosene convencional de petróleo, o biocombustível SAF apresenta uma pegada de carbono notavelmente menor, ou seja, apresenta menos emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera. No entanto, devido ao número grande de rotas de produção e de matérias primas disponíveis, é necessário determinar, através do método Analytic Hierarchy Process (AHP), qual a tomada de decisão mais adequada para a produção de SAF. Desenvolvida por Thomas Saaty em 1980, o AHP é uma ferramenta de tomada de decisão multicritério. As alternativas e critérios definidos no método foram determinados por meio de revisão bibliográfica pela plataforma Periódicos CAPES. Assim, foram realizadas duas aplicações deste método de multicritérios. A primeira aplicação determina a melhor rota tecnológica de produção entre Ésteres e Ácidos Graxos Hidrocarbonados-Hidroprocessados (HEFA), Fischer-Tropsch (FT) e Álcool (Isobutanol ou Etanol) para Jet (ATJ). Já a segunda aplicação seleciona a matéria prima mais adequada para a produção deste biocombustível. Portanto, buscou-se determinar, através de tomada de decisão do AHP Gaussiano, o caminho ideal para produção de SAF no Brasil.

Introdução

As viagens aéreas são as principais ferramentas de transporte do mundo contemporâneo, uma vez que apoiam tanto a economia global, quanto comunicação social. Conforme relatada pela Associação Internacional de Transportes Aéreos (IATA), estima-se que as viagens de avião tenham um aumento de 60% em relação a 2019, o que seria de aproximadamente 7,2 bilhões de passageiros até 2035. De acordo com SIEW et al (2021), o rápido crescimento da indústria de aviação, acarretará o consumo exponencial de combustíveis fósseis, e como consequência, contribuirá para os problemas ambientais decorrentes desta utilização, uma vez que, tais combustíveis são derivados de fontes não renováveis. Dessa forma, a dependência nestes combustíveis fósseis, ocasionará em acúmulo de CO₂ na atmosfera e elevará a concentração de gases de efeito estufa (GEE) no planeta.

No aspecto global, o setor de aviação é responsável por aproximadamente 2% das emissões de GEE na atmosfera (MONTE et al, 2022; SOUZA et al, 2020; UMENWEKE et al, 2023). Com base neste fator preocupante, em 2009, de acordo com Wei et al (2019), a IATA (International Air Transport Association) desenvolveu três metas para diminuir a emissão de GEE de todo setor da aviação, no qual uma das metas era reduzir pela metade a emissão destes gases, em comparação aos dados de 2005. Porém, Monte et al, (2019) afirma que no ano de 2019 a Organização Internacional de Aviação Civil (ICAO), estabeleceu acordos de descarbonização de todo setor da aviação até 2050, e um dos acordos aprovados pela ICAO foi intitulado Carbon Offset and Reduction Scheme for International Aviation (CORSA). Tal acordo visa estabilizar as emissões de CO₂, propondo a introdução urgente de combustíveis sustentáveis para aviação (SAF). (BATTEN et al, 2023; ESWAEAN et al, 2021; WANG et al, 2020).

Logo, diante destas problemáticas e do contexto estabelecido na COP26 e no acordo de Paris, o Brasil se comprometeu a reduzir em 50% as Emissões de GEE até 2030. Desta forma, com o intuito de reduzir a pegada de carbono e cumprir os acordos internacionais firmados, o país intensificou o investimento em pesquisas para aprimorar os biocombustíveis de aviação, visando qualidade de produto com menores impactos negativos (MILANEZ et al, 2021; SOUZA et al, 2020). Assim, diante destes esforços, o objetivo deste artigo é determinar, através do método de tomada de decisão AHP (Processo Hierárquico Analítico), a rota tecnológica e a matéria prima mais adequada para a fabricação de SAF no Brasil.

Material e Métodos

O método para o desenvolvimento desta pesquisa foi proposto por Shaban et al (2023) e está dividido em três tópicos principais, sendo esses, pontos decisivos para as escolhas das alternativas e critérios nesta análise de tomada de decisão pelo método AHP. A seleção dos artigos ocorreu pela plataforma Periódicos CAPES CAFe, com os bancos de dados da Scopus, Science Direct e Web Of Science. No primeiro passo da análise, foram inseridos os seguintes códigos: (SAF OR KEROSENE OR "AVIATION SUSTENTABLE") AND (HEFA OR "CATALYTIC HYDROGENATION"), seguindo o fluxo metodológico do estado da arte, como exemplificado na Tabela 1.



Tabela 1: Fluxograma da escolha dos artigos mais relevantes

Search for Publication	Exclusion Criteria	Relevant Publications
601 Publication	2019-2024 Articles accepted in English	351 Publication

Ademais, após a seleção do material relevante para a análise do artigo e tendo em vista os problemas provenientes das distintas rotas tecnológicas para a produção de SAF, e as inúmeras matérias primas, esse artigo visa determinar através do método AHP, de tomada de decisão, determinar qual rota e qual matéria prima é a mais adequada para a produção deste biocombustível. Desta forma, foram feitas duas aplicações deste método AHP de multicritério, a primeira para determinar a melhor rota tecnológica e a segunda para estabelecer a matéria prima mais adequada. Tais escolhas foram obtidas conforme os critérios de relevância pré-estabelecidos no fluxo metodológico do estado da arte.

Para o processo de produção de SAF é possível detectar uma ampla variedade de tecnologias de bioconversão demonstrados no estado da arte, tais como observado nos artigos de Ahmad et al (2021); Batten et al (2023); Dahal et al (2021); Seber et al (2022); Shahrair et al (2022) e Why et al (2019). De acordo com Ahmad et al (2021), algumas rotas tecnológicas de bioconversão são bem estabelecidas, enquanto outras são relativamente novas, desta maneira, necessitam de estudos aprofundados para obterem benefícios adicionais na produção do SAF. Assim, conforme ao critério de TRL (Technology Readiness Level) demonstrado por Monte et al (2022), Souza et al (2020) e Wei et al (2019), as principais rotas que possuem níveis de prontidão tecnológica entre 5 e 8 são: Fischer Tropsch (FT), Alcohol to Jet (ATJ) e Hydroprocessed esters and fatty acids (HEFA).

Desta maneira, assim como avaliado por Souza et al (2020) que investigou o avanço agrícola para biocombustíveis no Brasil, as matérias primas analisadas neste artigo, com base nestas rotas tecnológicas, foram: FT (Resíduo de Madeira, Gás de Síntese e Resíduos agrícolas), ATJ (Etanol e Isobutanol) e HEFA (Soja, Palma, Amendoim e Mamona). Por fim, os critérios selecionados foram baseados nos principais indicadores econômicos, ambientais e sociais para a produção de SAF no Brasil (JULIO et al, 2021; SOUZA et al, 2020; WEI et al, 2019). Logo, a tomada de decisão estratégica seguido neste artigo, é demonstrada na Tabela 2.

Tabela 2: Tomada de Decisão Estratégica

01	02	03	04	05
Reconhecimento da Problemática	Definição do Método	Escolha das Alternativas	Escolha dos Critérios	Análise Operacional
↓	↓	↓	↓	↓
Busca por artigos relevantes na plataforma Periódicos CAPES CAFe, utilizando as palavras chaves: (SAF or “BIOJET”) and FUEL	Definição da ferramenta de tomada de decisão mais abrangente na pesquisa operacional, conforme analisado na literatura.	Definição das alternativas, a partir do estado da arte da fundamentação teórica da pesquisa. Objetivando as principais rotas tecnológicas e matérias primas disponíveis no Brasil	Definição dos critérios a partir do estado da arte. Objetivando as principais demandas para obtenção das rotas tecnológicas e matérias primas	Determinação dos valores quantitativos de cada critério através da fundamentação teórica. A análise operacional do método ocorrerá pela ferramenta Office-Excel, que determinará as estratégias tomadas de decisões

Método Analytic Hierarchy Process (AHP)

O método AHP, desenvolvido por Saaty em 1980, é um procedimento científico, compreensivo e racional, utilizado para modelar uma situação e/ou problema que seja necessária uma tomada de decisão, representando e quantificando as variáveis incluídas na hierarquia de critérios (SAATY, 2005). Assim, esse método de tomada de decisão, prioriza os indicadores quantitativos, convergindo-se para um resultado mais adequado, facilitando e tratando problemas complexos de maneira mais simples e objetiva (SAATY, 2005; SOUZA et al 2020). Ademais, segundo Golic et al (2023), a estruturação hierárquica deste método, demonstrado na Figura 1, mantém todas as partes da hierarquia correlacionadas, deixando claro como as mudanças em um elemento afetam os outros elementos.

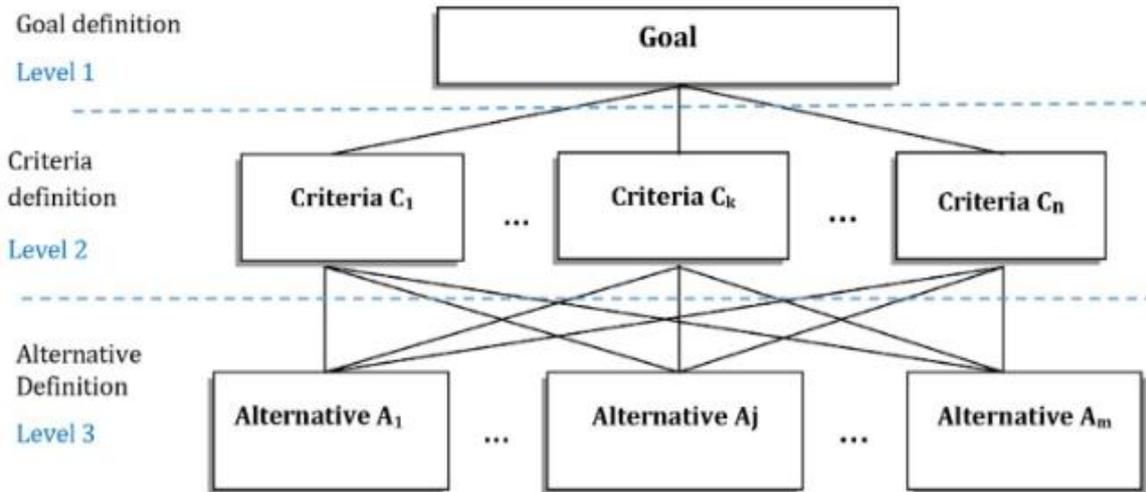


Figura 1: Estruturação hierárquica para aplicação do método AHP.

Outrossim, segundo Ahmad et al (2021) e Golic et al (2023) o processo de tomada de decisão pelo método AHP acontece em três fases, sendo essas: estabelecimento dos pesos dos critérios, normalização da matriz de decisão e, por fim, agregação. A primeira fase é separada em três momentos: primeiramente ocorre a ponderação dos critérios através da matriz de julgamentos (Figura 2) pela escala fundamental de Saaty (Tabela 3). Essa escala numérica varia de 1 a 9, ao qual determina a relevância dos critérios, assim como demonstrado na figura 6 (SOUZA et al, 2020; GOLIC et al, 2023).

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1j} \\ 1/a_{12} & 1 & a_{23} & \dots & a_{2j} \\ 1/a_{13} & 1/a_{23} & 1 & \dots & a_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & 1 & \dots \\ 1/a_{1j} & 1/a_{2j} & 1/a_{3j} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

Figura 2: Matriz de julgamento no método AHP.

Tabela 3: Escala fundamental de Saaty

Intensidade de Importância	Definição	Explicação
1	Mesma Importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objeto
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação a outra
5	Importância grande ou essencial	A experiência e julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação a outra
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação a outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática
9	Importância absoluta	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre os valores adjacentes	Quando se procura uma condição entre duas definições

Já no segundo momento da análise, ocorre a normalização da matriz decisão para obter o vetor de prioridade da matriz, por fim, no terceiro momento acontece a divisão dos pesos pelo vetor prioridade. Desta forma, os dados que serão encontrados



nestes momentos são: o Índice de Consistência (IC) (Equação 1) e a Razão de Consistência (RC) (Equação 2).

$$IC = \frac{|\lambda_{\max} - N|}{N - 1}$$

Equação 1: Índice de consistência.

Onde N é a ordem da matriz e λ_{\max} é o maior autovalor da matriz de julgamentos paritários.

$$RC = \frac{IC}{IR}$$

Equação 2: Razão de consistência.

Onde: IC é o Índice de Consistência e IR é o Índice Randômico.

De acordo com Souza et al (2020), o Índice Randômico de Saaty é um valor tabelado conforme exemplificado na Tabela 4.

Tabela 4: Índice de Randômico de Saaty

Ordem de Matriz (N)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Valores de IR	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

Por fim, de acordo com Ahmad et al (2021), se a razão de consistência calculada for menor que 10%, os critérios analisados são considerados satisfatórios para o julgamento da tomada de decisão. Tornando válido as próximas etapas de normalização da matriz de decisão e agregação dos valores.

Então, tomando em consideração a produção de SAF no Brasil e relacionando os requisitos selecionados no fluxo metodológico do estado da arte, - ao qual foi considerado os indicadores econômicos, ambientais e sociais -, os critérios selecionados na primeira fase do processo que determina a rota tecnológica de produção mais adequada, foram: Rendimento do processo, Despesas operacionais (USD/L), Emissão de GEE (gCO_{2eq}/MJ), Quantitativo de Vantagens e Quantitativo de Desvantagens. Ademais, assim como sugerido por Saaty (2005), os critérios indicados de Rendimento de Processos, Despesas Operacionais (USD/L) e Emissão de GEE (gCO_{2eq}/MJ), foram obtidos através da média ponderada dos valores obtidos no estado da arte da fundamentação teórica para cada rota. Já nos critérios Quantitativo de Vantagens e Quantitativo de Desvantagens, houve uma caracterização dos valores qualitativos para quantitativos, com ponderação da média aritmética, das vantagens e desvantagens de cada rota.

Já na segunda fase da análise, que determina a escolha da melhor matéria prima, os critérios selecionados foram: Tonelada de Produção, Valor (US\$/tonelada), Acidez do óleo (mg de KOH/g), Período de colheita (sazonalidade-meses) e Volume De Água No Cultivo (mm), conforme sugerido por Souza et al, (2020). Logo, todos os critérios escolhidos neste artigo, foram retirados de tabelas quantitativas existentes nos artigos da fundamentação teórica. Dessa forma, como já citado e determinados nos critérios pré-estabelecidos, a análise das alternativas ocorreu em duas etapas pelo método AHP, assim como exemplificados no mapa mental da Figura 3.

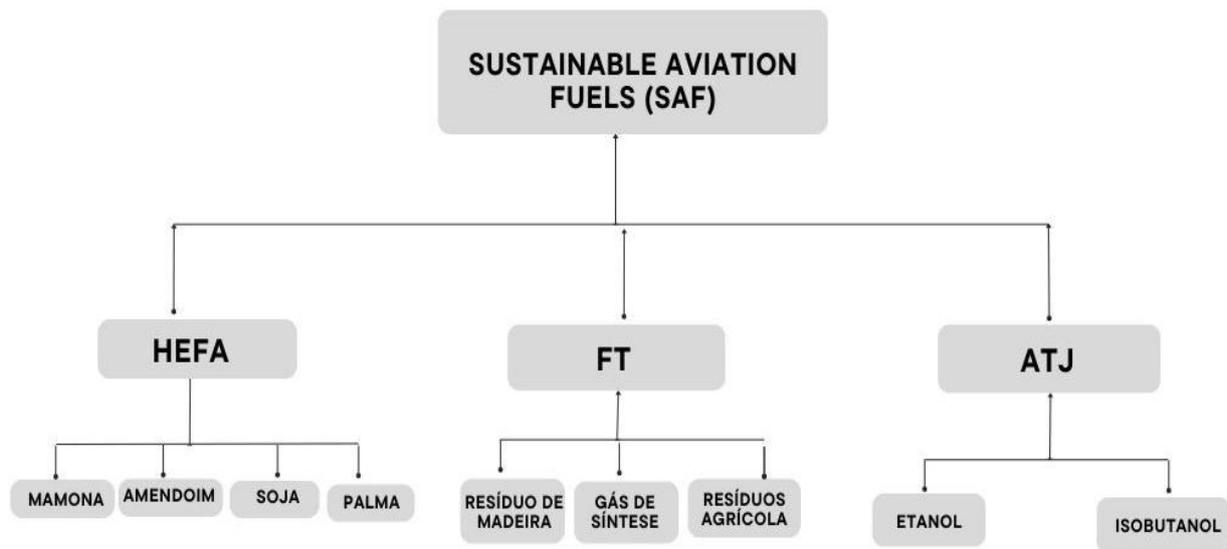


Figura 3: Mapa Mental das aplicações do método AHP de multicritério.

Resultados e Discussão

Aplicação do Método AHP: Determinação da melhor rota tecnológica para o SAF

A partir de levantamento metodológico e com o auxílio do pacote Office do Excel, a matriz de julgamento e os pesos dos critérios, determinados nesta pesquisa, estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Matriz de decisão para determinar a melhor rota

	Rendimento Do Processo	Despesas Operacionais OPEX (USD/L)	GEE Emissão (GCO _{2eq} /Mj)	Quantitativo De Vantagens	Quantitativo De Desvantagens
Rendimento Do Processo	1	3	2	3	5
Despesas Operacionais - OPEX (USD/L)	0,333	1	3	4	6
GEE Emissão (GCO_{2eq}/MJ)	0,500	0,333	1	3	2
Quantitativo De Vantagens	0,333	0,250	0,333	1	3
Quantitativo De Desvantagens	0,200	0,166	0,5	0,333	1
Somatório Σ Total	2,366	4,750	6,833	11,333	17

Dessa maneira, os valores de vetor prioridade, lambda, índice de consistência e razão de consistência, foram expostos nas Tabelas 6 e 7. Assim, demonstrando que, como a razão de consistência deu menor que 10%, comprova que o decisor fez uma comparação paritária legal, validando o estabelecimento dos pesos dos critérios.

Tabela 6: Vetor Prioridade da análise

Vetor Prioridade
0381
0,299
0,162
0,101
0,056



Tabela 7: Resultados das análises pelo Office Excel

Valor de Lambda Máx (γ máx)	5,422
Índice Randômico (IR – N=5)	1,120
Índice de Consistência (IC)	0,105
Razão de Consistência (RC)	0,094

Ademais, os valores quantitativos, obtidos através do estado da arte da fundamentação teórica, exemplificados na matriz da Tabela 8, demonstra os valores utilizados na tomada de decisão.

Tabela 8: Matriz quantitativa com valores da literatura

	Rendimento Do Processo	Despesas Operacionais OPEX (USD/L)	GEE Emissão (GCO_{2eq}/Mj)	Quantitativo De Vantagens	Quantitativo De Desvantagens
HEFA	0,750	0,170	1,200	6,00	3,00
FT	0,130	0,240	1	5,00	2,00
ATJ	0,560	0,500	0,300	5,00	4,00

Por fim, após as fases de normalização da matriz de decisão quantitativa, obteve-se os dados da Tabela 9.

Tabela 9: Matriz normalizada de decisão

	Rendimento Do Processo	Despesas Operacionais OPEX (USD/L)	GEE Emissão (GCO_{2eq}/Mj)	Quantitativo De Vantagens	Quantitativo De Desvantagens
HEFA	0,521	0,488	0,161	0,375	0,308
FT	0,090	0,346	0,194	0,313	0,462
ATJ	0,3889	0,166	0,645	0,313	0,231

Logo, a pesquisa operacional do método AHP determinou o ranking da rota tecnológica mais adequada para produção de SAF (Figura 4). Portanto, estabelece que, com os critérios selecionados a melhor rota é a HEFA, indo de acordo com a análise do estado da arte já determinada na fundamentação teórica.

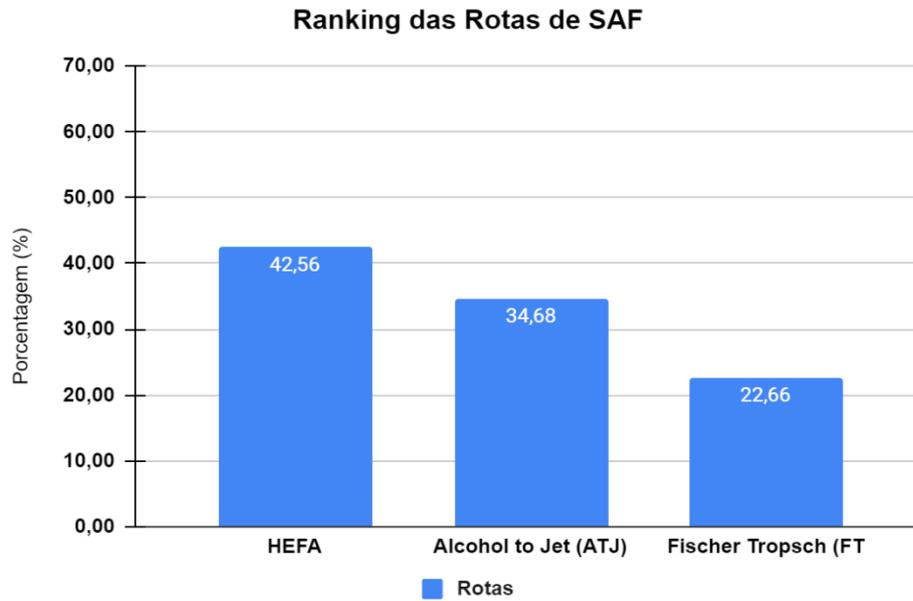


Figura 4: Ranking das melhores rotas tecnológicas para produção de SAF.

Aplicação do Método AHP: Determinação da melhor matéria prima

Após a determinação da rota mais pertinente para produção de SAF, com base nos critérios pré-estabelecidos, outra análise foi feita para determinar a melhor matéria prima para produção deste biocombustível. A matriz de decisão utilizada está especificada na Tabela 10.

Figura 10: Matriz de decisão para determinar a melhor matéria prima

	Tonelada De Produção	Valor (US\$/tonelada)	Acidez do Óleo (mg de KOH/g)	Período de colheita (sazonalidade e-meses)	Volume de Água no Cultivo (mm)
Tonelada De Produção	1	3	2	2	4
Valor (US\$/tonelada)	0,333	1	4	2	3
Acidez do Óleo (mg de KOH/g)	0,500	0,250	1	1	1
Período de colheita (sazonalidade-meses)	0,500	0,500	1	1	4
Volume de Água no Cultivo (mm)	0,500	0,333	1	0,250	1
Somatório Σ Total	2,583	5,083	9	6,250	13

Logo, os valores de vetor prioridade, lambda, índice de consistência e razão de consistência, foram expostos nas Tabelas 11 e 12. Portanto, assim como demonstrado no primeiro caso analisado, o índice a razão de consistência deu menor que 10%, comprovando que o decisor fez uma comparação paritária legal, validando o estabelecimento dos pesos dos critérios.

Tabela 11: Vetor Prioridade da análise

Vetor Prioridade
0,365
0,264
0,118
0,174
0,078



Tabela 12: Resultados as análises pelo Office Excel

Valor de Lambda Máx (γ máx)	5,393
Índice Randômico (IR – N=5)	1,120
Índice de Consistência (IC)	0,0983
Razão de Consistência (RC)	0,0878

Ademais, na Tabela 13, é demonstrado a matriz quantitativa com valores da literatura.

Tabela 13: Matriz quantitativa com valores da literatura

	Tonelada De Produção	Valor (US\$/tonelada)	Acidez do Óleo (mg de KOH/g)	Período de colheita (sazonalidade-meses)	Volume de Água no Cultivo (mm)
Soja	67.860.000	243,90	1,71	3	650
Palma	1.292.713	62,00	57,45	4	1750
Mamona	24.800	604,90	12,33	3	700
Amendoim	232.200	184,80	2,00	3	648

Por fim, após as fases de normalização da matriz de decisão quantitativa, obteve-se os dados da Tabela 14.

Tabela 14: Matriz normalizada de decisão

	Tonelada De Produção	Valor (US\$/tonelada)	Acidez do Óleo (mg de KOH/g)	Período de colheita (sazonalidade-meses)	Volume de Água no Cultivo (mm)
Soja	0,978	0,1874	0,856	0,30	0,435
Palma	0,0186	0,7371	0,025	0,40	0,161
Mamona	0,0004	0,0755	0,119	0,30	0,404
Amendoim	0,0033	0,2473	0,732	0,30	0,436

Desta forma, a pesquisa operacional do método AHP determinou o ranking das matérias primas mais adequadas para produção deste biocombustível (figura 5). Portanto, estabelece que a Soja é a biomassa mais promissora para produção de SAF através da tecnologia HEFA.

Ranking das Biomassas para Produção de SAF

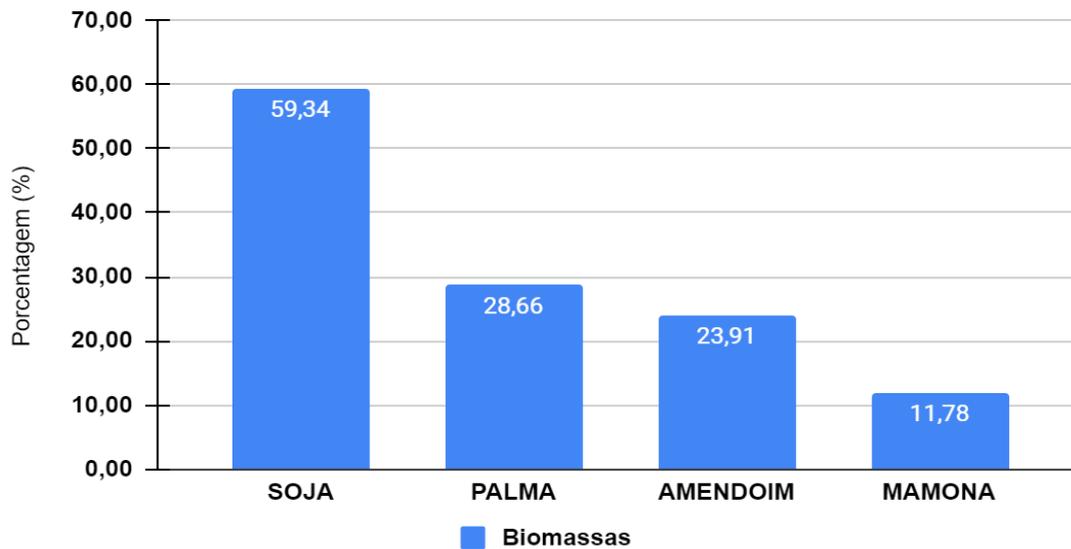


Figura 5: Ranking das melhores matérias primas para produção de SAF por HEFA.

Considerações Finais

A adoção do SAF pode ser um fator determinante para contribuir com as metas de diminuir a emissão de gases de efeito estufa (GEE) estabelecidas pela ICAO, pela COP26 e pelo acordo de Paris. Além dos objetivos pré-estabelecidos, a emergência desse novo biocombustível para aviação, tem como potencial reduzir a pegada de carbono e cumprir os acordos internacionais estimulando o avanço ambiental.

Logo, com base no estado da arte sobre a situação do SAF no Brasil, foi possível determinar através do método de tomada de decisão AHP (Analytic Hierarchy Process), que a rota tecnológica de produção mais adequada para o país é a HEFA com 42,56% de adesão no Brasil, seguindo da ATJ com 34,68% e, por fim, a FT com 22,66%. Tais determinações foram obtidas com base nos critérios pré-estabelecidos na fundamentação teórica deste trabalho.

Foram identificadas, inicialmente neste estudo preliminar, algumas das matérias primas brasileiras apropriadas para produção de SAF pela rota HEFA. Seguindo a decisão para produção de forma decrescente, os resultados foram: o óleo de Soja com 59,34%, o óleo de Palma com 28,66%, o óleo de Amendoim com 23,91%, e por fim o óleo de Mamona com 11,78%. Vale ressaltar que esse resultado considerado principalmente o fator da disponibilidade da produção em larga escala das culturas, sendo a soja a principal oleaginosa de produção mundial, mas é importante reforçar os impactos da competição com a alimentação humana, o despertar para a importância fundamental de investimentos em P&D&I em outras culturas que favoreçam o desenvolvimento de novas oleaginosas em outras regiões do país, notadamente em áreas degradadas ou em risco ambiental.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia (PEI). O estudo foi financeiramente suportado também pelos projetos INCITERE, PIE0008/22 (FAPESB) e CATSAF, 405744/2022-6 (CNPq).

Referências Bibliográficas

Ahmad, S; Ouenniche, J.; Kolosz, B. W.; Greening, P. A.; Andresen, J. M.; Valer, M.M.; Xu, B.; 2021. A stakeholders' participatory approach to multi-criteria assessment of sustainable aviation fuels production pathways. *International Journal of Production Economics*. v.238, 108156.

Batten, R.; Galant, O.; Karanjikar, M.; Spatari, S.; 2023. Meeting sustainable aviation fuel policy targets through first generation corn biorefineries. *Fuel*; v.333, p.1.

Dahal, K.; Brynof, S.; Xisto, C.; Hansson, J.; Grahn, M.; Gronstedt, T.; Lehtveer, M.; 2021. Techno-economic review of alternative fuels and propulsion systems for the aviation sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; v.151.

Detsios, N. Theodoraki, S. Maragoudaki, L. Atsonios, K. Grammelis, P. Orfanoudakis, N. G.; 2023. Recent Advances on Alternative Aviation Fuels/Pathways: A Critical Review. *Energies*. v.16.



- Eswaeen, S.; Subramaniam, S.; Geleyense, S.; Brandt, K.; Wolcott, M.; Zhang, X.; 2021. Techno-economic analysis of catalytic hydrothermolysis pathway for jet fuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; v.15.
- Fredsgaard, M.; Hulkko, L. S. S.; Chaturvedi, T.; 2021. Process simulation and techno-economic assessment of *Salicornia* sp. based jet fuel refinery through *Hermetia illucens* sugars-to-lipids conversion and HEFA route. *Biomass and Bioenergy*; v.150.
- Golic, K.; Kosić, T.; Kosorić V.; 2023. AHP-Based Model for Energy-Sustainable Renovation of Building Envelopes: A Case Study. *Sustainability*. v. 15, p.10, 8384.
- Julio, A. A. V.; Batlle, E. A. O.; Trindade, A. B.; Nebra, S. A.; Reyes, A. M. M.; Palacio, J. C. E. P.; 2021. Energy, exergy, exergoeconomic, and environmental assessment of different technologies in the production of bio-jet fuel by palm oil biorefineries. *Energy Conversion and Management*; v. 243, 114393.
- Monte, D. M.; Cruz, P. L.; Dufour, J.; 2022. SAF production from camelina oil hydrotreatment: A techno-economic assessment of alternative process configurations. *Fuel*; v.324.
- Rajasekar, R.; Naveenchandran, P.; 2021. Performance and emission analysis of di diesel engine fuelled by biodiesel with Al₂O₃ nano additives. *Materialstoday Proceedings*; v. 47, p. 345-350.
- Seber, G.; Escobar, N.; Valin, H.; Malina, R.; 2022. Uncertainty in life cycle greenhouse gas emissions of sustainable aviation fuels from vegetable oils. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; v.170.
- Saaty, T. L.; 1991. *Método de Análise Hierárquica, Tradução de Wainer da Silveira e Silva*, McGraw-Hill, Makron, São Paulo, SP.
- Saaty, T. L., 2005. The Analytic Hierarchy and Analytic Network Processes for the measurement of intangible criteria and for decision-making, em Figueira, J., Greco S. e Ehrgott, M. *Multiple Criteria Decision Analysis: state of the art surveys*, Springer Science+Business Media, New York, pp.345-408.
- Shahrair, M. F.; Khanal, A.; 2022. The current techno-economic, environmental, policy status and perspectives of sustainable aviation fuel (SAF). *Fuel*; v.325, 124905.
- Shaban, I. A.; Eltoukhy, A. E. E.; Zayed, T.; 2023. Systematic and scientometric analyses of predictors for modelling water pipes deterioration. *Automation in Construction*; v.149, 104710.
- Siew, K. N.; Farooq, D.; Yang, A.; 2021. Global biorenewable development strategies for sustainable aviation fuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; v.150.
- Souza, L. M.; Mendes, P. A.S.; Aranda, D.A.G.; 2020. Oleaginous feedstocks for hydro-processed esters and fatty acids (HEFA) biojet production in southeastern Brazil: A multi-criteria decision analysis. *Renewable Energy*; v.149, p. 1339-1351.
- Sudalaiyandi, K ; Karthick, A.; Vignesh, K.R.; Manoj, P.V.J.; Madhu, P.; 2021. Performance and emission characteristics of diesel engine fueled with ternary blends of linseed and rubber seed oil biodiesel. *Fuel*; v.285, 119255.
- Umenweke, G. C.; Pace, R. B.; Jimenez, S. E.; Okolie, J. A.; 2023. Techno-economic and life-cycle analyses of sustainable aviation fuel production via integrated catalytic deoxygenation and hydrothermal gasification. *Chemical Engineering Journal*; v. 452, p.2.
- Wang, Z.; Feser, J.S.; Lei, T.; Gupta, A.K.; 2020. Performance and emissions of camelina oil derived jet fuel blends under distributed combustion condition. *Fuel*; v.271, 117685.
- Wei, H.; Liu, W.; Chen, X.; Yang, Q.; Li, J.; Chen, H.; 2019. Renewable bio-jet fuel production for aviation: A review. *Fuel*; v. 254.
- Why, E. S. K.; Ong, H. C. H.; Lee, H. V.; Chen, Y. Y. G.; Chen, W. H.; Chong, C. T.; 2019. Renewable aviation fuel by advanced hydroprocessing of biomass: Challenges and perspective. *Energy Conversion and Management*. v.199, 112015.

ÁREA TEMÁTICA 5

ESTUDOS
MORFOLÓGICOS
FLUVIAIS E COSTEIROS



3º CONGRESSO INTERNACIONAL DE
**ENGENHARIA
AMBIENTAL**



SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE CORRENTE DE TURBIDEZ, EM CONFIGURAÇÃO AXISSIMÉTRICA

1Sara Mata, 2Karina Ruschel

1 LaSET-PUCRS, e-mail: sara.sosa85@edu.pucrs.br; 2 LaSET-PUCRS, e-mail: karina.ruschel@pucrs.br

Palavras-chave: correntes de turbidez; configuração axissimétrica; depósito.

Resumo

Correntes de turbidez são fluxos gravitacionais formados por variações entre a massa específica da corrente e o fluido ambiente. Na medida em que estas correntes se propagam, formam depósitos gerados pela deposição das partículas em suspensão. Neste estudo, a corrente de turbidez, em configuração axissimétrica, é simulada numericamente usando a metodologia numérica implícita de Grandes Escalas (iLES), implementada no código computacional aberto Xcompact. Considera-se o número de Reynolds $Re=8430$, o número de Schmidt $Sc=1$ e a velocidade de sedimentação adimensional $u_s=0,02$, relacionada às partículas do tipo silte grosso. A curva da posição da frente da corrente de turbidez revela a dinâmica da propagação, mostrando regimes de aceleração, velocidade constante e desaceleração. A forma do depósito mostra simetria azimutal. A altura do depósito diminui conforme aumenta a distância na posição inicial, e mostra máximos locais ou acúmulos de deposição em posições relacionadas com as transições entre os regimes. A tensão de cisalhamento mostra valores máximos na formação de um anel interno devido à separação da corrente de turbidez. Na simulação, se observa a formação de estruturas turbulentas do tipo Kelvin-Helmholtz na frente da corrente de turbidez que podem estar relacionadas aos acúmulos de deposição.

Introdução

As correntes de densidade são fluxos gravitacionais originados por uma diferença de massa específica entre o fluido da corrente e o ambiente, devido à salinidade, temperatura ou partículas em suspensão. No oceano, as correntes de densidade, chamadas de correntes de turbidez na presença de partículas em suspensão, são impulsionadas por deslizamentos subaquáticos, na plataforma continental ou na desembocadura dos rios, sendo os responsáveis pelo transporte de sedimentos a distâncias abissais (Mulder e Alexander, 2001), onde se formam os depósitos sedimentares.

Existem modelos matemáticos que descrevem os mecanismos de transporte de sedimentos e deposição, em base das estruturas turbulentas e da velocidade de propagação das correntes de turbidez medidas em campo em vários locais do mundo (Kuenen e Menard, 1952, Azpiroz-Zabala et al, 2017, Dorrel, 2015). Porém, ainda se sabe pouco sobre a natureza e as propriedades das correntes de turbidez naturais devido à dificuldade de medir a concentração de sedimentos em escala de campo (Talling et al, 2015).

Experimentos desenvolvidos no laboratório representa a dinâmica do fenômeno em escala menor. Um exemplo canônico, de volume inicial fixo (Simpson, 1997, Boncazze, 1995, Ross, 2002), consiste na liberação de um fluido denso num fluido ambiente menos denso em estado estacionário, submerso num reservatório fechado.

Neste sentido, a modelagem numérica tridimensional, altamente resolvida (Härtel et al, 2000, Cantero et al, 2007, Espath et al, 2013, Zgheib et al, 2015, Frantz et al, 2021, Farenzena, 2022), reproduz as grandezas físicas fornecidas por experimentos, adicionando assim informação que não é possível registrar com instrumentos de medição, como as estruturas turbulentas presentes na interfase entre a corrente e o fluido ambiente (Kneller et al, 1997, Francisco et al, 2017, Dai e Huang, 2022, Vianna et al, 2022).

A configuração axissimétrica, caracterizada pela altura e raio do volume inicial em propagação não confinada, caracterizam situações como os deslizamentos de terra ou dragagem, onde é interessante conhecer a relação entre o volume de fluido liberado e a extensão do depósito consequente. Zgheib et al. (2015) observaram que o formato da seção transversal horizontal da liberação inicial é um fator importante que influencia fortemente na dinâmica de propagação da corrente. A partir de experimentos e simulações numéricas diretas, eles observaram forte dependência na extensão do depósito.

Baseado nesse estudo, o propósito deste trabalho é verificar os resultados encontrados no âmbito da extensão do depósito e estudar a relação entre os acúmulos do depósito e a dinâmica das estruturas turbulentas.

Metodologia

A propagação das correntes de turbidez pode ser descrita matematicamente através das equações incompressíveis de Navier-Stokes, sob a aproximação de Boussinesq e a equação de transporte escalar. A aproximação de Boussinesq sugere que as variações da densidade estão apenas associadas com as forças de empuxo, sem tomar em consideração a interação entre as partículas devido à baixa concentração de partículas em suspensão.

Inicialmente, a massa específica ρ_1 encontra-se confinada no cilindro de altura L_2 e raio r_0 , separado do fluido ambiente ρ_0 por uma barreira (Figura 1).

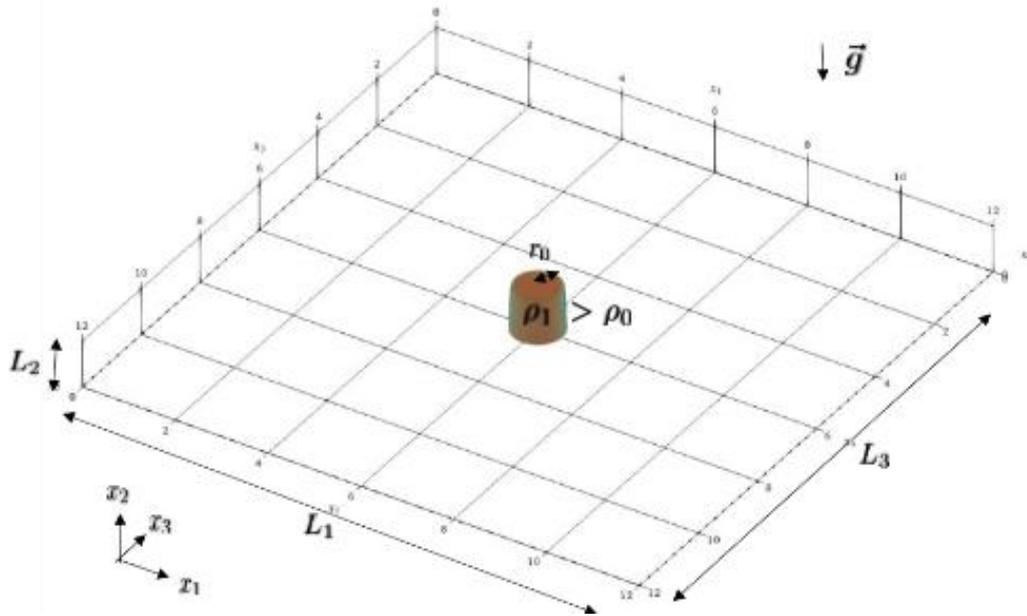


Figura 1: Configuração inicial do problema.

A forma adimensional das equações governantes, escrevem-se da forma:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \varphi \delta_{i2}$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + (u_j + u_s \hat{e}_2) \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} = \frac{1}{ReSc} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_j \partial x_j} \quad (1)$$

onde u_i , P e φ representam o campo de velocidade, a pressão e a concentração, respectivamente, no domínio espacial x_i e temporal t . As quantidades Re e Sc referem-se aos números adimensionais de Reynolds e Schmidt, escritos como:

$$Re = \frac{u_b H}{\nu}$$

$$Sc = \frac{\nu}{\kappa} \quad (2)$$

sendo ν a viscosidade cinemática e κ a difusividade mássica. u_b e $H=L_2$ é a velocidade e a altura característica, respectivamente, definida da forma seguinte:

$$u_b = \sqrt{\frac{\rho_1 - \rho_0}{\rho_0} g H} \quad (3)$$

com ρ_1 e ρ_0 as massas específicas da corrente e do fluido ambiente, g é a aceleração da gravidade atuando na direção vertical. A quantidade u_s é a velocidade de sedimentação adimensional das partículas suspensas, definida como:

$$u_s = \frac{\tilde{u}_s}{u_b} \quad (4)$$



Considera-se a velocidade de sedimentação dimensional \tilde{u}_s definida segundo Ferguson e Church (2004), como:

$$\tilde{u}_s = \frac{\frac{\rho_p - \rho_0}{\rho_0} g d_p^2}{18\nu + \left(\frac{3}{4} \frac{\rho_p - \rho_0}{\rho_0} g d_p^3 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (5)$$

onde d_p e ρ_p é o diâmetro e a massa específica da partícula.

Método numérico

Com a finalidade de resolver as equações governantes, mostradas em (1), foi usado o código computacional aberto Xcompact3D, baseado no esquema compacto de diferenças finitas de sexta ordem na discretização espacial e na integração temporal utiliza o esquema Adams-Bashforth de terceira ordem. Para garantir a condição de incompressibilidade, é utilizado um método de passo fracionário, exigindo a solução de uma equação de Poisson para a pressão. A malha de pressão é deslocada em meia malha em relação à malha de velocidade em cada direção. A equação de Poisson é totalmente resolvida no espaço espectral usando a transformada rápida de Fourier (FFT) (Bartholomew et al., 2020). Nas etapas de pós-processamento, se implementam as livrarias do projeto Sandbox (Schuch et al. (2020)) que envolve derivadas centradas de quarta ordem e o método de Simpson na integração, para estruturas de dados do tipo Xarray (Hoyer e Hamman (2017)), desenvolvidos em Python.

As condições de contorno estabelecidas para o campo de velocidade nos contornos laterais $x_1 = 0$ e $x_1 = L_1$, $x_3 = 0$ e $x_3 = L_3$ e no topo $x_2 = L_2$ é de deslizamento livre para evitar o desenvolvimento de tensões de cisalhamento. No fundo, $x_2 = 0$ segue a condição de não-deslizamento. Para o campo de concentração, as condições de contorno devem assegurar que nenhum contorno tenha fluxo, por tanto, para os contornos $x_1 = 0$ e $x_1 = L_1$, $x_3 = 0$ e $x_3 = L_3$ e $x_2 = L_2$, a condição é de fluxo nulo. Na condição do fundo, o depósito de partículas é descrito, por meio de uma condição de contorno que segue a equação:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} - u_s \frac{\partial \varphi}{\partial x_2} = 0 \quad (6)$$

A simulação numérica realizada neste trabalho considera o domínio de cálculo adimensional $L_1 \times L_2 \times L_3 = (12 \times 1 \times 12)$, o qual é discretizado em uma malha computacional cartesiana com $577 \times 129 \times 577$ pontos, ao longo das três direções principais. A concentração inicial é confinada no volume cilíndrico adimensional de raio $r_0 = 0,5$ y altura $H=1$. Adota-se um passo de tempo igual a $\Delta t = 5 \times 10^{-4}$, resultando em um tempo final de simulação igual a 40 unidades adimensionais. Os números adimensionais considerados adequam-se à simulação 1 apresentada em Zgheib et al. (2015). Os parâmetros do caso referido são o número de Reynolds $Re = 8430$ e o número de Schmidt $Sc = 1$. A velocidade de sedimentação adimensional é 0,02, que pode estar relacionada a um diâmetro de partícula de 45 μm , sendo do tipo silte grosso (Julien, 2002).

A metodologia numérica implícita de Grandes Escalas (iLES), foi usada na simulação. Esta estratégia chamada de viscosidade turbulenta espectral aporta dissipação artificial nas pequenas escalas da turbulência em analogia com o comportamento do modelo sub-malha usado nas simulações de grandes escalas (LES) (Lamballais et al., 2011, Dairay et al., 2017).

Resultados e Discussão

A dinâmica da propagação e o depósito subsequente de uma corrente de turbidez, pode ser caracterizada por grandezas como a posição da frente, mapa do depósito e tensão de cisalhamento.

A posição da frente de uma corrente de turbidez é calculada a partir da espessura média da corrente (Ellison e Turner, 1959). Nesta configuração, a média é azimutal. Se considera a frente da corrente na posição do mínimo local (Farenzena e Silvestrini, 2022).

Na Figura 2, mostra-se a curva da posição da frente em função do tempo, onde é possível caracterizar a dinâmica de propagação. Do tempo inicial ao tempo adimensional $t=3$, se observa uma fase de aceleração, relacionado ao processo de formação da estrutura da corrente desde a saída da barreira. Depois, no intervalo $3 < t < 10$, a corrente atravessa uma fase de velocidade constante, caracterizada pelo desenvolvimento da turbulência. Seguidamente, observa-se uma fase de desaceleração, que poderia estar relacionado com a perda de carga, devido à turbulência, na fase anterior. Finalmente, depois do tempo $t > 25$, a posição da frente tende a um valor constante, $r_f = 3.9$, que indica a extinção da corrente de turbidez, portanto, poderia se considerar esta posição como o alcance da corrente.

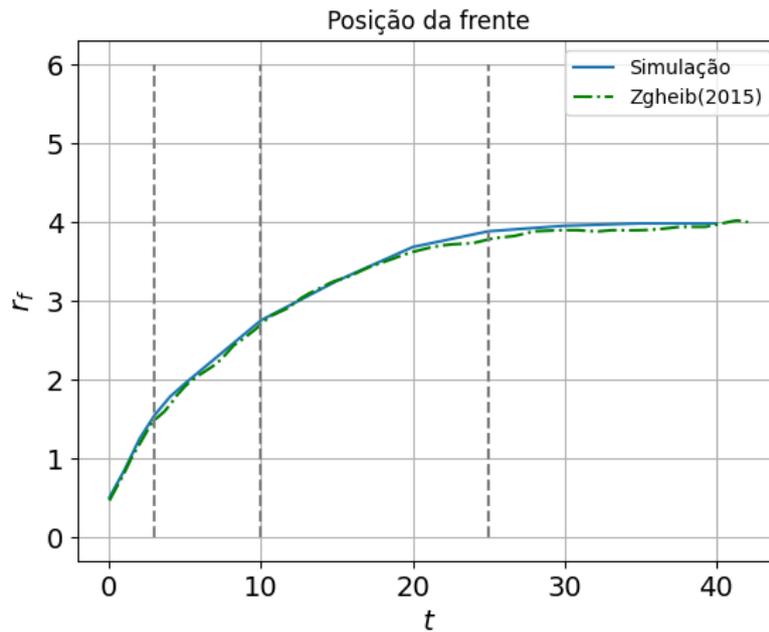


Figura 2: Evolução temporal da posição da frente da corrente de turbidez. Destacam-se os tempos aprox. de transição entre as fases de propagação.

Neste gráfico, da posição da frente é possível observar uma boa concordância com a curva de referência para a maioria do tempo, portanto, podemos considerar que a simulação representa a evolução radial da corrente de turbidez.

As correntes de turbidez formam depósitos devido à sedimentação das partículas ao longo da propagação da corrente. Esta perda de carga dissipa a corrente até a sua extinção. O padrão de deposição de sedimentos pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$D_p = \int_0^t u_s \varphi(x_1, x_2, t) \Big|_{x_2=0} dt \quad (7)$$

que representa o acúmulo da concentração no fundo do domínio vezes a velocidade de sedimentação das partículas, u_s , integrado no tempo.

A Figura 3 mostra o mapa de depósito da simulação (direita), em comparação com o mapa de depósito da referência (esquerda). O padrão de deposição mostra uma dependência do volume inicial, tendo uma propagação aproximadamente radial, independente do azimute. A altura do depósito é maior no centro do domínio e diminui radialmente. Na posição $r=1,3$, observa-se um máximo local, que representa um anel de sedimentos acumulados. A figura 4 mostra a média azimutal do depósito, representando a altura do depósito no eixo da ordenada e a dimensão radial no eixo das abscissas. Neste gráfico é possível observar a concordância com a curva da referência. Ambas as curvas mostram máximos locais nas posições $r = 1,3$ e $2,8$. Estas posições coincidem com as transições entre fases de propagação observadas na curva da posição da frente, associadas os tempos $t = 3,5$ e $t = 10$, aproximadamente (figura 2).

Em Zgheib (2015) atribuem o segundo máximo de deposição à formação de um anel interior, que se propaga radialmente ao centro do domínio, devido à separação da corrente de turbidez, causada por um gradiente adverso de pressão. Esta observação, foi examinada neste trabalho e caracterizada através da análise da tensão de cisalhamento.

A tensão de cisalhamento na parede desempenha um papel crucial na erosão, transporte e deposição de sedimentos em sistemas naturais e de engenharia. Neste estudo, não se considera o processo de erosão e ressuspensão. A tensão de cisalhamento é proporcional ao gradiente de velocidade, no fundo do escoamento, da seguinte forma,

$$\tau_f = \frac{1}{Re} \frac{\partial u_r}{\partial x_2} \Big|_{x_2=0}, \quad (8)$$

sendo u_r a componente horizontal adimensional da velocidade na direção radial, no fundo do domínio.

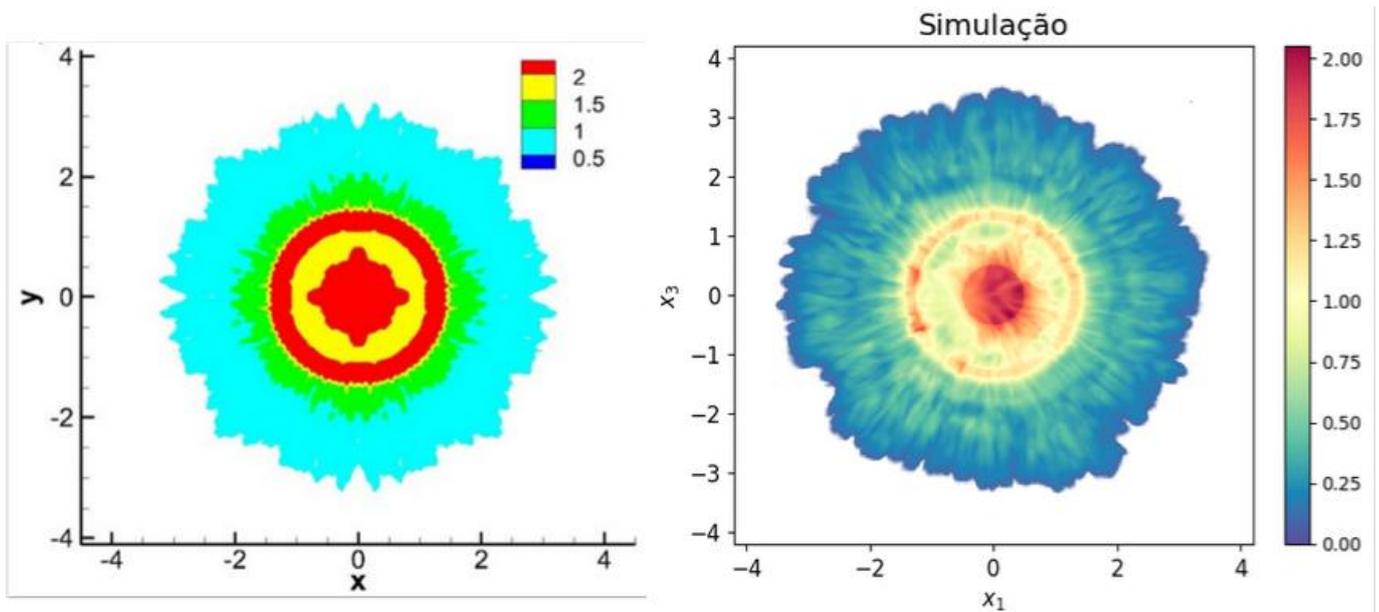


Figura 3: Comparação dos mapas do depósito.

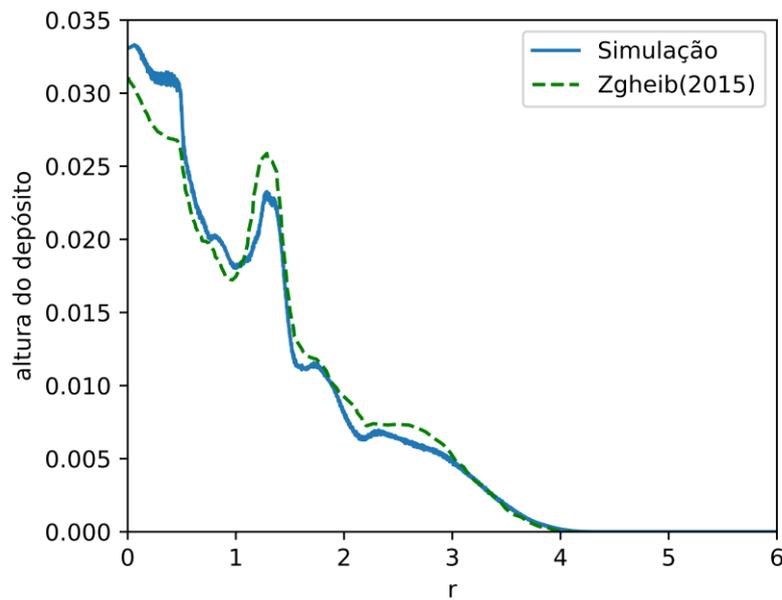


Figura 4: Comparação da altura do depósito.

Na figura 5(a), podem-se observar contornos de tensão de cisalhamento máximo nas posições $r=1,5$; $r=1$ e no centro do domínio computacional, no tempo $t=3,5$. Depois, na figura 5(b), mostra-se o campo de concentração Φ , no plano x_1x_2 , em $x_3 = 6$ (plano que passa no centro do domínio), onde é possível observar as estruturas turbulentas do tipo Kelvin-Helmholtz (K-H), na frente da corrente e no corpo, também avistadas na figura 5(c) onde se mostra o isocontorno $Q=1$, do critério Q , que representa as estruturas turbulentas neste tempo $t=3,5$. Entre os dois maiores vórtices K-H é possível identificar uma região de concentração nula que coincide com a posição da região de tensão de cisalhamento máximo, em $r=1,5$. Essas tensões de cisalhamento podem estar relacionadas aos tubos de vórtice, que provavelmente geram os acúmulos de deposição, observados na figura 4.

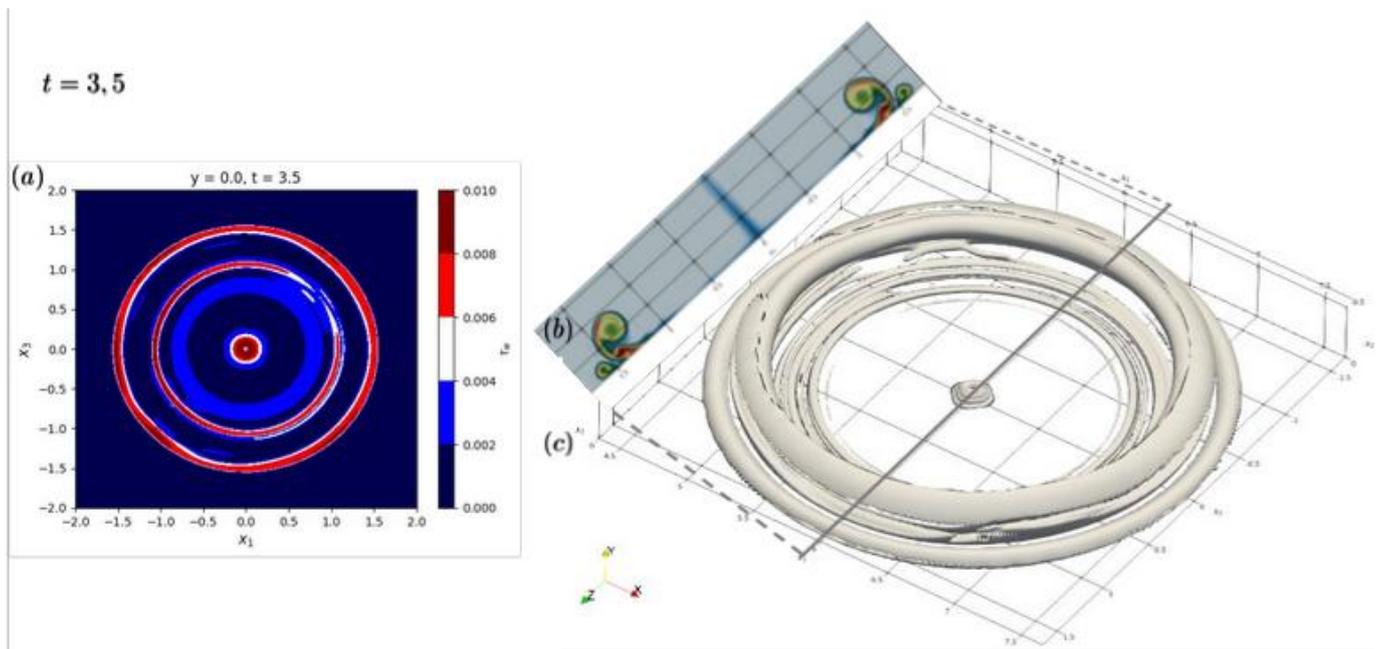


Figura 5: (a) Tensão de cisalhamento da corrente de turbidez, no tempo $t=3,5$ (b) Campo de Concentração. (c) Isocontorno, $Q=1$, do Critério Q.

Comentários finais.

Corrente de turbidez, em configuração axissimétrica, foi simulada numericamente com a finalidade de analisar a relação entre as estruturas turbulentas e o depósito formado. Considerou-se o número de Reynolds $Re=8450$. A curva de posição da frente revela a dinâmica da propagação da corrente de turbidez, mostrando quatro regimes, ao longo do tempo. A partir do tempo $t=25$, a corrente de turbidez alcança sua posição final, onde pode se dizer que a corrente tem-se dissipado. O mapa do depósito mostra simetria azimutal. A curva de altura do depósito diminui radialmente e mostra máximos locais em duas posições específicas ($r=1,3$ e $r=2,8$), que coincidem com os tempos de transição ($t=3,5$ e $t=10$) entre os regimes da dinâmica da propagação caracterizada na curva da posição da frente. No tempo $t=3,5$, a tensão de cisalhamento mostra-se máxima entre os maiores vórtices de Kelvin-Helmholtz, onde se revela a separação da corrente de turbidez, na figura do critério Q. Os acúmulos de deposição podem-se relacionar ao processo de formação e desenvolvimento dos vórtices de Kelvin-Helmholtz, sendo este o mecanismo responsável da mistura entre os fluidos.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Laboratório de Alto Desempenho (LAD) da PUCRS, por fornecer os recursos do supercomputador para os resultados das simulações numéricas relatadas neste estudo. Os autores agradecem à Petrobras pelo financiamento desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

Azpiroz-Zabala, M; Cartigny, M.J; Talling, P.J; Parsons, D.R; Sumner, E.J; Clare, M.A; Simmons, S.M; Cooper, C; Pope, E.L. 2017. Newly recognized turbidity current structure can explain prolonged flushing of submarine canyons. Science advances, Vol. 3, No. 10, p. e1700200.

Bartholomew, P; Deskos, G; Frantz, R.A; Schuch, F.N; Lamballais, E.; Laizet, S., 2020. Xcompact3d: An open-source framework for solving turbulence problems on a cartesian mesh. SoftwareX, Vol. 12, p. 100550.

Bonnecaze, R.T; Huppert, H.E; Lister, J.R. 1996. Patterns of sedimentation from polydispersed turbidity currents. Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol. 452, No. 1953, pp. 2247–2261.

Cantero, M.I; Lee, J.R; Balachandar, S.; García, M.H. 2007. On the front velocity of gravity currents. J. Fluid Mech., Vol. 586, pp. 1–39.

Dai, A.; Huang, Y.L., 2022. On the merging and splitting processes in the lobe-and-cleft structure at a gravity current head. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 930, p. A6.

Dairay, T; Lamballais, E; Laizet, S; Vassilicos, J.C. 2017. Numerical dissipation vs. subgrid-scale modelling for



- large eddy simulation. *Journal of Computational Physics*, Vol. 337, pp. 252–274.
- Dorrell, R.M; Burns, A.D; McCaffrey, W.D. 2015. The inherent instability of leveed seafloor channels. *Geophysical Research Letters*, Vol. 42, No. 10, pp. 4023–4031.
- Espath, L.F.R; Pinto, L.C; Laizet, S; Silvestrini, J.H. 2014. Two-and three-dimensional direct numerical simulation of particle-laden gravity currents. *Computers & Geosciences*, Vol. 63, pp. 9–16.
- Farenzena, B; Silvestrini, J. 2022. Density currents front velocity uncertainty. *Computers and Fluids*, Vol. 232.
- Ferguson, R.I.; Church, M. 2004. A simple universal equation for grain settling velocity. *Journal of sedimentary Research*, Vol. 74, No. 6, pp. 933–937.
- Francisco, E.P., Espath, L.F.R., Laizet, S. and Silvestrini, J.H. 2018. “Reynolds number and settling velocity influence for finite-release particle-laden gravity currents in a basin”. *Computers & Geosciences*, Vol. 110, pp. 1–9.
- Frantz, R.A; Deskos, G; Laizet, S; Silvestrini, J.H. 2021. High-fidelity simulations of gravity currents using a high-order finite-difference spectral vanishing viscosity approach. *Computers & Fluids*, Vol. 221, p. 104902.
- Härtel, C; Meiburg, E; Necker, F. 2000. Analysis and direct numerical simulation of the flow at a gravity-current head. part 1. flow topology and front speed for slip and no-slip boundaries. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 418, pp. 189–212.
- Hoyer S; Hamman J. 2017. Xarray: N-D labeled arrays and datasets in Python, *Journal of Open Research Software*, vol. 5.
- Julien, P.Y. 2002. *River mechanics*. Cambridge University Press.
- Kneller, B.C; Bennett, S.J; McCaffrey, W.D. 1999. Velocity structure, turbulence and fluid stresses in experimental gravity currents. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, No. C3, pp. 5381–5391.
- Kuenen, P.H; Menard, H.W. 1952. Turbidity currents, graded and non-graded deposits. *Journal of Sedimentary Research*, Vol. 22, No. 2.
- Lamballais, E; Fortuné, V; Laizet, S. 2011. Straightforward high-order numerical dissipation via the viscous term for direct and large eddy simulation. *Journal of Computational Physics*, Vol. 230, No. 9, pp. 3270–3275.
- Mulder, T; Alexander, J. 2001. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits. *Sedimentology*, Vol. 48, No. 2, pp. 269–299.
- Ross, A.N; Linden, P.F.; Dalziel, S.B. 2002. A study of three-dimensional gravity currents on a uniform slope. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 453, pp. 239 – 261.
- Schuch F. N; Vianna F. D; Mombach A., Silvestrini J. H. 2020. A Jupyter sandbox environment coupled into the high-order Navier-Stokes solver Xcompact3d. *JupyterCon 2020*.
- Simpson, J.E., 1999. *Gravity currents: In the environment and the laboratory*. Cambridge university press.
- Talling, P.J; Allin, J; Armitage, D.A; Arnott, R.W.C; Cartigny, M.J.B; Clare, M.A; Felletti, F; Covault, J.A; Girardclos, S; Hansen, E. 2015. Key future directions for research on turbidity currents and their deposits. *Journal of Sedimentary Research*, Vol. 85, No. 2, pp. 153–169.
- Vianna, F; Farenzena, B; Pinho, M; Silvestrini, J. 2022. Spatio-temporal flow features in gravity currents using computer vision methods. *Computers Geosciences*, Vol. 165, p. 105-146.
- Zgheib, N; Bonometti, T; Balachandar, S. 2015. Propagation and deposition of non-circular finite release particle-laden currents. *Physics of Fluids*. 27 (8): 086604.



APLICAÇÃO DO MODELO *DRIFTFLUXFOAM* PARA A MODELAGEM DE CORRENTES DE TURBIDEZ EM CONFIGURAÇÃO NÃO-CONFINADA: VALIDAÇÕES BASEADAS NAS METODOLOGIAS RANS E LES

1Guilherme Fuhrmeister Vargas, 2Bruno Alvarez Scapin, 3Sara Maria Mata Sosa, 4Karina Ruschel

1 Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), e-mail: guilhermef.engenharia@gmail.com; 2 Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), e-mail: bruno.scapin@hotmail.com; 3 Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), e-mail: sara.sosa85@edu.pucrs.br; 4 Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), e-mail: karina.ruschel@pucrs.br

Palavras-chave: *Computational Fluid Dynamics*, OpenFOAM, Correntes de Turbidez

Resumo

As correntes de turbidez representam um dos principais mecanismos de transporte de sedimentos observados na natureza. Sua dinâmica envolve uma série de processos complexos, como a sedimentação de partículas, uma intensa mistura, a grande dispersão de estruturas turbulentas e a formação de depósitos sedimentares. A modelagem numérica em *Computational Fluid Dynamics* corresponde a uma das principais ferramentas utilizadas na compreensão e no estudo deste tipo de fenômeno, auxiliando, por exemplo, na compreensão de escoamentos fluviais, sistemas de tratamento de água e esgoto, formação de reservatórios de hidrocarbonetos e no dimensionamento de estruturas de engenharia. Sendo assim, o presente trabalho propõe a aplicação de um modelo baseado nas *drift-flux equations*, por meio do código OpenFOAM, para a representação numérica das correntes de turbidez em uma configuração não-confinada, de maior complexidade e relevância para os problemas de aplicações reais. São utilizados os principais modelos de turbulência baseados nas metodologias LES e RANS, no intuito de avaliar a peculiaridade de cada um deles para a reprodução da dinâmica envolvida, o que é feito por meio da comparação com resultados experimentais presentes na literatura. Ambos os modelos mostraram-se bastante robustos para modelagem das correntes de turbidez na configuração proposta, reproduzindo adequadamente os resultados observados experimentalmente, demonstrando, portanto, o grande potencial do *solver driftFluxFoam* para o estudo e a análise das correntes, colocando-o como uma importante ferramenta numérica para a engenharia.

Introdução

As correntes de gravidade, também denominadas correntes de densidade, representam um tipo de escoamento que ocorre pela diferença de densidade existente entre dois fluidos distintos, o qual é governado pelas forças de empuxo associadas. Neste contexto, diversos fenômenos hidráulicos importantes podem ser observados nesta dinâmica, como a intensa mistura entre os fluidos envolvidos, a expressiva transferência de quantidade de movimento e a geração de vórtices de diversos tamanhos, caracterizando a turbulência associada ao processo. Diversos casos de correntes de densidade podem ser encontrados no âmbito natural, geológico e industrial, como, por exemplo, as correntes observadas no céu durante a formação de grandes tempestades, bem como o transporte de sedimentos dos rios para os oceanos, sendo, neste último caso, denominada corrente de turbidez (Zgheib; Bonometti; Balachandar, 2015).

A maior parte do transporte de sedimentos observados nos rios e oceanos ocorre devido às correntes de turbidez, que, por sua vez, são formadas a partir da mistura do fluido ambiente (água) com material granular (como a areia, o silte e a argila, principalmente), originando uma corrente de densidade associada à sedimentação de partículas. Em razão da sua dinâmica, as correntes de turbidez estão diretamente relacionadas aos processos erosivos e deposicionais, bem como à modificação das formas de fundo dos rios e oceanos, associando-se ainda à formação dos reservatórios de hidrocarbonetos, os quais são de suma importância para a indústria petrolífera (Meiburg; Kneller, 2010; Tallin et al., 2024). Estas correntes geralmente se formam a partir do deslizamento de grandes porções de terra ou do transporte de sedimentos em suspensão em um escoamento contínuo (D'ávila; Paim, 2003), que inicialmente tendem a escoar em uma configuração confinada (ou canalizada) e ao final desembocam em um grande reservatório, como um grande lago ou oceano, mudando a sua dinâmica de propagação, que passa a ser conhecida como configuração aberta (não-confinada ou do tipo bacia). Este processo encontra-se apresentado, de forma esquemática e concisa, na Figura 1.

Nesse contexto, as simulações numéricas em *Computational Fluid Dynamics* (CFD) correspondem a uma das principais ferramentas utilizadas para análise e o estudo das correntes de turbidez em diferentes configurações e disposições, representando de forma razoável a complexa dinâmica associada a estes escoamentos, além de servir como uma ferramenta complementar aos estudos experimentais em laboratórios (Yang et al., 2022). Os principais modelos numéricos utilizados usualmente baseiam-se em abordagens eulerianas complexas, como os modelos multifásicos (geralmente associados a um grande custo computacional envolvido), ou em abordagens mais simplificadas, muitas vezes baseadas nos modelos de águas rasas (de menor custo computacional, porém com menor detalhamento dos campos de escoamento) (Spesivtsev; Sinkov; Osipov, 2013). Estes pontos destacam a necessidade da utilização de modelos numéricos mais robustos, capazes de modelar satisfatoriamente (em termos de



precisão e detalhamento de estruturas) as complexidades das correntes de turbidez, buscando, em contrapartida, uma otimização do custo computacional, permitindo, portanto, a realização de simulações em maiores escalas (representando casos cada vez mais próximos da realidade).

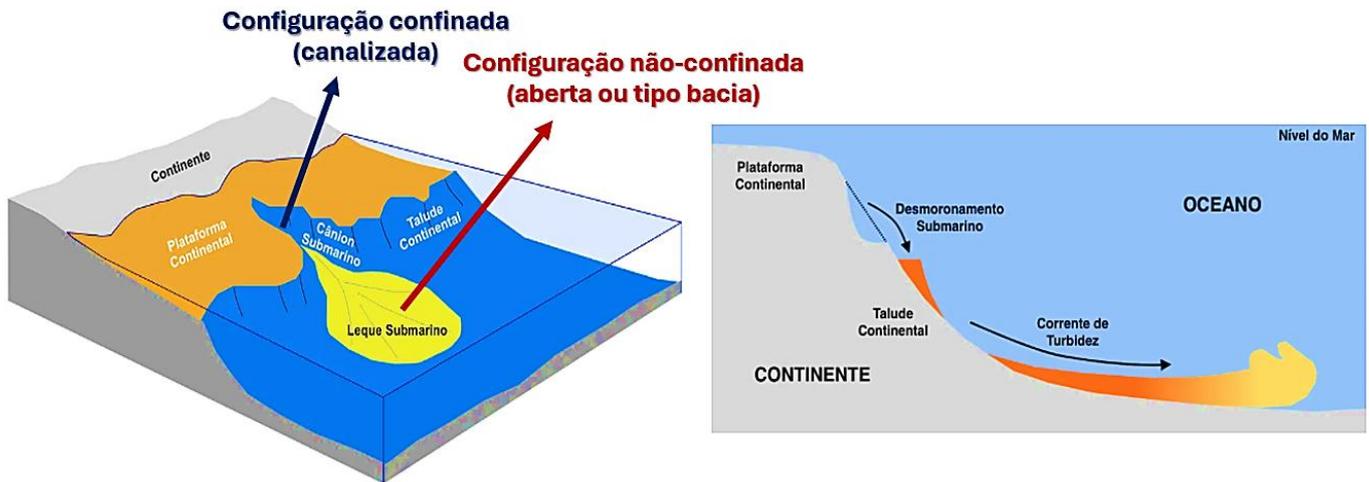


Figura 1: Esquema de formação e propagação de uma corrente de turbidez.
(adaptado de Dominguez; Ribeiro, 2023)

Desta maneira, o presente trabalho tem como proposta aplicar o modelo proposto por Brennan (2001), que consiste na utilização das *drift-flux equations*, onde a mistura de água e sedimentos é interpretada como um único fluido, resultando em uma redução do custo computacional e numa representação suficientemente adequada da dinâmica das correntes de turbidez e de suas complexidades. Por outro lado, existe um número relativamente pequeno de trabalhos associados à aplicação desta metodologia na literatura, bem como do estudo numérico de correntes de turbidez em configurações abertas, representando importantes lacunas a serem preenchidas na área (Abood et al., 2022).

Sendo assim, o objetivo principal deste trabalho consiste em aplicar o modelo *driftFluxFoam* (baseado nas *drift-flux equations*), implementado no código computacional livre e aberto OpenFOAM v.2312 (OpenCFD, 2024), para analisar a dinâmica de uma corrente de turbidez em uma configuração não-confinada, comparando-a com resultados experimentais previamente dispostos na literatura de referência. Da mesma forma, também são comparadas as duas principais metodologias de modelagem da turbulência utilizadas em CFD: as abordagens *Large Eddy Simulation* – LES (que resolve diretamente as maiores escalas de turbulência) e *Reynolds Averaged Navier-Stokes* – RANS (a qual utiliza um modelo matemático para reproduzir o comportamento de todas as escalas turbulentas).

Metodologia Numérica

O solver *driftFluxFoam* pode simular misturas com diferentes concentrações de partículas e velocidades de sedimentação, assim como representar fluxos de fluidos com características Não-Newtonianas, o que possibilita modelar diversos problemas complexos de engenharia. Este modelo está baseado em uma metodologia que modela a mistura de água e sedimentos como uma única fase, representando o escoamento através da definição de uma velocidade relativa entre a mistura e o fluido ambiente. A solução do problema é obtida por meio da aplicação das equações da continuidade e da quantidade de movimento, dadas, respectivamente, pelas seguintes expressões (Yang et al., 2022):

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \bar{\mathbf{u}}_m) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \bar{\mathbf{u}}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \bar{\mathbf{u}}_m \bar{\mathbf{u}}_m) = \nabla \bar{p}_m + \rho_m \mathbf{g} + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau}_{mol} + \boldsymbol{\tau}_{turb}) - \nabla \cdot [\varphi \rho_s \bar{\mathbf{u}}_{sm} \bar{\mathbf{u}}_{sm} + (1 - \varphi) \rho_f \bar{\mathbf{u}}_{fm} \bar{\mathbf{u}}_{fm}], \quad (2)$$

em que em que ρ , t , \mathbf{u} , p , \mathbf{g} , $\boldsymbol{\tau}_{mol}$, $\boldsymbol{\tau}_{turb}$ e φ representam, respectivamente, a massa específica, o tempo, a velocidade, a pressão, a aceleração da gravidade, o tensor de tensões viscosas moleculares, o tensor de tensões viscosas turbulentas e a fração volumétrica de sedimentos. Os índices f , s e m fazem referência, nesta ordem, ao fluido ambiente, à fase sólida e à mistura. A barra superior em alguns termos das equações representa as escalas resolvidas diretamente na metodologia de modelagem da turbulência LES, enquanto, na abordagem RANS, representam os termos médios. Uma descrição bastante detalhada sobre a formulação numérica deste *solver* é apresentada com maior ênfase no trabalho de Yang et al. (2022). Os modelos utilizados no presente trabalho são o de Smagorinsky (Smagorinsky, 1963), para a abordagem LES, e o *Buoyant K - ε* (Gulraiz; Gray, 2021), para a modelagem em RANS.

A velocidade de sedimentação das partículas (u_s) é um dos parâmetros principais de simulação, o qual está diretamente associado ao alcance da corrente e também às características deposicionais da mistura. Esta velocidade, que representa uma



estreita relação com o tamanho característico do grão, pode ser determinada pela equação de Ferguson e Church (2004):

$$u_s = \frac{\left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f}\right) g d_s^2}{18\nu_m + \sqrt{0,3 \cdot g \cdot d_s^3 \cdot \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f}\right)}} \quad (3)$$

onde g , d_s e ν_m correspondem, respectivamente, ao módulo da aceleração da gravidade, ao diâmetro característico dos grãos da mistura e à viscosidade cinemática da mistura.

A altura do depósito (h_d), formado pela sedimentação das partículas, pode ser estimada por meio da integração da fração volumétrica de sedimentos no plano de fundo do domínio ao longo do tempo:

$$h_d = \int k_m \cdot \varphi \cdot u_s dt \quad (4)$$

onde k_m representa um coeficiente de sedimentação da mistura, o qual depende principalmente da massa específica de sedimentos e do fluido ambiente, bem como da concentração de sedimentos presentes na mistura.

O domínio de estudo utilizado nas simulações deste trabalho está diretamente alinhado com o objetivo de verificar a eficiência do *solver driftFluxFoam* na representação da dinâmica de uma corrente de turbidez em uma configuração aberta. Para conformar esta análise, utilizou-se como referência o trabalho experimental de Luthi (1981), o qual consiste em uma modelagem física de uma corrente de turbidez (originada a partir do bombeamento contínuo de uma mistura de água e sedimento) que se propaga em uma bacia de fundo inclinado, com, aproximadamente, 10 m de extensão e 7 m de largura. Visando representar a dinâmica da corrente de maneira mais fiel e semelhante ao referido experimento em laboratório, testaram-se diversas condições de entrada da mistura no domínio. Após uma série de testes preliminares, observou-se que a corrente de fluxo contínuo é melhor representada a partir de um reservatório inicial (de concentração volumétrica definida), alimentado superiormente. A Figura 2 mostra, de forma esquemática, o domínio de estudo, junto de suas dimensões, fronteiras e parâmetros da corrente considerada.

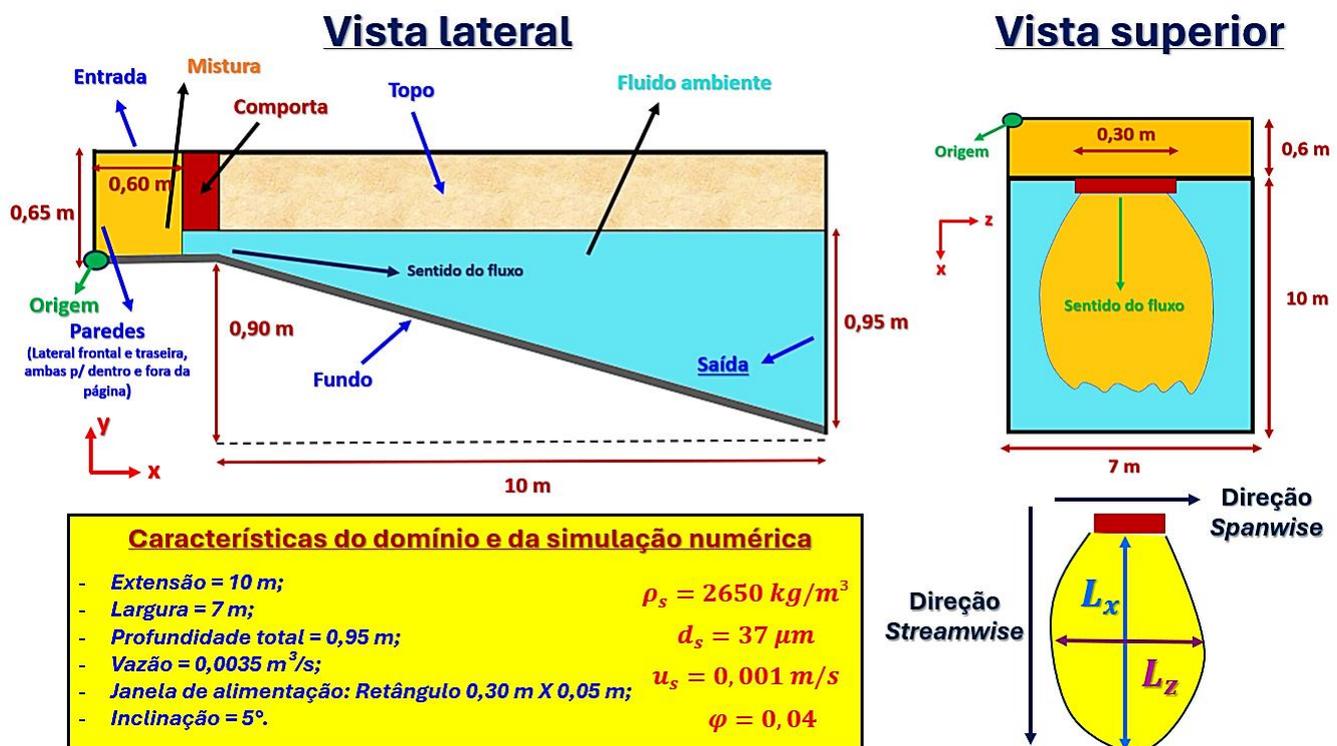


Figura 2: Domínio considerado para as análises deste trabalho, com base no estudo experimental de Luthi (1981), juntamente das características da corrente modelada.

A malha de cálculo adotada para representar numericamente o domínio da Figura 2 é do tipo estruturada e encontra-se dividida em elementos hexaédricos (apresentando um total de 4.156.520 elementos), cujas dimensões características (Δ_m) variam desde a zona próxima ao reservatório e à janela de alimentação da bacia (onde a grade é bastante refinada e apresenta $\Delta_m = 0,0025 \text{ m}$) até a seção de saída da mesma (onde a malha é um pouco mais grosseira, possuindo $\Delta_m = 0,025 \text{ m}$). Esta grade é construída a partir de um recorte de um grande bloco (em forma de paralelepípedo de 10,05 m de extensão, 7,00 m de largura e 0,60 m de altura), representativo do topo do domínio e da comporta mostrados na Figura 2, sobre uma malha base inicial gerada



pelo *solver blockMesh*, próprio do código OpenFOAM. Este recorte se faz necessário para garantir o nível d'água de 0,95 m na seção mais profunda do domínio e é feito a partir da ferramenta *snappyHexMesh*.

As condições de contorno de velocidade, pressão e ϕ , aplicadas às fronteiras do domínio numérico, encontram-se detalhadas, segundo suas respectivas nomenclaturas no código OpenFOAM, na Tabela 1.

Tabela 1: Condições de contorno aplicadas nas simulações, segundo o código OpenFOAM

	Velocidade	Pressão	ϕ
Entrada	<i>flowRateInletVelocity</i>	<i>fixedFluxPressure</i>	<i>fixedValue (0,04)</i>
Saída	<i>pressureInletOutletVelocity</i>	<i>fixedValue (0)</i>	<i>inletOutlet</i>
Fundo	<i>noSlip</i>	<i>fixedFluxPressure</i>	<i>zeroGradient</i>
Topo	<i>slip</i>	<i>fixedFluxPressure</i>	<i>zeroGradient</i>
Paredes	<i>slip</i>	<i>fixedFluxPressure</i>	<i>zeroGradient</i>

Como condições iniciais, admitiu-se campo de velocidades e pressões internos nulos, enquanto o passo de tempo (Δt) inicial adotado foi de 0,001 s. Levando em consideração critérios de convergência e estabilidade da modelagem, admitiu-se que o passo de tempo poderia ser modificado ao longo da simulação numérica, de tal forma que o número de Courant sempre fosse inferior a 0,8.

Resultados e discussões

Levando em consideração a vazão volumétrica fixa na entrada de 0,0035 m³/s, bem como a geometria da janela de alimentação, estimou-se um comprimento característico de 0,05 m de entrada e uma intensidade de turbulência de 4%, permitindo estimar os parâmetros K , ε e ω , necessários para os modelos em LES e RANS. Nesse contexto, analisou-se, primeiramente os aspectos visuais e as estruturas observadas na corrente de turbidez após 70 s de simulação, como mostra a Figura 3, na qual é apresentada uma imagem presente no trabalho de Luthi (1981) para o mesmo instante considerado.

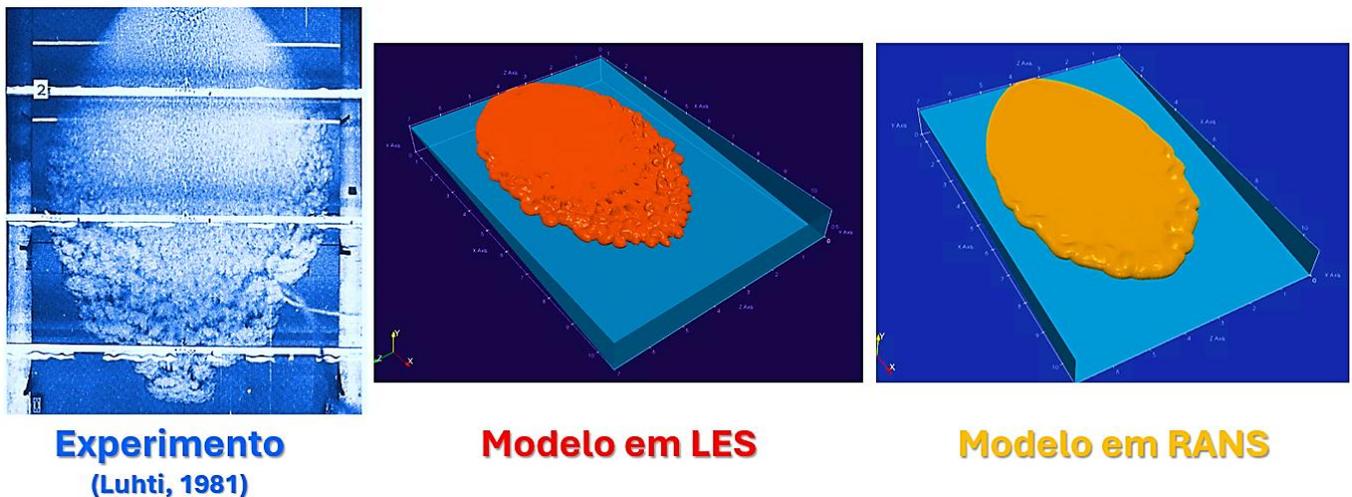


Figura 3: Comparação visual entre as correntes de turbidez obtidas nos modelos fundamentados nas metodologias LES e RANS, em relação à imagem presente no trabalho de Luthi (1981), após 70 s de simulação.

Da figura anterior, se observa que ambos os modelos numéricos representam de forma bastante adequada a razão de aspecto da corrente de turbidez (relação entre os valores atingidos nas direções *streamwise* e *spanwise*, que conferem à corrente um aspecto elíptico). Entretanto, o modelo baseado na abordagem *Large Eddy Simulation* demonstra uma representação mais fidedigna das estruturas de lobos e fendas existentes na corrente, enquanto o modelo fundamentado nas médias de Reynolds (RANS) fornece uma noção de onde as maiores estruturas da corrente estão localizadas, o que pode ser bastante interessante em uma análise realizada em uma bacia de dimensões muito grandes (macroescala).

Na sequência, foram comparadas as posições da frente nas direções *streamwise* (L_x) e *spanwise* (L_z), obtidas em ambos os modelos numéricos. A fim de quantificar o quão próximos estão os resultados numéricos dos resultados experimentais presentes no trabalho de Luthi (1981), foram utilizados dois parâmetros de referência: o coeficiente de determinação (R^2 , onde um valor próximo de 1 indica uma excelente correlação) e a raiz normalizada do erro quadrático médio (NRMSE, em que um valor igual a 0% indica um modelo perfeito). Estes resultados encontram-se dispostos nos gráficos da Figura 4, de onde é possível observar que ambos os modelos apresentaram coeficientes de determinação superiores a 0,99, indicando boa aderência dos mesmos aos resultados experimentais. Por outro lado, o modelo LES apresentou um valor de NRMSE ligeiramente superior ao modelo RANS, o que se deve principalmente à posição L_x nos tempos posteriores a 50 s, onde a corrente acelera um pouco mais



do que a corrente do experimento. Tal diferença pode ser atribuída ao fato de a malha numérica ser um pouco mais grosseira à jusante do domínio, conforme explicado anteriormente, o que afetaria o processo de modelagem das pequenas escalas segundo os filtros aplicados na metodologia LES. O mesmo não ocorre na metodologia RANS, pois todas as escalas turbulentas são modeladas a partir de um único modelo matemático, possibilitando lidar com malhas mais grosseiras, porém perdendo detalhamento das estruturas turbulentas, como observado na Figura 3. Quanto à posição da frente na direção *spanwise*, ambos os modelos numéricos apresentam valores de NRMSE em torno de 6%, indicando uma boa representação da taxa de espalhamento lateral da corrente de turbidez.

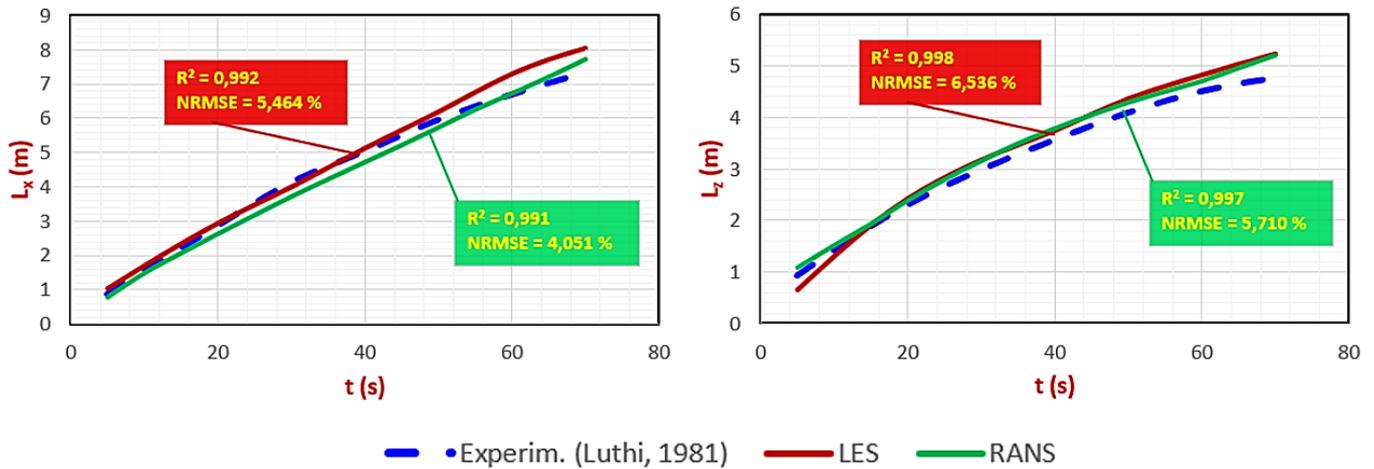


Figura 4: Posição da frente da corrente de turbidez segundo as direções *streamwise* e *spanwise*, para os modelos fundamentados em LES e RANS.

Por fim, é realizada uma comparação entre o depósito observado ao longo da linha central do domínio (linha central ao longo da direção x do domínio, mostrado, em planta, na Figura 2). O coeficiente k_m utilizado neste processo em ambos os modelos numéricos foi de 2,65 (valor obtido pela divisão da massa específica do sedimento pela massa específica da água). Os depósitos resultantes encontram-se dispostos nas curvas do gráfico mostrado na Figura 5.

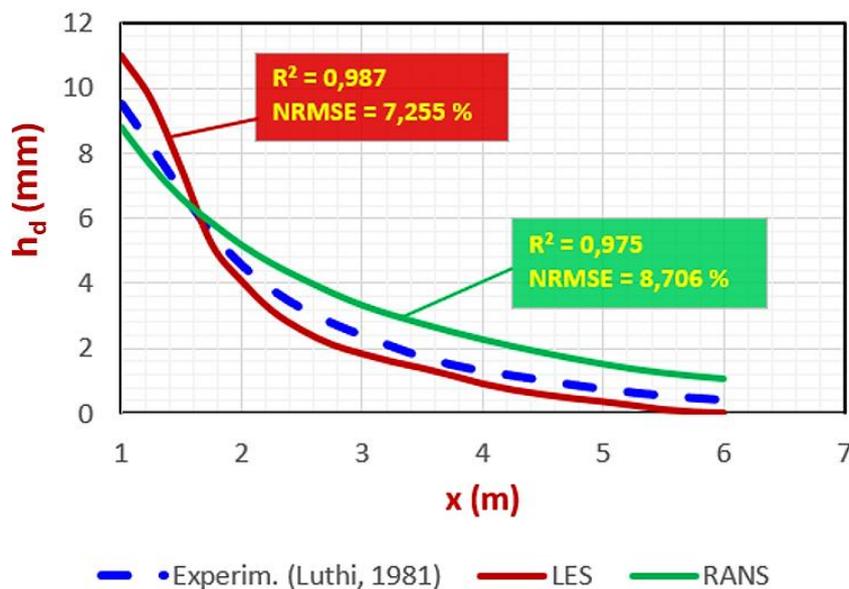


Figura 5: Alturas de depósito observadas na linha central do domínio, para os modelos em LES e RANS.

De uma forma geral, por meio da figura anterior, é possível observar que ambos os modelos reproduzem de forma satisfatória as alturas de depósito ao longo da linha central do domínio, o que é justificado pelos valores de R^2 superiores a 0,97 e NRMSE inferiores a 9%. O depósito obtido pelo modelo fundamentado em LES demonstra melhor aderência à curva experimental, enquanto o modelo em RANS tende a superestimar levemente as alturas nos pontos mais afastados da entrada, ao longo do domínio. Este último comportamento é bastante razoável, uma vez que os modelos em RANS possuem todos os efeitos de turbulência modelados por uma equação direta, ao passo que os modelos em LES resolvem diretamente as maiores escalas turbulentas, conferindo um melhor detalhamento da estrutura deposicional da corrente.



Considerações finais

O presente trabalho teve como proposta principal utilizar um modelo baseado nas equações do tipo *drift-flux* para modelar numericamente correntes de turbidez em configurações não-confinadas. Para tal utilizou-se o código computacional OpenFOAM e seu *solver driftFluxFoam*, capaz de modelar a mistura de água e sedimento como uma única fase, reduzindo o número de equações envolvidas no processo numérico, otimizando, portanto, o custo computacional das simulações.

Nesse contexto, foram utilizadas as duas principais abordagens aplicadas na área de *Computational Fluid Dynamics*, que consistem nas metodologias *Large Eddy Simulation* e *Reynolds Averaged Navier-Stokes*. Ambas foram aplicadas para reproduzir um dos principais experimentos realizados e presente na literatura de referência, referente à configuração do tipo aberta. Para isso, também se utilizou os modelos de Smagorinsky (LES) e *Buoyant $\kappa - \epsilon$* (RANS), aliado à aplicação de uma malha estruturada e suficientemente refinada, a fim de capturar as maiores escalas turbulentas.

Os resultados obtidos por ambos os modelos demonstraram bastante concordância com os valores experimentais, em termos de posição da frente da corrente e de alturas de depósito, apresentando coeficientes de determinação superiores a 0,90 e valores de NRMSE inferiores a 10%, que, em termos de engenharia, indicam uma aderência bastante satisfatória. Quanto aos aspectos visuais da corrente, observou-se um grande detalhamento de estruturas na modelagem LES, enquanto, no modelo baseado na metodologia RANS, apenas as regiões de maiores estruturas foram capturadas. Por outro lado, ambos os modelos forneceram noções bastante razoáveis da razão de aspecto da corrente, demonstrando um grande potencial para a modelagem e estudo das correntes de turbidez em configurações abertas.

Em linhas gerais, o *solver driftFluxFoam* se mostrou bastante robusto para representar a dinâmica envolvida nas correntes de turbidez em configuração não-canalizada, representando de forma satisfatória as estruturas turbulentas e os principais parâmetros utilizados para a sua caracterização. O modelo baseado na modelagem em LES se mostra bastante apropriado para aqueles estudos que buscam analisar as estruturas turbulentas em detalhe, enquanto os modelos em RANS são bastante adequados aos casos de malhas numéricas mais grosseiras, ideais para representar bacias sedimentares em escala real. Espera-se, por fim, que ambos os modelos sejam bastante satisfatórios para o estudo de correntes de turbidez em configurações canalizadas, uma vez que este tipo de arranjo é mais simples, em termos de complexidade, que as configurações abertas.

Referências Bibliográficas

- Abood, K.; Das, T.; Lester, D. R.; Usher, S. P.; Stickland, A. D.; Rees, C.; ... Batstone, D. J. Characterising sedimentation velocity of primary waste water solids and effluents. *Water Research*, v. 219, p. 118555, 2022.
- Brennan, D. The numerical simulation of two phase flows in settling tanks. 2001. Tese de Doutorado. Imperial College London (University of London).
- D'ávila, R. S. F.; Paim, P. S. G. Mecanismos de transporte e deposição de turbiditos. *Geometria, arquitetura e heterogeneidades de corpos sedimentares: estudos de caso*, p. 93-121, 2003.
- Dominguez, J. M. L.; Ribeiro, R. F. O Rio São Francisco, no Nordeste, possui um cânion submarino. *Super Interessante*, 2023. Disponível em: <<https://super.abril.com.br/coluna/deriva-continental/o-rio-sao-francisco-no-nordeste-possui-um-canion-submarino>> (Último acesso em: 03/06/2024).
- Ferguson, R. I.; Church, M. A simple universal equation for grain settling velocity. *Journal of sedimentary Research*. 2004. Nov 1;74(6):933-7.
- Gulraiz, S.; Gray, K. E. Study on the combined effect of thixotropy, particle shape, and particle size on cuttings transport in horizontal annuli. *Powder Technology*. 2021. Nov 1;392:703-16.
- Luthi, S. Experiments on non-channelized turbidity currents and their deposits. *Marine Geology*, v. 40, n. 3-4, p. M59-M68, 1981.
- Meiburg, E.; Kneller, B. Turbidity currents and their deposits. *Annual review of fluid mechanics*, v. 42, p. 135-156, 2010.
- OpenCFD. OpenFOAM® v2312. 2024. Disponível em: <<https://www.openfoam.com/news/main-news/openfoam-v2312>> (Último acesso em: 03/06/2024).
- Smagorinsky, J. General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment. *Monthly weather review*, v. 91, n. 3, p. 99-164, 1963.
- Spesivtsev, P.; Sinkov, K.; Osiptsov, A. Comparison of drift-flux and multi-fluid approaches to modeling of multiphase flow in oil and gas wells. *WIT Transactions on Engineering Sciences*. 2013 Jul 3; 79:89-99.



Talling, P. J.; Hage, S.; Baker, M. L.; Bianchi, T. S.; Hilton, R. G.; Maier, K. L. The global turbidity current pump and its implications for organic carbon cycling. *Annual Review of Marine Science*, v. 16, p. 105-133, 2024.

Yang, B.; Yang, F.; Liang, B.; Zhang, Q.; Wang, Z.; Wang, J. Numerical investigation of the interaction between the moving plate and sediment plume. *Ocean Engineering*, v. 248, p. 110839, 2022.

Zgheib, N.; Bonometti, T.; Balachandar, S. Propagation and deposition of non-circular finite release particle-laden currents. *Physics of Fluids*, v. 27, n. 8, 2015.

ÁREA TEMÁTICA 6

FERRAMENTAS APLICADAS
AOS INSTRUMENTOS
DE GESTÃO DE
RECURSOS HÍDRICOS



3º CONGRESSO INTERNACIONAL DE
**ENGENHARIA
AMBIENTAL**



MAPEAMENTO DE SUSCETIBILIDADE A INUNDAÇÕES: UMA REVISÃO ESTRUTURADA DA LITERATURA

1Admir José Giacon Junior, 2Alexandro Marco da Silva

1 UNESP, e-mail: admir.giacon@unesp.br; 2 UNESP, e-mail: alexandre.m.silva@unesp.br

Palavras-chave: Mapeamento de Suscetibilidade a Inundações; Revisão estruturada; Previsão de inundações

Resumo

Eventos de inundações quase sempre são relacionados a impactos negativos sociais, tecnológicos e ambientais. Evidenciando a importância do assunto, este estudo tem os objetivos de identificar e sistematizar artigos acadêmicos que propuseram métodos e mapeamentos de áreas suscetíveis a inundações e avaliar possíveis lacunas existentes. Para tanto, foi realizada uma revisão estruturada da literatura, contabilizando 179 estudos, através do banco de dados da Scopus, em que os estudos mais relevantes identificados foram classificados e categorizados em oito dimensões: contexto de pesquisa, foco de pesquisa, modelo empregado, método de pesquisa, clima local, tamanho da área, fatores condicionantes utilizados pelo método, benefício e desempenho alcançado. Com base na análise, infere-se que através do resultado encontram-se lacunas de aplicação de estudo de casos em locais que apresentem suscetibilidade a inundações que ainda não disponham de mapeamento e, por meio do mapeamento, obter uma ferramenta de tomada de decisão para aplicação de políticas públicas.

Introdução

As inundações são um dos eventos naturais de comum ocorrência que mais afetam severamente a sociedade (HONG *et al.*, 2018). Associada às alterações climáticas e meteorológicas e, por vezes, à ocupação desordenada do solo, fazem com que os riscos relacionados às inundações se maximizem (TERMEH *et al.*, 2018; ZHAO *et al.*, 2018). Com isso, a identificação de áreas propensas a inundações se torna crucial.

Diversos pesquisadores procuram em seus estudos mapear áreas suscetíveis a inundações (CHEN *et al.*, 2020; TIEN BUI *et al.*, 2019), os estudos de mapeamento de áreas suscetíveis a inundações quase sempre estão associados a um estudo de caso, ou seja, confirmando a existência de áreas propensas a inundações. Os modelos empregados podem ser baseados em sobreposição de mapas (BRAUD *et al.*, 2020), análise multicritério (STAVROPOULOS *et al.*, 2020; DAS (2020)), análise estatística (ABUZIED *et al.*, 2016; HANG *et al.*, 2021), análise baseada em Machine Learning (ML) (ZHAO *et al.*, 2018).

Essa diversidade de informações juntamente com a relevância do assunto orientou o presente trabalho para que tivesse como premissa a identificação e sistematização desses estudos, de maneira que se verifique desde quais assuntos já foram abordados, servir de suporte teórico, a justificar os argumentos e direcionar demais pesquisas relacionadas a áreas correlatas. Assim, realizou-se uma revisão estruturada da literatura, identificando os estudos mais relevantes, classificando-os e categorizando-os.

Métodos

A primeira etapa é caracterizada pela definição das palavras-chave utilizadas na pesquisa dos artigos suporte da revisão estruturada. O critério de escolha dos termos relevantes foi direcionado através da leitura de artigos de autores referência do assunto (TEHRANY, PRADHAN, JEBUR, 2014; TIEN BUI *et al.*, 2018; CHOUBIN *et al.*, 2019). Com isso, foram obtidos dois conjuntos de palavras-chave relevantes, sendo o primeiro "Flood Susceptibility Mapping" OR "Flood Susceptibility Map", com 166 artigos utilizados neste estudo e o segundo termo "Flood Forecasting" OR "Flood Prediction" AND "Susceptibility", com 19 artigos empregados. O estudo foi realizado no banco de dados Scopus, utilizando-se os operadores lógicos "AND" e "OR" para compor os termos definidos como palavras-chave. Ressalta-se que a pesquisa considerou os artigos publicados até 2022, portanto, novos artigos podem ter sido publicados após esse período.

Na sequência, os estudos foram classificados e categorizados em 8 classes, onde cada classe apresentou subcategorias. As classes foram listadas numericamente de 1 a 8, enquanto as subclasses foram elencadas através do sistema alfabético (A, B, C...). A categoria 1 (contexto) do sistema de classificação ao cenário que se realizou a pesquisa. Na categoria 2 (foco) verifica-se o foco da aplicação do estudo. As categorias 3 (modelo empregado) e 4 (método da pesquisa) analisam, respectivamente, o modelo e o método empregados. As categorias 5 (clima) e 6 (tamanho de área) classificam as localidades onde foram aplicadas as pesquisas, nos casos em que ocorreram um estudo de caso. A categoria 7 (fatores condicionantes) averigua quais foram os fatores que o estudo utilizou como dados de entrada para os métodos propostos. Por fim, a categoria 8 (benefício/desempenho) avalia os resultados obtidos. O sistema de classificação pode ser observado pela Tabela 1.



Tabela 1 - Sistema de classificação e codificação para os artigos analisados

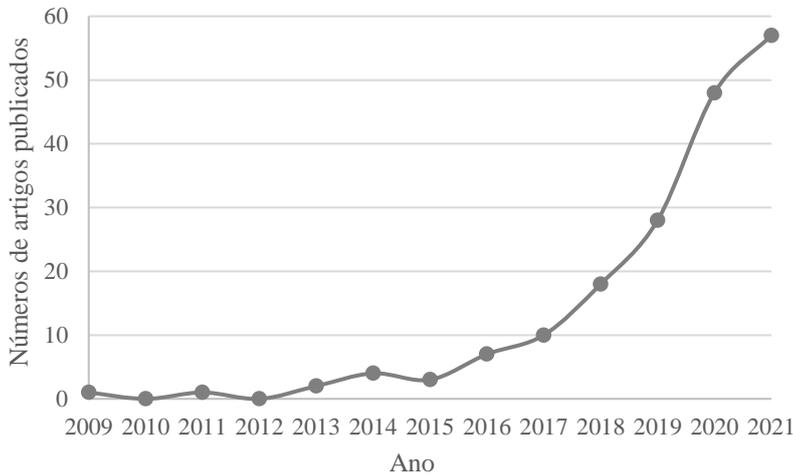
Classificação	Categoria	Código	Subcategorias
1	Contexto	A	País Desenvolvido
		B	País em Desenvolvimento
		C	Economias em Transições
		D	Não Aplicado
2	Foco	A	Mapeamento da Suscetibilidade
		B	Mapeamento do Perigo
		C	Mapeamento do Risco
		D	Outros
3	Modelo Empregado	A	<i>Machine Learning</i>
		B	Modelos Estatísticos
		C	Análise Multicritério
		D	Outros
4	Método de Pesquisa	A	Quantitativo
		B	Qualitativo
		C	Revisão
		D	Estudo de caso
5	Clima	A	Af
		B	Am
		C	Aw/As
		D	BSh
		E	BSk
		F	BWh
		G	BWk
		H	Cfa
		I	Cfb
		J	Cfc
		K	Csa
		L	Csc
		M	Cwa
		N	Cwb
		O	Dfa
		P	Dfb
		Q	Dfc
		R	Dsa
		S	Dsb
		T	Dwa
U	Dwb		
V	ET		
X	Todos os Climas		
Z	Não Aplicado		
6	Área	A	0 - 1000 km ²
		B	1000 - 10000 km ²
		C	10000 - 20000 km ²
		D	20000 - 40000 km ²
		E	> 40000 km ²
		F	Não Aplicado
7	Fatores Condicionantes	A	Meteorológicos
		B	Antropológicos
		C	Geomorfológicos
		D	Hidrológicos
		E	Não Aplicado
8	Benefício/Desempenho	A	Ambiental
		B	Financeiro
		C	Social
		D	Operacional
		E	Revisão



1. Resultados

1.1. Análise Bibliométrica

Fundamentado na pesquisa realizada no banco de dados Scopus, observa-se que o campo de estudos de mapeamento de áreas suscetíveis a inundações é relativamente novo. O primeiro artigo encontrado data de 2009, no entanto, até o ano de 2013 o tema não teve evolução no número de publicações. Uma das maneiras de verificação da importância do assunto é através do número de citações. Dessa maneira, é possível verificar uma tendência de crescimento de estudos relacionado ao tema, assim como a verificação dos 10 artigos mais citados, como aponta a Figura 1.



Autor (Ano)	Número de citações
Tehrany, M.S., Pradhan, B., Jebur, M.N. (2014)	643
Tehrany, M.S., Pradhan, B., Jebur, M.N. (2013)	566
Tehrany <i>et al.</i> (2015)	527
Khosravi <i>et al.</i> (2018)	473
Khosravi <i>et al.</i> (2019B)	385
Rahmati, O., Pourghasemi, H.R., Zeinivand, H. (2016)	346
Pradhan, B. (2009)	320
Razavi Termeh <i>et al.</i> (2018)	314
Choubin <i>et al.</i> (2019)	313
Khosravi <i>et al.</i> (2016A)	313

Figura 15 - Publicações no campo de estudo de mapeamento de suscetibilidade a inundações e artigos mais citados.

1.2. Análise de Dimensões

1.2.1 Contexto

A categoria “contexto” apresenta subcategorias que definem o cenário de aplicação do estudo. As classificações desses cenários são baseadas na consideração do desenvolvimento econômico local. A análise do contexto verificou que 72,07% da produção científica referente a mapeamento de suscetibilidade a inundações foram produzidas em países em desenvolvimento. Em países desenvolvidos foram contabilizados 32 estudos, conforme Figura 2.

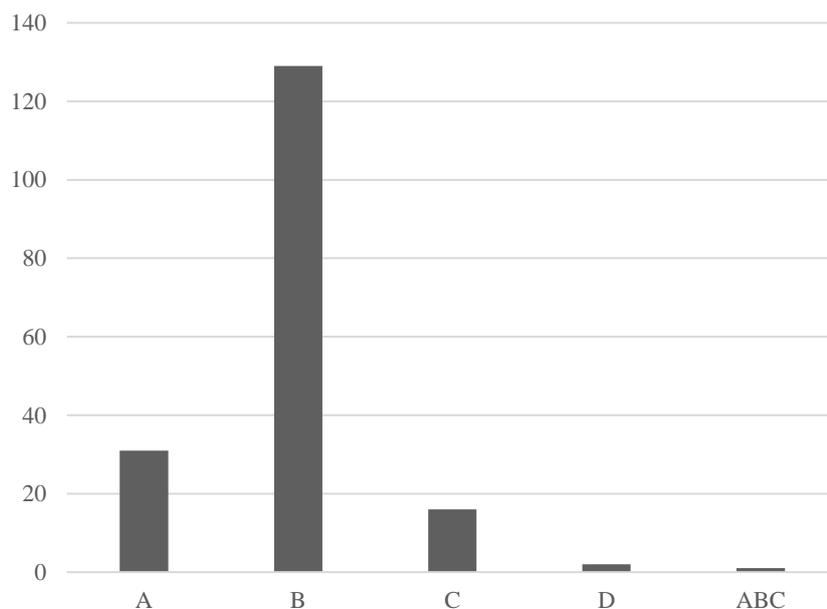


Figura 2 - Resultado da análise de contexto.

É possível verificar a quantidade de estudo desenvolvido em cada país, conforme Figura 3. O país que mais gerou estudos de casos foi o Irã, seguido pela Índia e China.



Localização geográfica das publicações

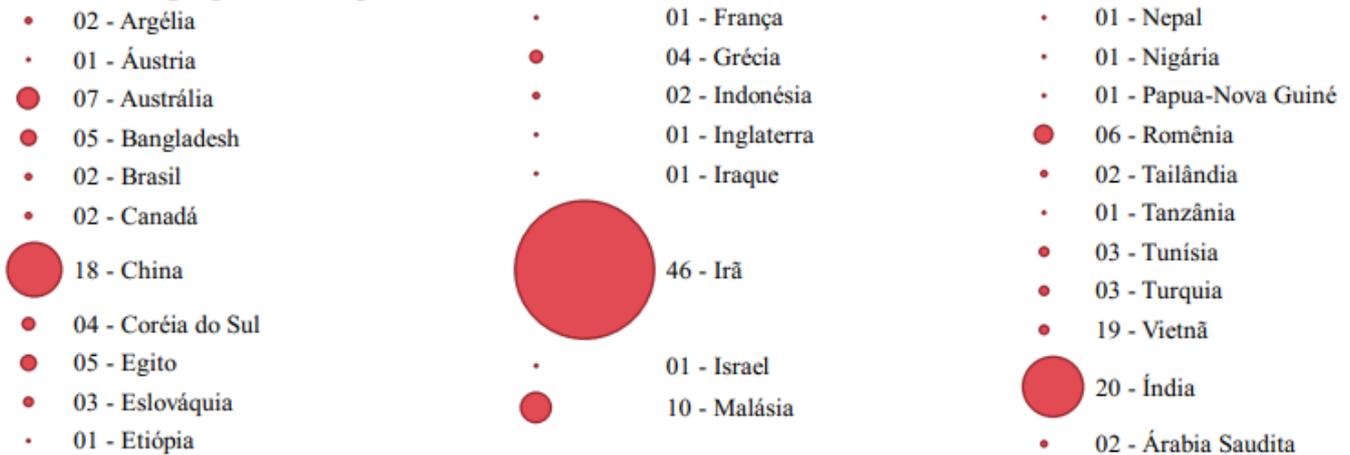


Figura 3 - Localidade de aplicação dos métodos propostos pelos artigos revisados.

1.2.2. Foco

A subcategoria da classe “foco” define três focos principais quanto a inundações, que foram observados nos artigos, sendo: Suscetibilidade; Perigo; Risco. A suscetibilidade pode ser considerada como uma predisposição ou propensão a ocorrência de um evento (DIAS; TRENTIN; DE SOUZA ROBAINA, 2019). O perigo pode ser definido como um evento que corresponda a uma ação prejudicial potencial, que causará perdas ou danos. O risco pode ser considerado como a probabilidade de ocorrência de um evento natural que gere um desastre multiplicado pelo valor do impacto minimizado pela resiliência local (AITSI-SELM I *et al.*, 2015). Por vezes, os termos são utilizados de maneira equivocada, o que acaba justificando a análise. A análise de foco verificou que as quatro pesquisas que utilizavam o termo “*Susceptibility*” definindo o artigo realizaram o mapeamento de perigo e risco, conforma demonstra Figura 4.

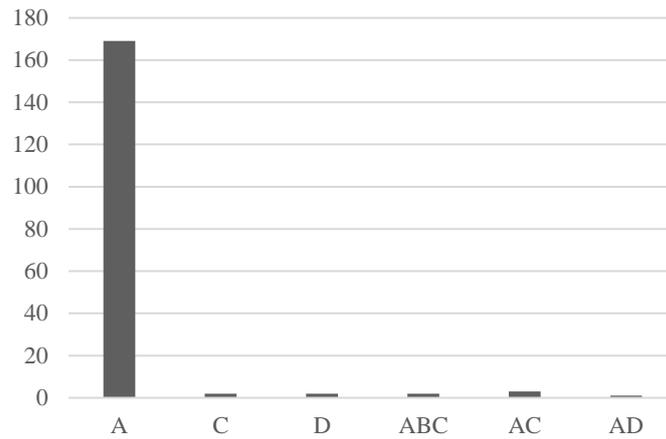


Figura 4 - Resultado da análise de foco.

1.2.3. Modelo Empregado

A avaliação dos modelos empregados nas pesquisas demonstrou que os mapeamentos de suscetibilidade a inundações são realizados de modo diversificado. Verificou-se, ainda, que o mesmo artigo aplica diversos modelos nos mapeamentos para reforçar e validar o modelo proposto. O resultado da avaliação dos modelos empregados é observado na Figura 5.

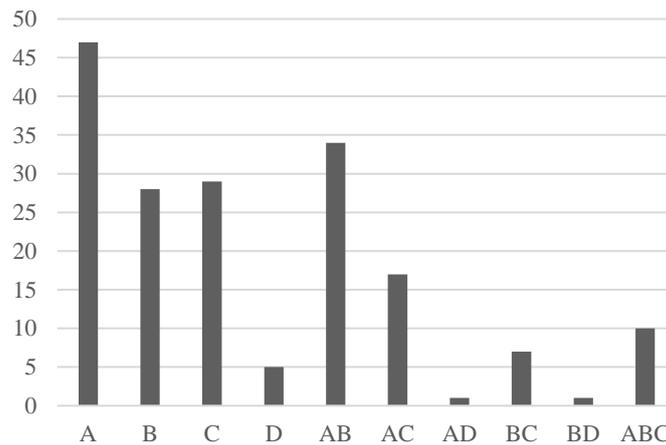


Figura 5 - Resultado da análise de modelo empregado.

1.2.4. Método de Pesquisa

As pesquisas demonstraram o uso majoritário dos métodos quali-quantitativos aplicados ainda em um estudo de caso, esse valor corresponde cerca de 90% em relação ao total, conforme Figura 6.

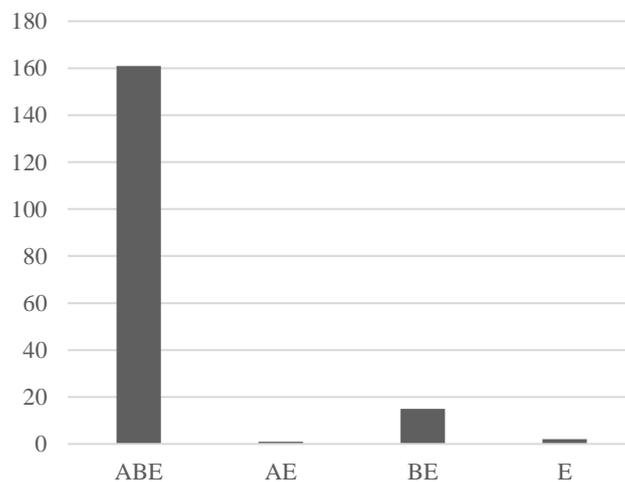


Figura 6 - Resultado da análise de métodos de pesquisa.



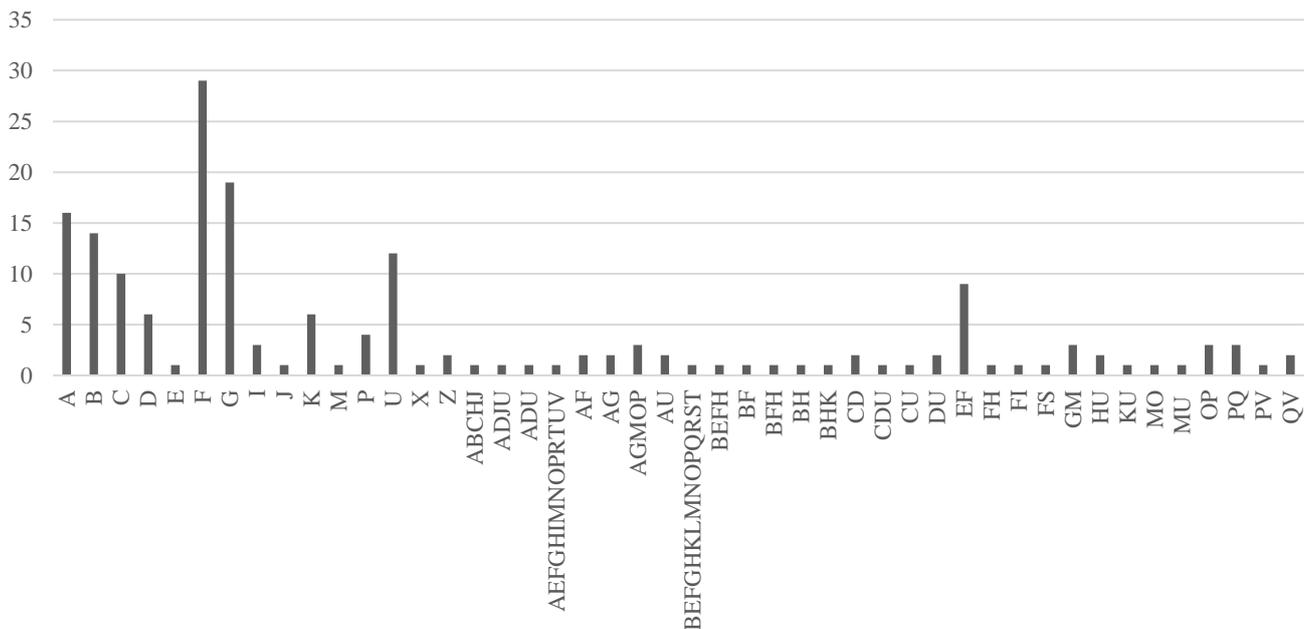
1.2.5. Clima

Em casos em que as pesquisas aplicaram o método em um estudo de caso, procurou-se caracterizar o local com o intuito de verificar a efetividade do método e modelo empregado vinculando à área de estudo. A classificação climática utilizada foi a proposta por Köppen-Geiger. Esse método pressupõe uma classificação baseada na fitossociologia e ecologia da vegetação natural (KOTTEK *et al.*, 2006), como observada na Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação climática proposta por Köppen-Geiger

Clima Médio	Precipitação	Temperatura
A equatorial	W árido	h quente
B seco	S semiárido	k frio
C temperado	f equatorial	a verão quente
D continental	s verão seco	b verão frio
E polar	w inverno seco	c verão frio
	m de moção	d inverno muito frio
		F glacial
		T tundra

O clima que apresenta maior frequência de utilização é o BWh (16.20%), seguido de BWk (10.61%) e Af (8.94%), como demonstra Figura 7.



Clima Local

A - Af	G - BWk	M - Cwa	S - Dsb
B - Am	H - Cfa	N - Cwb	T - Dwa
C - Aw/As	I - Cfb	O - Dfa	U - Dwb
D - BSh	J - Cfc	P - Dfb	V - ET
E - BSk	K - Csa	Q - Dfc	X - Todos os Climats
F - BWh	L - Csc	R - Dsa	Z - Não Aplicado

Figura 7 - Resultado da análise de clima local.

1.2.6. Área

Assim como o clima, a análise das áreas em que os estudos foram aplicados procurou demonstrar a efetividade em relação ao método e modelo empregado. Cerca de 50% das pesquisas que aplicaram o método em um estudo de caso utilizou-se de áreas entre 1.000 e 10.000 km², como observado na Figura 8.

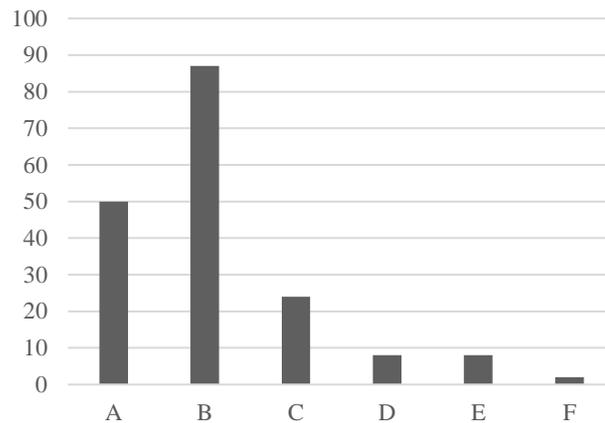


Figura 8 - Resultado da análise de tamanho de área.

1.2.7. Fatores Condicionantes

Os fatores condicionantes podem definir o sucesso do estudo, pois são eles que quantificam a suscetibilidade a inundação de um local. A Figura 9 demonstra que cerca de 75% dos estudos analisados utilizaram-se do conjunto de fatores condicionantes relacionados a meteorologia, antropologia, geomorfologia e hidrologia.

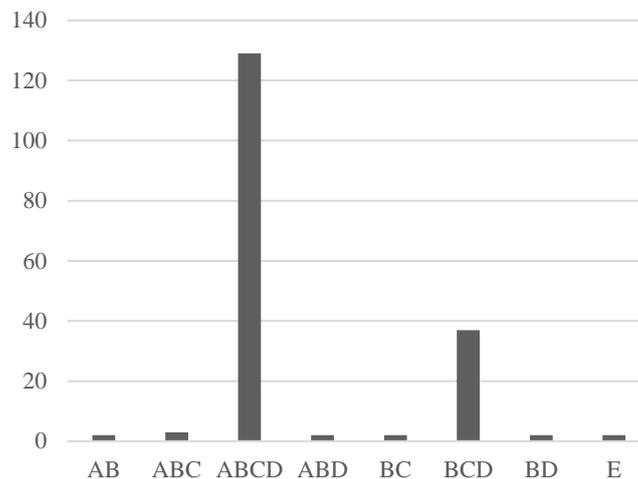


Figura 9 - Resultado da análise de fatores condicionantes.

Os 15 fatores condicionantes mais utilizados são demonstrados na tabela 3.

Tabela 3 – Os 15 fatores condicionantes mais empregados

Fatores Condicionantes	Porcentagem
Inclinação	96,6
Altitude	94,3
Cobertura da terra e uso do solo	85,2
Distância interfluvial	76,1
Precipitação pluviométrica	74,4
Embasamento geológico	73,9
Curvatura	69,3
Índice de umidade topográfica (TWI)	67,0
Solo	50,0
Orientação das vertentes	46,6
Densidade de drenagem	44,9
Índice de potência de fluxo (SPI)	43,8
Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)	26,1
Distância de estradas	15,3
Acúmulo de fluxo	15,3



1.2.8. Benefício

O benefício e o desempenho que os trabalhos concluíram quase sempre são relacionados a uma questão financeira e social, correspondendo a uma parcela de 90% do total, conforme Figura 10.

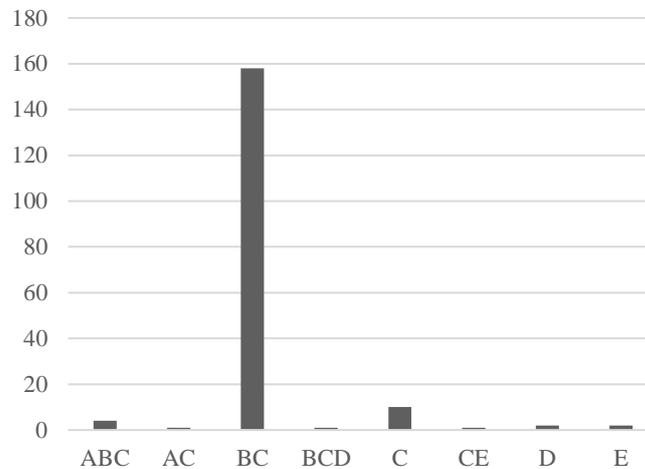


Figura 10 - Resultado da análise de benefício/desempenho.

Discussão

Relatos de eventos naturais de inundação são observados desde a antiguidade (KJELDSEN *et al.*, 2014). Já os estudos de mapeamento de áreas suscetíveis a inundações são mais recentes, podendo estar ligados diretamente aos avanços e acesso da tecnologia, em especial, a tecnologia SIG e aos *softwares* de análise espacial e análise de dados. A tecnologia SIG, juntamente com o sensoriamento remoto, permite levantar dados da superfície terrestre, com alta precisão e de grandes áreas. Acoplado a *softwares* de análise de dados, os estudos hidro geomorfológicos apresentam grandes evoluções de quantidade e qualidade. Os *softwares* mais observados de sensoriamento remoto foram ArcGIS, QGIS e SAGA GIS. Quanto aos satélites, existe a limitação do satélite que orbita a respectiva região de estudo. Porém, os mais citados são Landsat (7 ETM e 8 OLI) e Sentinel (1 e 2). Os *softwares* mais utilizados são o próprio ArcGIS (análise Multicritério (MCDM) e, mais recentemente, análises estatísticas e baseadas em Machine Learning (ML)), e *softwares* com linguagem R, MATLAB e Python, esses mais utilizados para análises estatística e ML.

O modelo empregado no FMS apresenta um avanço no decorrer do tempo. Uma parte dos primeiros estudos publicados avaliados tinham base na MCDM, um método semi-quantitativo, que fornece uma estrutura de tomada de decisão. Sucintamente, o MCDM utiliza-se da adoção de pesos para classificar os fatores condicionantes, o mapa final é obtido através da estruturação dos fatores condicionantes ponderados. Apresenta como vantagem a facilidade de implementação, a desvantagem do modelo é a subjetividade, já que a ponderação é realizada através de raciocínio humano, dentre os estudos analisados que se utilizam de algum modelo baseado em MCDM destaca-se Khosravi *et al.* (2019) (*Simple Additive Weighting (SAW)*) e Mahmoud e Gan (2018) (*Analytical Hierarchy Process (AHP)*). Modelos estatísticos com base na matemática e estatística também são observados nas primeiras publicações como em Pradhan (2009) com o uso de *Frequency Ration (FR)* e Pradhan e Youssef (2011) utilizando-se de *Probability Density Moisture (PDM)* e *Evidential Belief Function (EBF)*. Modelos estatísticos oferecem boa capacidade preditiva, mas em contrapartida podem apresentar processamentos longos e modelos complexos para aplicação em mapeamento de áreas suscetíveis a inundações. Modelos baseados em ML compõem cerca de 61% das publicações revisadas. ML se baseia em Inteligência Computacional, a qual tem como premissa desenvolver modelos capazes de assimilar conceitos e conhecimentos com base em uma determinada amostra de dados. As vantagens de modelos ML mais comuns são eliminação da subjetividade, possibilidade de incorporação de outros modelos e alta eficiência de previsão. Como desvantagem o ML pode apresentar um alto custo computacional e dependências de conjuntos de dados de treinamento otimizados. Dos estudos analisados é possível ver a evolução dos modelos ML empregados, temos a utilização de *Decision Tree (DT)* por Tehrany, Pradhan, Jebur (2013); o *Support Vector Machine (SVM)* por Tehrany, Pradhan, Jebur (2014) e modelos ML mais modernos como *AdaBoostM1 based Credal Decision Tree (ABM-CDT)*, *Radom Subspace (RS)*, *Dagging* e *Bagging* sendo aplicados em conjunto por Luu *et al.* (2021). A referida eficiência do modelo ML pode ser vista através da análise *Area Under the Curve (AUC)*, nos estudos de Ha *et al.* (2021) que por meio de modelos ML híbridos MBREPT (MultiBoostAB-REPT) obteve a eficiência $AUC = 0.992$ e DCREPT (Decorate-REPT) $AUC = 0.991$, e, no estudo de Costache *et al.* (2021) com AUC Random Forest (RF) = 0.996.

A análise de contexto demonstra o FMS com maior aplicação em países em desenvolvimento. O grande destaque é o Irã com 46 estudos de FMS, o fato é relacionado a concentração de grande parte dos pesquisadores que trabalham com esse assunto. A aplicação de 72,07% dos estudos em países em desenvolvimentos pode ser vinculada a ideia de falta de infraestrutura que permita maiores resiliência local. A análise do contexto demonstra ainda que algumas localidades não apresentam estudos de mapeamento de áreas suscetíveis a inundações. Outro aspecto importante é a morfologia e clima local dos países que apresentam estudos de mapeamentos de áreas suscetíveis. Terrenos acidentados com climas desérticos, áridos e semiáridos com recorrências



de precipitações intensas e climas tropical com presença de estações chuvosas. Salienta-se que nos últimos anos outras localidades apresentaram estudos, isso pode ser atribuído a mudança climática. Relacionando-se a caracterização da área do estudo de caso, a categoria Área, não é um impeditivo do sistema de obtenção do mapeamento, visto os modelos empregados, exemplo disso é o estudo de Li *et al.* (2019) que analisou a área global.

Quanto ao método de pesquisa, se tratando da palavra-chave “*Flood Susceptibility Mapping*” era de se esperar muitos estudos de casos. O estudo de caso aplicado no mapeamento de áreas suscetíveis a inundações é uma maneira de qualificar a efetividade do modelo proposto e ainda obter como resultado um mapa que pode ser utilizado como ferramenta de gestão pública.

As lacunas encontradas nesses estudos ficam a cargo da dificuldade da obtenção dos fatores condicionantes e do desempenho e benefício alcançados. Os fatores condicionantes demonstram ser o item de maior dificuldade de obtenção, principalmente em países em desenvolvimentos. O SIG e sensoriamento remoto permitiram um avanço quanto aos fatores condicionantes relacionados à superfície terrestre, como exemplo Uso e Ocupação do Solo, Altitude e Inclinação. Porém, quando se trata de questões relacionadas à geomorfologia e hidrologia, encontram-se certas restrições de informações em determinados locais, o que pode ser um impeditivo na realização de estudos de mapeamento de áreas suscetíveis a inundações. A maior lacuna encontrada é em relação ao benefício alcançado, nesta revisão cerca de 98% citam ganhos sociais e financeiros. Porém, existe a possibilidade/necessidade da verificação do impacto da aplicação de mapeamento de áreas suscetíveis a inundações, principalmente quanto a possibilidade de analisar-se os benefícios ambientais proporcionados.

Conclusão

O presente estudo teve o intuito de realizar uma revisão sistemática em pesquisas relacionadas a mapeamento de áreas suscetíveis a inundações. Para isso, um total de 179 artigos foram revisados, gerando uma análise de diferentes dimensões. Os resultados obtidos podem ser úteis a pesquisadores e técnicos relacionados à gestão pública, podendo direcionar uma leitura que se adeque a região de interesse da aplicação do estudo. Infere-se que o mapeamento de áreas suscetíveis a inundações demonstra ser uma ferramenta que possibilita dados para tomada de decisão nas realizações de infraestruturas de mitigação de danos de áreas propensas a inundações e de ordenamento territorial.

É possível observar a relevância e atualidade do tema através do número de citações e das crescentes publicações. Tal fato justifica-se em função da importância do assunto frente ao histórico negativo atribuído a inundações. As lacunas a serem exploradas diz respeito aos locais que ainda não tiveram as áreas suscetíveis a inundações mapeadas, ao levantamento de dados e aos benefícios alcançados pelos estudos, os quais podem e devem ser base de políticas públicas e de tomada de decisões.

Tabela Complementar

A Tabela Complementar traz uma revisão sucinta dos artigos e trabalhos analisados, e pode ser verificado no endereço digital: https://docs.google.com/spreadsheets/d/1Ob8QjLiXkLzOZOD_BkG3e_7Iai841Vc_/edit?usp=drive_link&ouid=115174005702933088093&rtpof=true&sd=true

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pela CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Brasil.

Referências Bibliográficas

- Abuzied, S., M. Yuan, S. Ibrahim, M. Kaiser, T. Saleem. 2016. Geospatial Risk Assessment of Flash Floods in Nuweiba Area, Egypt. *Journal of Arid Environments* 133: 54-72. doi:10.1016/j.jaridenv.2016.06.004.
- Aitsi-Selmi, A., S. Egawa, H. Sasaki, C. Wannous, V. Murray. 2015. The Sendai Framework for Disaster Risk Reduction: Renewing the Global Commitment to People’s Resilience, Health, and Well-being. *International Journal of Disaster Risk Science* 6 (2): 164-176. doi:10.1007/s13753-015-0050-9.
- Braud, I., L. -R Lagadec, L. Moulin, B. Chazelle, P. Breil. 2020. A Method to use Proxy Data of Runoff-Related Impacts for the Evaluation of a Model Mapping Intense Storm Runoff Hazard: Application to the Railway Context. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 20 (4): 947-966. doi:10.5194/nhess-20-947-2020.
- Chen, W., Y. Li, W. Xue, H. Shahabi, S. Li, H. Hong, X. Wang, et al. 2020. Modeling Flood Susceptibility using Data-Driven Approaches of Naïve Bayes Tree, Alternating Decision Tree, and Random Forest Methods. *Science of the Total Environment* 701. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.134979.
- Choubin, B., E. Moradi, M. Golshan, J. Adamowski, F. Sajedi-Hosseini, A. Mosavi. 2019. An Ensemble Prediction of Flood Susceptibility using Multivariate Discriminant Analysis, Classification and Regression Trees, and Support Vector Machines. *Science of the Total Environment* 651: 2087-2096. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.10.064.
- Costache, R., A. Arabameri, I. Elkharchy, O. Ghorbanzadeh, Q. B. Pham. 2021. Detection of Areas Prone to Flood Risk using State-of-the-Art Machine Learning Models. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 12 (1): 1488-1507. doi:10.1080/19475705.2021.1920480.
- Das, S. 2020. Flood Susceptibility Mapping of the Western Ghat Coastal Belt using Multi-Source Geospatial Data and Analytical Hierarchy Process (AHP). *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 20. doi:10.1016/j.rsase.2020.100379.



- Dias, D. F., Trentin, R., De Souza Robaina, L. E. 2019. Análise e Zoneamento Geoambiental do Município de Rosário do Sul-RS: Potencialidades e Suscetibilidades. *Revista Geografar*, 14(1), 70-87.
- Ha, H., C. Luu, Q. D. Bui, D. -H Pham, T. Hoang, V. -P Nguyen, M. T. Vu, B. T. Pham. 2021. Flash Flood Susceptibility Prediction Mapping for a Road Network using Hybrid Machine Learning Models. *Natural Hazards* 109 (1): 1247-1270. doi:10.1007/s11069-021-04877-5.
- Hang, H. T., P. D. Hoa, V. N. Tru, N. V. Phuong. 2021. Application Of Shannon's Entropy Model and Gis in Flash Flood Forecasting Along National Highway-6, Hoa Binh Province, Vietnam. *International Journal of Geomate* 21 (87): 50-57. doi:10.21660/2021.87.j2316.
- Hong, H., M. Panahi, A. Shirzadi, T. Ma, J. Liu, A. -X Zhu, W. Chen, I. Kougias, N. Kazakis. 2018. Flood Susceptibility Assessment in Hengfeng Area Coupling Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System with Genetic Algorithm and Differential Evolution. *Science of the Total Environment* 621: 1124-1141. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.10.114.
- Khosravi, K., A. M. Melesse, H. Shahabi, A. Shirzadi, K. Chapi, H. Hong. 2019. Flood Susceptibility Mapping at Ningdu Catchment, China using Bivariate and Data Mining Techniques. In *Extreme Hydrology and Climate Variability: Monitoring, Modelling, Adaptation and Mitigation*, 419-434. doi:10.1016/B978-0-12-815998-9.00033-6.
- Kjeldsen, T. R., N. Macdonald, M. Lang, L. Mediero, T. Albuquerque, E. Bogdanowicz, R. Bra'zdil, et al. 2014. Documentary Evidence of Past Floods in Europe and their Utility in Flood Frequency Estimation. *Journal of Hydrology* 517: 963-973. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.06.038.
- Kottek, M., J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, F. Rubel. 2006. World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification Updated. *Meteorologische Zeitschrift* 15 (3): 259-263. doi:10.1127/0941-2948/2006/0130.
- Li, X., D. Yan, K. Wang, B. Weng, T. Qin, S. Liu. 2019. Flood Risk Assessment of Global Watersheds Based on Multiple Machine Learning Models. *Water (Switzerland)* 11 (8). doi:10.3390/w11081654.
- Luu, C., Q. D. Bui, R. Costache, L. T. Nguyen, T. T. Nguyen, T. Van Phong, H. Van Le, B. T. Pham. 2021. Flood-Prone Area Mapping using Machine Learning Techniques: A Case Study of Quang Binh Province, Vietnam. *Natural Hazards* 108 (3): 3229-3251. doi:10.1007/s11069-021-04821-7.
- Mahmoud, S. H., Gan, T. Y. 2018. Multi-Criteria Approach to Develop Flood Susceptibility Maps in Arid Regions of Middle East. *Journal of Cleaner Production* 196: 216-229. doi:10.1016/j.jclepro.2018.06.047.
- Pradhan, B. 2009. Flood Susceptible Mapping and Risk Area Delineation using Logistic Regression, GIS and Remote Sensing. *Journal of Spatial Hydrology* 9 (2): 1-18.
- Pradhan, B., A. M. Youssef. 2011. A 100-Year Maximum Flood Susceptibility Mapping using Integrated Hydrological and Hydrodynamic Models: Kelantan River Corridor, Malaysia. *Journal of Flood Risk Management* 4 (3): 189-202. doi:10.1111/j.1753-318X.2011.01103.x.
- Termeh, S. V. R., A. Kornejady, H. R. Pourghasemi, S. Keesstra. 2018. Flood Susceptibility Mapping using Novel Ensembles of Adaptive Neuro Fuzzy Inference System and Metaheuristic Algorithms. *Science of the Total Environment* 615: 438-451. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.09.262.
- Stavropoulos, S., G. N. Zaimis, E. Filippidis, D. C. Diaconu, D. Emmanouloudis. 2020. Mitigating Flash Floods with the use of New Technologies: A Multi-Criteria Decision Analysis to Map Flood Susceptibility for Zakynthos Island, Greece. *Journal of Urban and Regional Analysis* 12 (2): 233-248. doi:10.37043/JURA.2020.12.2.7.
- Tehrany, M. S., B. Pradhan, M. N. Jebur. 2013. Spatial Prediction of Flood Susceptible Areas using Rule Based Decision Tree (DT) and a Novel Ensemble Bivariate and Multivariate Statistical Models in GIS. *Journal of Hydrology* 504: 69-79. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.09.034.
- Tehrany, M. S., B. Pradhan, M. N. Jebur. 2014. Flood Susceptibility Mapping using a Novel Ensemble Weights-of-Evidence and Support Vector Machine Models in GIS. *Journal of Hydrology* 512: 332-343. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.03.008.
- Tien Bui, D., K. Khosravi, S. Li, H. Shahabi, M. Panahi, V. P. Singh, K. Chapi, et al. 2018. New Hybrids of ANFIS with several Optimization Algorithms for Flood Susceptibility Modeling. *Water (Switzerland)* 10 (9). doi:10.3390/w10091210.
- Tien Bui, D., P. -T T. Ngo, T. D. Pham, A. Jaafari, N. Q. Minh, P. V. Hoa, P. Samui. 2019B. A Novel Hybrid Approach Based on a Swarm Intelligence Optimized Extreme Learning Machine for Flash Flood Susceptibility Mapping. *Catena* 179: 184-196. doi:10.1016/j.catena.2019.04.009.
- Zhao, G., B. Pang, Z. Xu, J. Yue, T. Tu. 2018. Mapping Flood Susceptibility in Mountainous Areas on a National Scale in China. *Science of the Total Environment* 615: 1133-1142. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.10.037.



MUDANÇAS DO USO E COBERTURA DO SOLO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS DA AMAZÔNIA E SUA INFLUÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO LOCAL

1Nayanne Maria Gonçalves Leite, 2Victor Hugo Rabelo Coelho, 2,3Guillaume Francis Bertrand,
4Cynthia Maria De Abreu Claudino, 5Eduardo Gonçalves Patriota, 6José Lindemberg Vidal Barbosa,
7Cristiano das Neves Almeida

1Universidade Federal da Paraíba, e-mail: nayannegl@hotmail.com ; 2Universidade Federal da Paraíba, e-mail: victor-coelho@hotmail.com; 3Université de Franche-Comté e-mail: guillaume353@gmail.com; 4Universidade Federal da Paraíba, e-mail: cinthiamariaac@gmail.com; 5Universidade Federal da Paraíba, e-mail: eduardo.patriota@academico.ufpb.br ; 6Universidade Federal da Paraíba, e-mail: lindembergvidal@outlook.com; 7Universidade Federal da Paraíba, e-mail: cristiano.almeida@academico.ufpb.br

Palavras-chave: Amazônia Legal Brasileira; Mudanças Climáticas; Recursos Hídricos.

Resumo

O monitoramento do uso e cobertura do solo, juntamente com sua evolução, é crucial para o estabelecimento de uma administração eficaz dos recursos naturais e sociais, além disso, estudos mostram que o desflorestamento afeta diretamente a disponibilidade e qualidade dos recursos hídricos, e aumenta significativamente os efeitos das mudanças climáticas. Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo fazer uma análise espaço-temporal da influência do uso e cobertura do solo, na Bacia Hidrográfica do Rio Mamoré e na Bacia Hidrográfica do Rio Guaporé, na precipitação e na evapotranspiração, no período de 2002 a 2022, através de dados do MapBiomas e produtos de sensoriamento remoto orbital. Foram selecionadas duas Bacias Hidrográficas da Amazônia Legal Brasileira, a do Rio Mamoré e a do Rio Guaporé, os quais estão entre os principais afluentes do Rio Madeira. Foram analisados o uso e ocupação do solo, a precipitação média anual e a evapotranspiração (ET) média diária dos últimos 20 anos de dados disponíveis, de 2003 a 2022. Para análise do uso e ocupação do solo, foram utilizados dados da plataforma MapBiomas. Para obtenção e processamento dos dados de precipitação e ET, foi utilizada a plataforma Google Earth Engine (GEE). Os dados de precipitação foram obtidos através do produto de sensoriamento remoto *Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations* (CHIRPS) e a ET média diária foi estimada utilizando como base o algoritmo desenvolvido por Mu et al. (2011), associado a equação de Penman-Monteith (Monteith, 1965), considerando as adaptações propostas por Claudino et al. (2024), conhecidas como ESTIMET. Os resultados indicaram que as áreas sem cobertura florestal apresentaram os menores volumes de precipitação ao longo dos anos, enquanto as regiões com cobertura florestal registraram os maiores volumes anuais de chuva durante o período estudado. Além disso, houve uma redução nas médias de evapotranspiração diária nos últimos 5 anos em ambas as regiões. Observou-se também uma diminuição na área classificada como curso d'água ao longo dos 20 anos analisados.

Introdução

As florestas são um componente fundamental para o ciclo hidrológico, logo o desmatamento afeta a disponibilidade e a qualidade dos recursos hídricos (Wu et al., 2021). Em 2021, foram perdidos 11,1 milhões de hectares de cobertura arbórea nos trópicos, desses, 3,75 milhões de hectares foram em florestas tropicais primárias, dos quais mais de 40% no Brasil (Weisse & Goldman, 2022). O desflorestamento no Brasil tem sido associado à expansão da agricultura devido à crescente demanda por agroprodutos, ao desenvolvimento de estradas e à dinâmica populacional nacional na região amazônica, que afetaram o comportamento socioeconômico das famílias, influenciando a intensidade e a taxa de processos de mudanças no uso e cobertura do solo. No entanto, o desmatamento é um processo cíclico (i.e., as taxas aceleram e desaceleram), sendo possíveis transições de cobertura da terra, como o reflorestamento (López, 2022).

A quantidade e a distribuição de chuvas está relacionada ao desmatamento em escalas espaciais e temporais, influenciando os climas locais e regionais (Mu e Jones, 2022). Analisar e quantificar a variabilidade da precipitação é fundamental para identificar os seus efeitos nos ecossistemas (Hagtalab et al., 2020). Na Amazônia, a precipitação está mudando de várias maneiras e, diante disso, é necessário compreender a variabilidade espaço-temporal da precipitação da região, identificando e quantificando a relação com as mudanças no uso e cobertura da terra (Marengo, 2015; Hagtalab et al., 2020; Mu e Jones, 2022).

O monitoramento da dinâmica do uso e cobertura do solo é fundamental para o desenvolvimento de uma gestão eficiente dos recursos naturais e sociais, possibilitando a realização de estudos científicos e elaboração de políticas públicas. Através desse monitoramento, pode-se obter informações confiáveis sobre uso e ocupação do solo, que podem melhorar a avaliação dos fenômenos, como o desmatamento e a seca, sendo essencial para estudo em florestas tropicais, como a Amazônia, pois apresentam papel importante nos processos ambientais mundiais e nas mudanças climáticas (Neves et al., 2020). O monitoramento terrestre é limitado, principalmente em regiões de difícil acesso como a Amazônia, e geralmente a análise ambiental é realizada com base em dados de uma pequena região. Diante da necessidade de observações e análises em larga escala, utiliza-se o sensoriamento remoto para adquirir amplas informações espectrais regionais e globais, obtendo vários



indicadores ecológicos por modelagem e recuperação de dados, sendo atualmente indispensável para o monitoramento ambiental (Li et al., 2020). Os dados de sensoriamento remoto têm sido utilizados, nas últimas décadas, para realizar estimativas de precipitação, classificação de uso da terra, evapotranspiração (ET), índices de vegetação e umidade do solo (Pan et al., 2018).

A ET desempenha um papel fundamental no ciclo hidrológico, sendo responsável pelo transporte de grandes volumes de água da superfície para a atmosfera, i.e., aproximadamente 65% da precipitação em áreas continentais (Kich, 2018). A medição e a simulação da ET são processos complexos, pois compreendem a água proveniente do solo e da transpiração das plantas, e sua relação com a atmosfera, o ciclo de carbono e a energia. Logo, compreender a dinâmica associada à ET e realizar estimativas precisas são essenciais para a gestão eficiente dos recursos hídricos, auxiliando na redução dos erros do balanço hídrico e melhorando a confiabilidade dos estudos sobre mudanças climáticas (Birhanu et al., 2019).

Wiekenkamp et al. (2016) afirmam que o monitoramento em escala real de todas as variáveis hidrológicas é oportuno para explicar a relação entre os diferentes processos hidrológicos e altamente recomendado em futuros estudos de desmatamento. Para se obter estimativas de variáveis hidrológicas como ET, precipitação e variações no armazenamento de água terrestre, pode-se utilizar observações de sensoriamento remoto, tendo em vista que as verificações *in situ* desses componentes apresentam densidade insuficiente para análise em grande escala e toda a heterogeneidade da superfície (Moreira et al., 2019). A escassa rede pluviométrica limita a capacidade de entender as mudanças nos padrões da precipitação a partir de verificações *in situ* e, diante disso, as estimativas através de sensoriamento remoto ou reanálise são alternativas para detectar tais mudanças (Mu e Jones, 2022). O sensoriamento remoto pode auxiliar na compensação de lacunas na cobertura espacial e temporal, complementando as redes de monitoramento e estudos de modelagem existentes (Miro e Famiglietti, 2018).

Nesse contexto, o estudo do impacto do desmatamento deve ser incentivado, buscando entender como as mudanças no uso e cobertura do solo poderão afetar a dinâmica local, e como as pequenas mudanças podem impactar o clima de grandes regiões (De Oliveira et al., 2018). Assim, considerando a importância da Floresta Amazônica na regulação do clima, na reciclagem da precipitação (20-35%) (Rocha et al., 2015) e na biodiversidade, o presente trabalho tem como objetivo fazer uma avaliação espaço-temporal da influência das alterações do uso e cobertura do solo nas escala local. Neste objetivo, esse trabalho investiga as evoluções da precipitação e ET local obtido com produtos de sensoriamento remoto orbital no período de 2002 a 2022, e as mudanças de ocupação de solo.

Materiais e Métodos

Área de estudo

O presente estudo abrange as áreas de duas bacias hidrográficas localizadas na Amazônia Legal Brasileira, cujos rios estão entre os principais afluentes do Rio Madeira, são elas a Bacia Hidrográfica do Rio Guaporé (97.563 km²), latitude entre 10° S e 15° S e longitude entre 60° W e 65° W, e a Bacia Hidrográfica do Rio Mamoré (23.216 km²), latitude entre 10° S e 15° S e longitude 65° W. O bioma amazônia, presente nas áreas de estudo, é caracterizado por alta pluviosidade anual, apresentando precipitação média anual entre 1.400 mm e 3.000 mm, temperatura média anual variando entre 24°C e 26°C, com uma estação seca, que ocorre de junho a novembro, e uma chuvosa, de dezembro a maio (Cavalcante et al., 2020). A Amazônia Legal Brasileira corresponde a 60% da floresta amazônica, responsável por serviços ecossistêmicos essenciais, como o provimento de água, alimentos, madeira, fibras, além de exercer um papel fundamental no ciclo hidrológico, contribuindo com a regulação do clima da região (Maurano et al., 2019). De maneira geral, as bacias hidrográficas da região compartilham características semelhantes das demais áreas do bioma, em termos de clima, vegetação e desafios de conservação. Além disso, tais rios são fundamentais para a vida e o sustento das pessoas e ecossistemas em suas regiões, desempenhando papéis importantes em termos de transporte, abastecimento de água, biodiversidade, pesca, fronteiras e turismo.

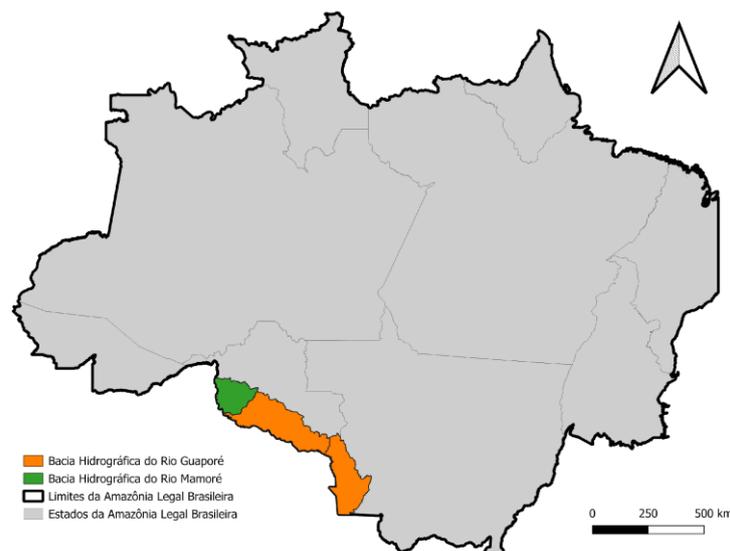


Figura 1: Localização da área de estudo



Dados de uso e cobertura do solo

Para análise do uso e cobertura da terra, foram utilizados dados da coleção 8 do projeto MapBiomas (MapBiomas, 2024), o qual dispõe de dados de 1988 a 2022. Os dados foram obtidos através do módulo do uso e cobertura da plataforma MapBiomas, selecionando no recorte territorial bacia hidrográfica e no território Madeira 01 e Madeira 02, para as Bacias do Rio Guaporé e do Rio Mamoré, respectivamente. Na legenda, selecionou-se o nível 1 de classificação (floresta, formação natural não florestal, agropecuária, área não vegetada, corpo d'água e não observado). Foi realizado o download direto da Coleção 8 com mapas de Cobertura e Uso da Terra de todo o Brasil em formato GeoTiff (um mapa para cada ano). Foram selecionadas as duas bacias hidrográficas e gerados 40 mapas anuais de uso e cobertura do solo, sendo 20 para cada região, no período de 2003 a 2022.

Dados de Precipitação

Para obtenção dos dados de precipitação, foi utilizado o produto de sensoriamento remoto *Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations* (CHIRPS), o qual dispõe de dados de precipitação do ano de 1981 até os dias atuais. O CHIRPS dispõe de dados de climatologia global, estimativa de chuva com base em satélites e chuva observada in-situ com cobertura quase global e resoluções espacial e temporal de $0,05 \times 0,05^\circ$ e mais de 40 anos, respectivamente. Além disso, o CHIRPS possui potencial de realização de avaliação da variabilidade da precipitação em áreas remotas não monitoradas, como é o caso de determinadas áreas de florestas, apresentando alta precisão geral da precipitação mensal em escalas regionais e de pixels (e.g. Funk et al., 2015; Torres-Batló & Marti-Cardona, 2020). Para este estudo, foram utilizadas as precipitações diárias de janeiro de 2003 até dezembro de 2022, as quais foram agrupadas mensalmente e anualmente. Em seguida, foram gerados mapas anuais com a precipitação anual de ambas as bacias hidrográficas para realizar a análise espaço-temporal dessa variável.

Dados de Evapotranspiração

Modelos de estimativa de ET através de sensoriamento remoto geralmente compreendem equações empíricas de balanço de energia e/ou índice de vegetação (Silva et al., 2021). Para realizar a estimativa da ET, foi utilizado como base o algoritmo desenvolvido por Mu et al. (2011), associado à equação de Penman-Monteith (Monteith, 1965). No entanto, para este estudo, foram consideradas as adaptações propostas por Claudino et al. (2024), que desenvolveu o ESTIMET (*Evaluation and Spatial-Temporal Improvement of MODIS EvapoTranspiration*) (Claudino et al., 2024), visando solucionar questões relacionadas à ausência de dados pela cobertura de nuvens e fornecer dados diários de evapotranspiração (ET) com resolução espacial de 250 m. O procedimento geral de limpeza de nuvens do ESTIMET envolve o uso de composições mensais de parâmetros biofísicos como entrada para o modelo. Além disso, a ESTIMET utiliza informações mais precisas sobre o Uso e Cobertura da Terra (LULC) para o Brasil, provenientes do projeto MapBiomas, juntamente com dados mais precisos de forçamento meteorológico, como os do ERA5-Land e GLDAS 2.1. Foram estimados dados de ET diária para as duas bacias hidrográficas no período de janeiro de 2003 a dezembro de 2022, em seguida os dados foram agrupados mensalmente e anualmente. Para realizar a análise visual da distribuição da ET média diária para os 20 anos estudados, agrupou-se os dados em quatro períodos de cinco anos cada. Foram gerados oito mapas, sendo quatro mapas para cada região, os quais contêm a média de ET diária para cada bacia hidrográfica.

Processamento de dados

Os dados foram processados e analisados no *Google Earth Engine (GEE)*, que é uma plataforma para análise científica e visualização de dados geoespaciais que possibilita o acesso com facilidade e rapidez a arquivos de dados públicos e gratuitos, através de uma infraestrutura dedicada de computação de alto desempenho (Ravanelli et al., 2018). No presente trabalho, foi utilizada a linguagem de programação JavaScript para escrever o código. Após o processamento, foi realizada uma análise comparativa dos mapas e dados gerados, utilizando duas métricas estatísticas, o coeficiente de determinação (R^2) e o coeficiente de correlação (ρ), comparando o uso e cobertura do solo, a precipitação e a ET, a fim de verificar a relação entre as variáveis hidrológicas e a cobertura da terra. O coeficiente de correlação (ρ) avalia a intensidade e direção das relações lineares entre variáveis, variando de -1 a 1. Enquanto que o coeficiente de determinação (R^2) é uma medida estatística que indica o quão próximos os dados estão da linha de regressão ajustada, variando de 0 a 1.

Resultados e Discussão

Os dados do uso e cobertura da terra nas 2 bacias hidrográficas ao longo do período analisado (2003-2022; Figura 2a), indicam que houve uma redução da área de floresta. Essa alteração foi mais acentuada na Bacia do Rio Guaporé, passando de 55.656 (2003) para 50.946 km² (2022), representando uma diminuição de 8,46% da área florestal. Por sua vez, na Bacia do Rio Mamoré, a área florestal passou de 21.679 (2003) para 21.149 km² (2022), uma redução de pouco mais de 500 km², o que representa 2,44% da área de florestal. Analisando a área de cobertura florestal em relação a área total, verifica-se que, no primeiro ano analisado, 57% da Bacia do Rio Guaporé e 93% da Bacia do Rio Mamoré eram compostas por cobertura florestal, sendo reduzida para 52% e 91% em 2022, respectivamente. Apenas cerca de 400 km² (2% de seu território), na Bacia do Rio Mamoré é área de formação natural não florestal, que engloba campo alagado e área pantanosa, formação campestre e afloramento rochoso. Na Bacia Hidrográfica do Rio Guaporé, constatou-se que, em 2003, essa classe não florestal equivalia a 14% da região, sendo reduzida para 10% em 2022, uma perda de 4.000 km² nos últimos 20 anos (Figura 2b).

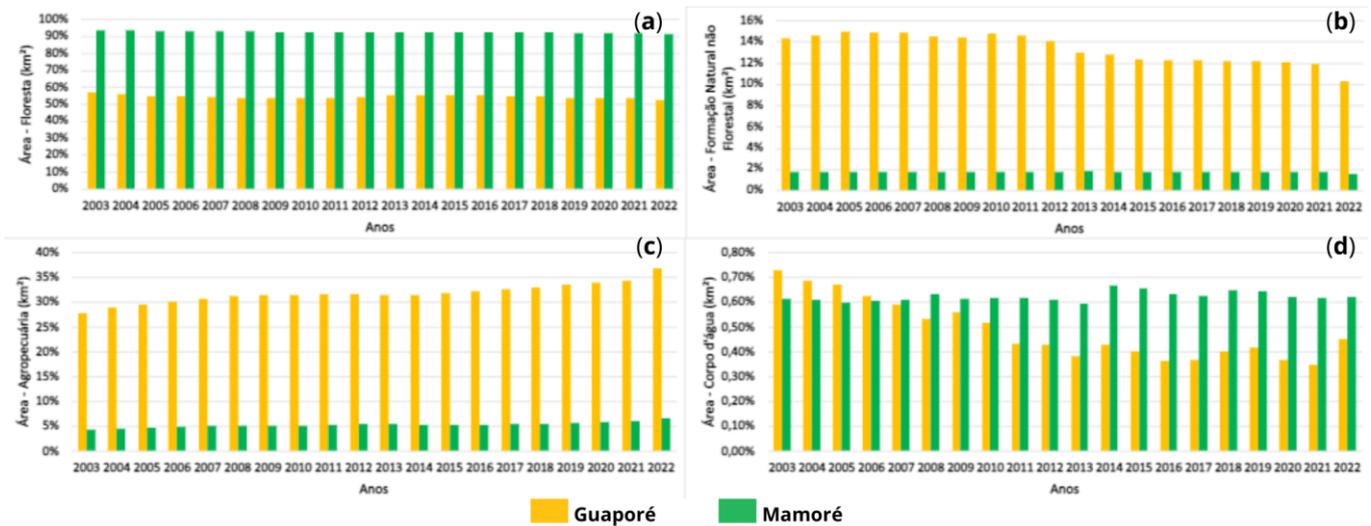


Figura 2: (a) Gráfico da área de cobertura florestal anual, (b) Gráfico da área de formação natural não florestal anual, (c) Gráfico da área da agropecuária anual e (d) Gráfico da área de corpos d'água anual (2003-2022).

Em paralelo, observa-se um crescimento da área de classe agropecuária em ambas as regiões, entretanto, na Mamoré percebe-se que entre 2005 e 2018 a área de agropecuária (pastagem) se manteve praticamente a mesma, equivalente a 5% de sua área total, crescendo nos anos seguintes e chegando a 1.543 km² em 2022, o que corresponde a 7% do seu território (Figura 2c). Já na região do Rio Guaporé, verifica-se um maior crescimento da área destinada à classe agropecuária (pastagem e agricultura), passando de 27.132 (2003) para 35.953 km² (2022), representando 36,85% da área total da bacia. Ao analisar a área de corpo d'água (Figura 2d), percebe-se que a região do Mamoré apresenta pouca variação nessa classe, permanecendo, ao longo dos 20 anos de estudo, em torno de 150 km², o que corresponde a 0,6% dessa região. Na região do Guaporé, observa-se uma variação no período estudado, destacando a redução da área de corpo d'água, passando de 711 (2003) para 439 km² (2022), correspondendo a 0,45% da área total da bacia. Os resultados de uso e cobertura do solo se assemelham aos resultados de estudos desenvolvidos em outras regiões do bioma Amazônia como Silva et al. (2023) e Louzada e Ribeiro (2019), que destacam que a classe floresta perdeu área e que as classes agrícola e pastagem aumentaram ao longo dos anos na Amazônia Legal Brasileira, devido ao avanço da agricultura e da extração de madeira.

A partir da análise espaço-temporal do uso e cobertura do solo (Figura 3 e 4), é possível identificar a predominância da cobertura florestal na Bacia Hidrográfica do Rio Mamoré, com o crescimento da área de pastagem no sul dessa bacia, intensificado principalmente entre 2019 e 2022. Na Bacia Hidrográfica do Rio Guaporé, verifica-se a redução da cobertura florestal e crescimento área de pastagem, principalmente, na região do estado de Mato Grosso. Além disso, constatou-se uma diminuição da área dos corpos d'água da bacia, sobretudo a partir do ano de 2011. Segundo o MapBiomass (2021), ao analisar a superfície coberta de água de 1985 a 2020, constata-se uma tendência de perda em todos os biomas brasileiros, destacando-se o estado de Mato Grosso, que ocupa o segundo lugar no ranking de maior perda, com uma redução de 530 mil hectares, atrás apenas do Mato Grosso do Sul.

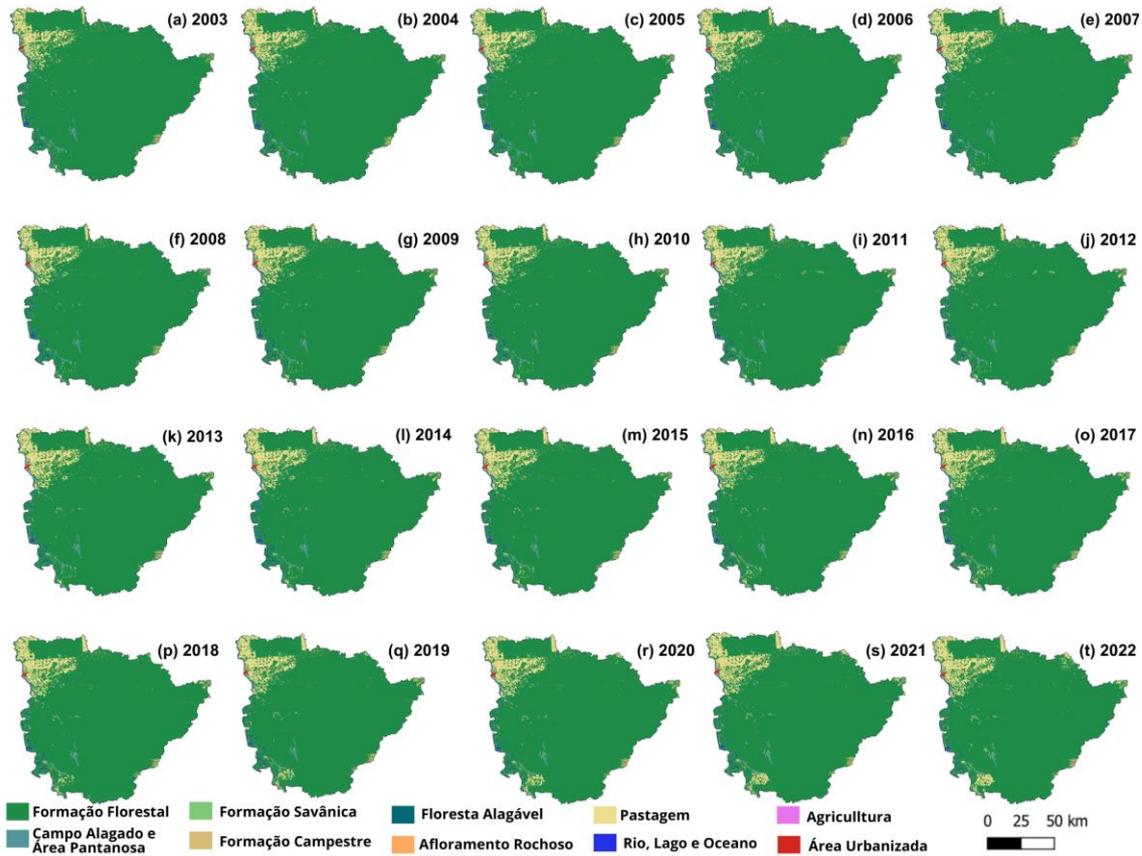


Figura 3: Mapas de uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Mamoré (2003-2022)

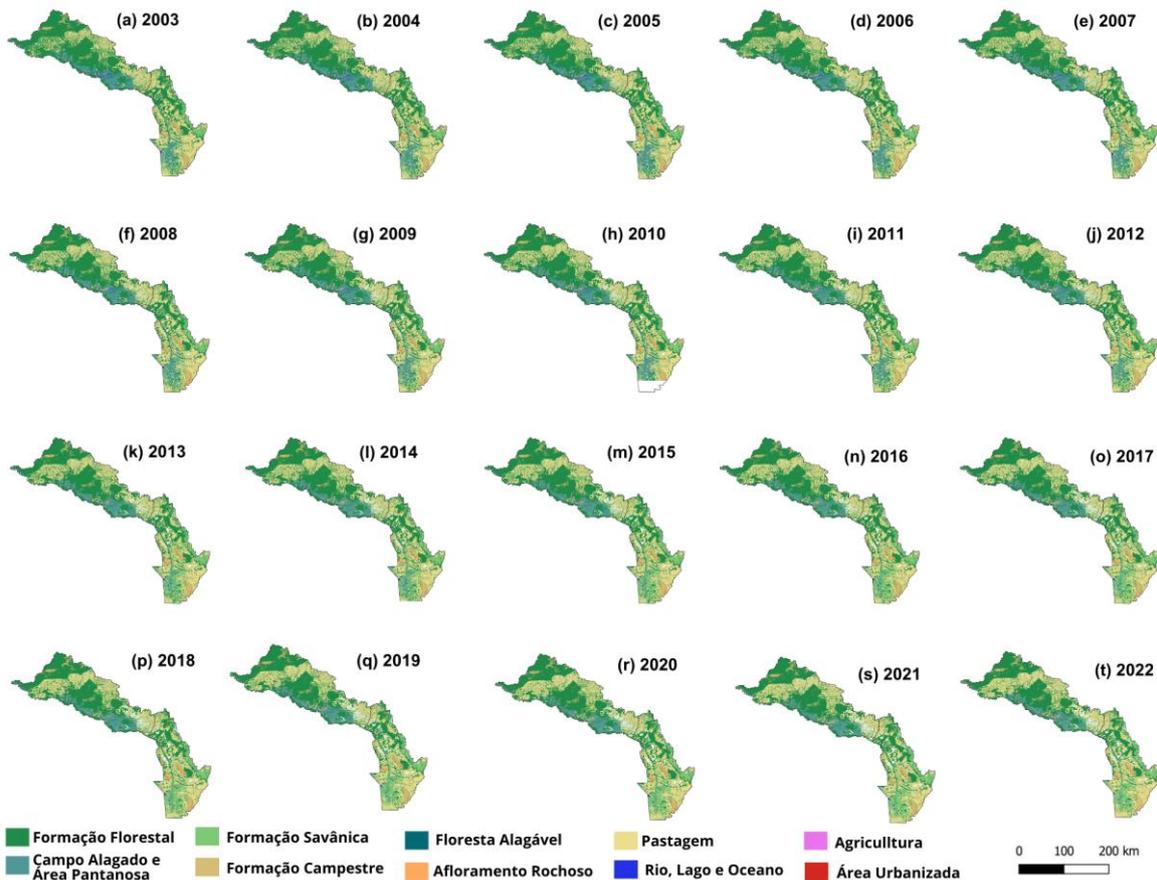


Figura 4: Mapas de uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Guaporé (2003-2022)

A Figura 5a apresenta a precipitação média mensal para as áreas de estudo no período de 2003 a 2022. Consta-se que em ambas as bacias hidrográficas, os meses mais chuvosos são dezembro, janeiro, fevereiro e março, com precipitações médias superiores a 250 mm, que são ligeiramente maiores na Bacia Hidrográfica do Rio Guaporé. Os menores volumes precipitados são registrados nos meses de junho, julho e agosto, com médias inferiores a 50 mm. A Figura 5b mostra a precipitação anual para as duas bacias nos 20 anos analisados, onde se observa que a menor e a maior precipitação média foram registradas na Bacia do Rio Mamoré, em 2012 e 2014, respectivamente.

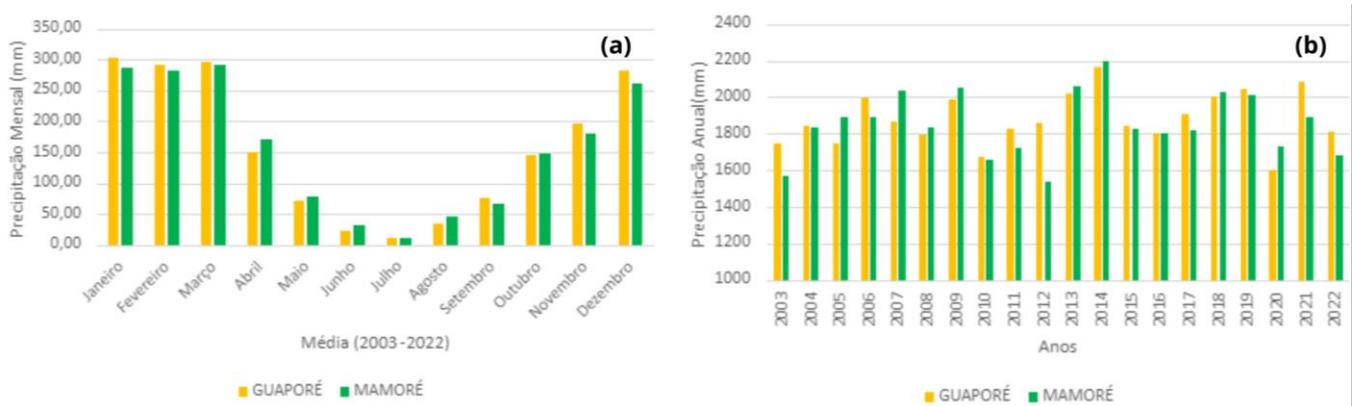


Figura 5: (a) Gráfico da precipitação média mensal e (b) Gráfico da precipitação anual (2003-2022)

As Figuras 6 e 7 mostram a distribuição espacial da precipitação anual das Bacias Hidrográficas do Rio Mamoré e Guaporé, respectivamente. Verifica-se que a região nordeste da Bacia do Mamoré registou as maiores precipitações em todos os anos do estudo, já as menores precipitações nessa bacia foram observadas na região limítrofe com a Bolívia. Através da análise dos mapas, é possível perceber que, com exceção dos anos 2003, 2010 e 2012, todos os anos apresentaram predominantemente precipitações superiores a 1.800 mm na Bacia do Rio Mamoré. Já na Bacia do Rio Guaporé, as menores precipitações anuais foram observadas na região do Estado de Mato Grosso, sendo identificadas na maioria dos anos precipitações entre 625 e 1250 mm.

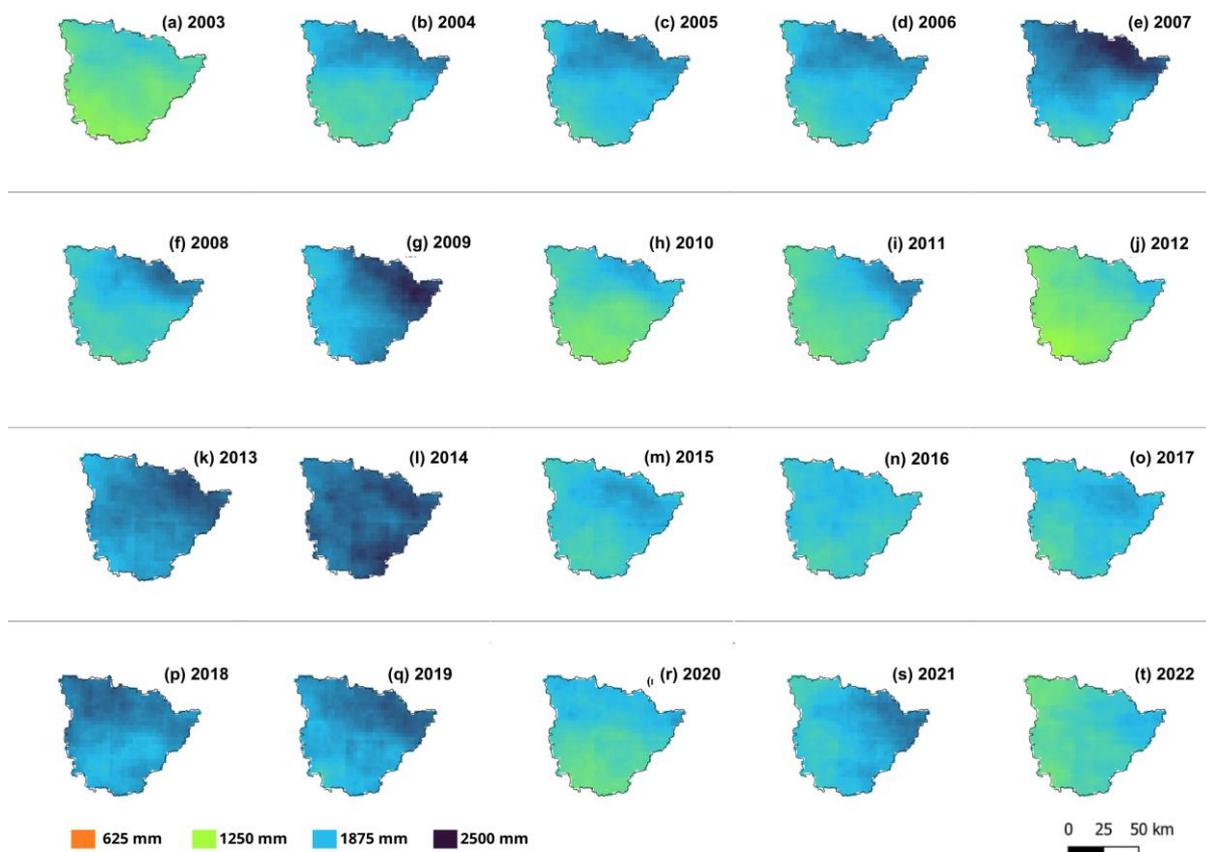


Figura 6: Mapas da precipitação anual na Bacia Hidrográfica do Rio Mamoré (2003-2022)



Comparando as precipitações das duas áreas (Figura 6 e 7), observa-se que as precipitações médias mensais na região do Guaporé apresentam maior amplitude, em relação a do Mamoré, sendo 292 mm e 277 mm, respectivamente. Os resultados obtidos neste estudo corroboram os apresentados por Silva et al. (2023), destacando que áreas com maior ocorrência de desmatamento registram menores valores de precipitação. Ao relacionar os mapas da distribuição da precipitação com o uso e cobertura do solo, percebe-se que os maiores volumes de precipitação foram registrados em áreas de cobertura florestal, enquanto que os menores volumes foram registrados em áreas de cobertura não florestal.

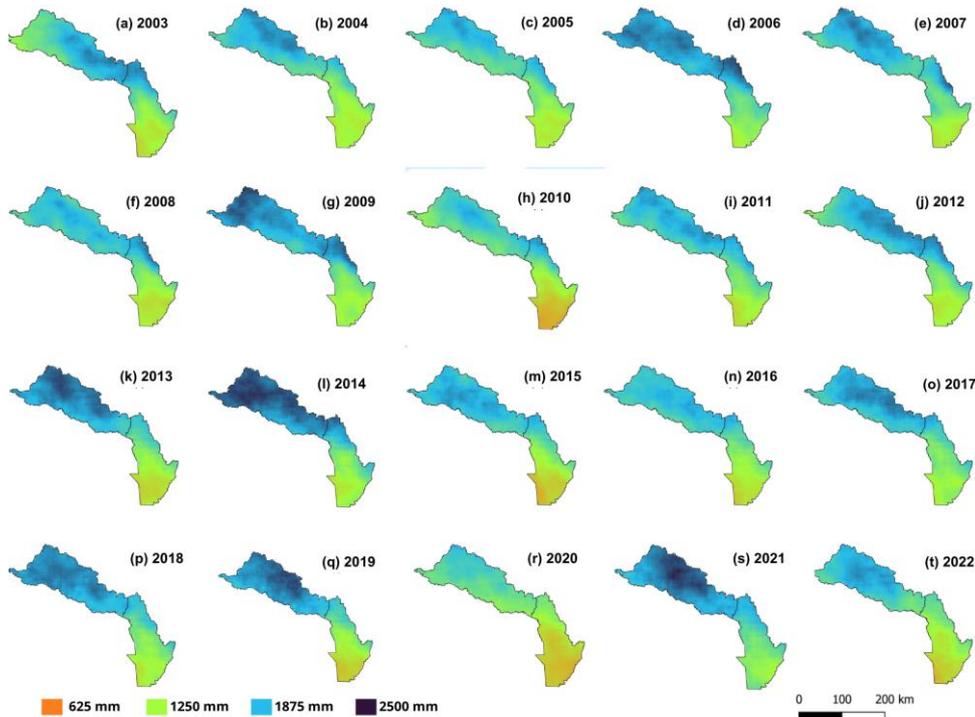


Figura 7: Mapas da precipitação anual na Bacia Hidrográfica do Rio Guaporé (2003-2022)

Do ponto de vista da ET (Figura 8) percebeu-se que nos meses de janeiro e dezembro, na área do Guaporé, a ET média foi superior a 100 mm. Já na área do Mamoré, esse valor de ET superior a 100 mm foi registrado apenas no mês de outubro. Na escala anual, a ET é sempre maior na Bacia do Guaporé, exceto em 2010, 2011 e 2020, conforme pode-se observar na figura 8b.

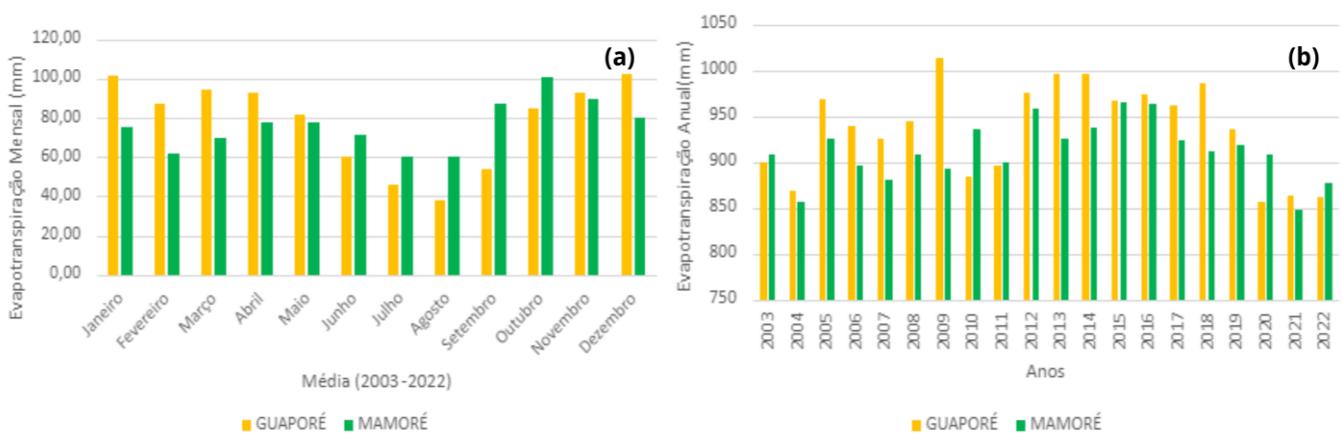


Figura 8: (a) Gráfico da ET média mensal e (b) Gráfico da ET anual (2003-2022)

Nas Figuras 9 e 10, observa-se os mapas da ET média diária da Bacia Hidrográfica do Rio Mamoré e Guaporé, respectivamente. Os dados foram agrupados a cada 5 anos. Através da análise espaço-temporal da ET média diária, percebe-se uma redução dos valores, nos últimos 5 anos, em ambas as bacias. Observa-se também que na Bacia do Rio Mamoré a ET é



maior na região limítrofe com a Bolívia, enquanto na área do Guaporé a ET foi maior na parte superior da bacia, no limite com as bacias hidrográficas do território nacional. Ao relacionar os mapas de uso e cobertura do solo com a precipitação anual e a ET diária, constata-se que as áreas classificadas como pastagem apresentam menor precipitação e maior ET, quando comparados com as demais áreas. Essas tendências sugerem que a alteração do uso da terra não só implica mudanças climáticas regionais e globais (Cohen et al., 2020), mas podem envolver uma alteração local do ciclo da água.

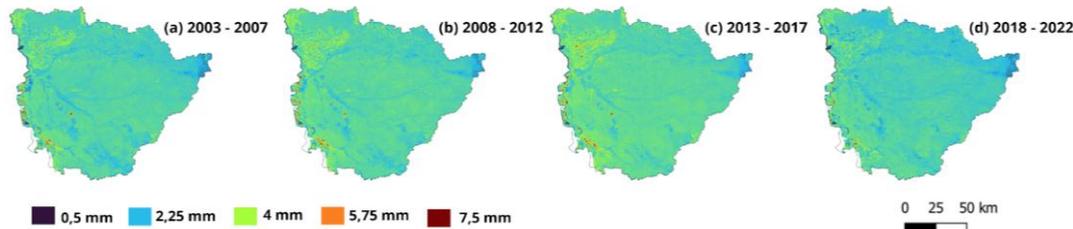


Figura 9: Mapas da ET média diária na Bacia Hidrográfica do Rio Mamoré agrupadas a cada 5 anos.

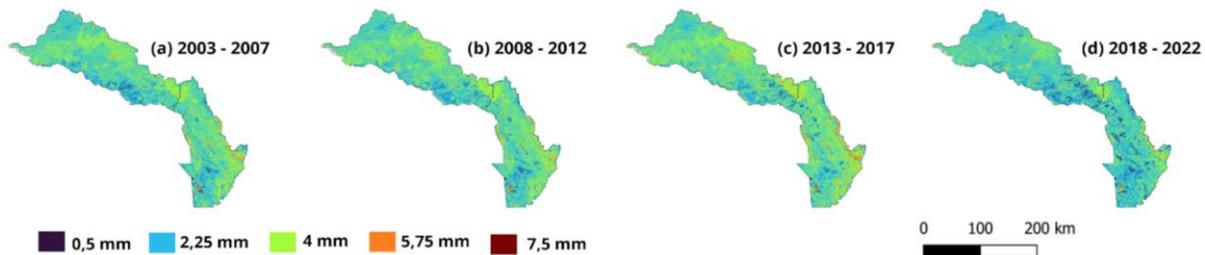


Figura 10: Mapas da ET média diária na Bacia Hidrográfica do Rio Guaporé agrupadas a cada 5 anos.

Os gráficos de dispersão (Figura 11) mostram a relação entre o uso da ocupação do solo e duas variáveis climáticas-chave, evapotranspiração e precipitação, nas regiões estudadas. Para a bacia do rio Mamoré, observa-se um R-quadrado de 0.2253 para a relação entre uso de ocupação do solo e evapotranspiração, indicando que aproximadamente 22.53% da variação na evapotranspiração pode ser explicada pelo padrão de uso do solo. No que se refere à relação entre uso de ocupação do solo e precipitação, o R-quadrado é de 0.3294, o que sugere que cerca de 32.94% da variação na precipitação pode ser atribuída ao padrão de uso do solo. Esses resultados apontam para uma relação moderada entre o uso do solo e ambas as variáveis climáticas na bacia do rio Mamoré, com uma influência relativamente maior na precipitação do que na evapotranspiração. Já na bacia do rio Guaporé, os resultados também revelam uma associação significativa entre o uso da ocupação do solo e as variáveis climáticas estudadas. O R-quadrado para a relação entre uso de ocupação do solo e evapotranspiração é de 0.2559, indicando que aproximadamente 25.59% da variação na evapotranspiração pode ser explicada pelo padrão de uso do solo. Para a relação entre uso de ocupação do solo e precipitação, o R-quadrado é de 0.1951, o que sugere que cerca de 19.51% da variação na precipitação pode ser atribuída ao padrão de uso do solo na bacia do rio Guaporé. Esses resultados evidenciam uma associação significativa, porém moderada, entre o uso do solo e as variáveis climáticas na bacia do rio Guaporé. Dessa forma, os gráficos de dispersão e os valores de R-quadrado fornecem insights importantes sobre a relação entre o uso da ocupação do solo e as variáveis climáticas nessas duas bacias hidrográficas, destacando a complexa interação entre os padrões de uso da terra e os processos climáticos em diferentes regiões.

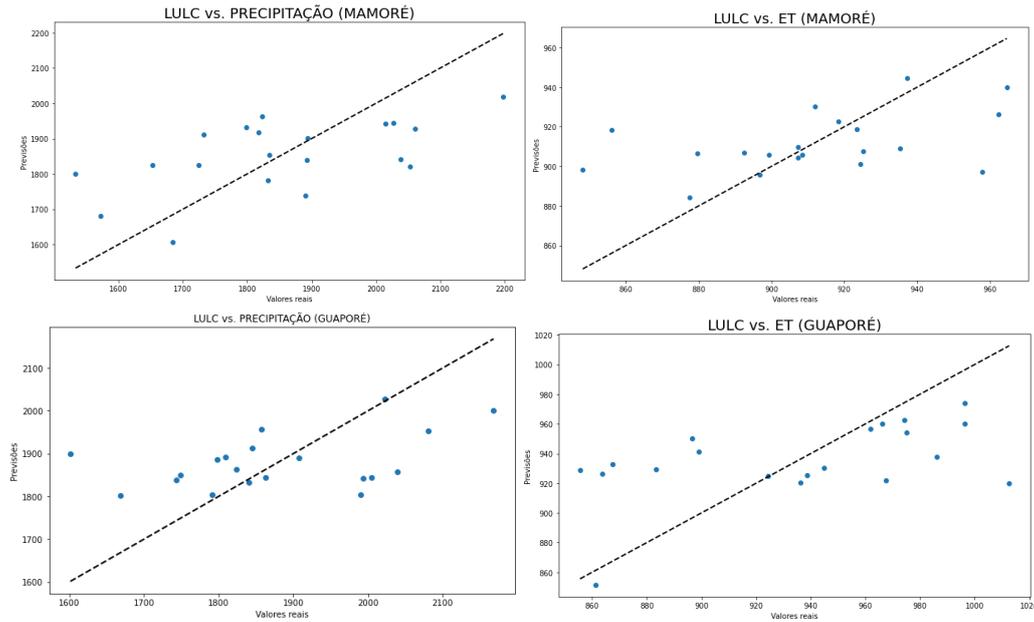


Figura 11: Gráficos de dispersão do uso e cobertura do solo versus a evapotranspiração e a precipitação das Bacias Hidrográficas do Rio Mamoré e Guaporé (2003-2022).

O mapa de calor da correlação entre as variáveis na bacia do rio Mamoré e na bacia do rio Guaporé (Figura 12) fornece *insights* valiosos sobre as relações entre os diferentes fatores ambientais presentes nessas regiões. Na bacia do rio Mamoré, observa-se uma correlação negativa (-0,13) entre a precipitação e a evapotranspiração, o que sugere uma relação inversa entre essas duas variáveis climáticas: períodos de maior precipitação tendem a estar associados a menores taxas de evapotranspiração, e vice-versa. A cobertura florestal e a formação natural não florestal apresentam correlações próximas a zero, indicando uma fraca associação com a precipitação e a evapotranspiração. Por outro lado, a agropecuária apresenta uma correlação positiva leve (0,04) com a precipitação, sugerindo uma possível influência dessa atividade no regime de chuvas. O corpo d'água exibe a correlação mais forte (0,3) com a precipitação, sugerindo que os corpos d'água são diretamente afetados pela quantidade de precipitação. Já na bacia do rio Guaporé, verifica-se uma correlação positiva moderada (0,47) entre a precipitação e a evapotranspiração, indicando uma relação direta entre essas duas variáveis climáticas: anos de maior precipitação estão associados a maiores taxas de evapotranspiração, e vice-versa. A cobertura florestal mostra uma correlação fraca (0,068) com a precipitação, enquanto a formação natural não florestal exibe uma correlação negativa fraca (-0,21). A agropecuária apresenta uma correlação positiva (0,19) com a precipitação, sugerindo uma influência dessa atividade no regime de chuvas. O corpo d'água tem uma correlação negativa (-0,25) com a precipitação, o que pode ser devido ao efeito de escoamento superficial das águas pluviais. Essas correlações destacam a complexa interação entre os diferentes fatores ambientais nas bacias do rio Mamoré e do rio Guaporé, e fornecem informações importantes para a compreensão dos processos climáticos e hidrológicos nessas regiões.

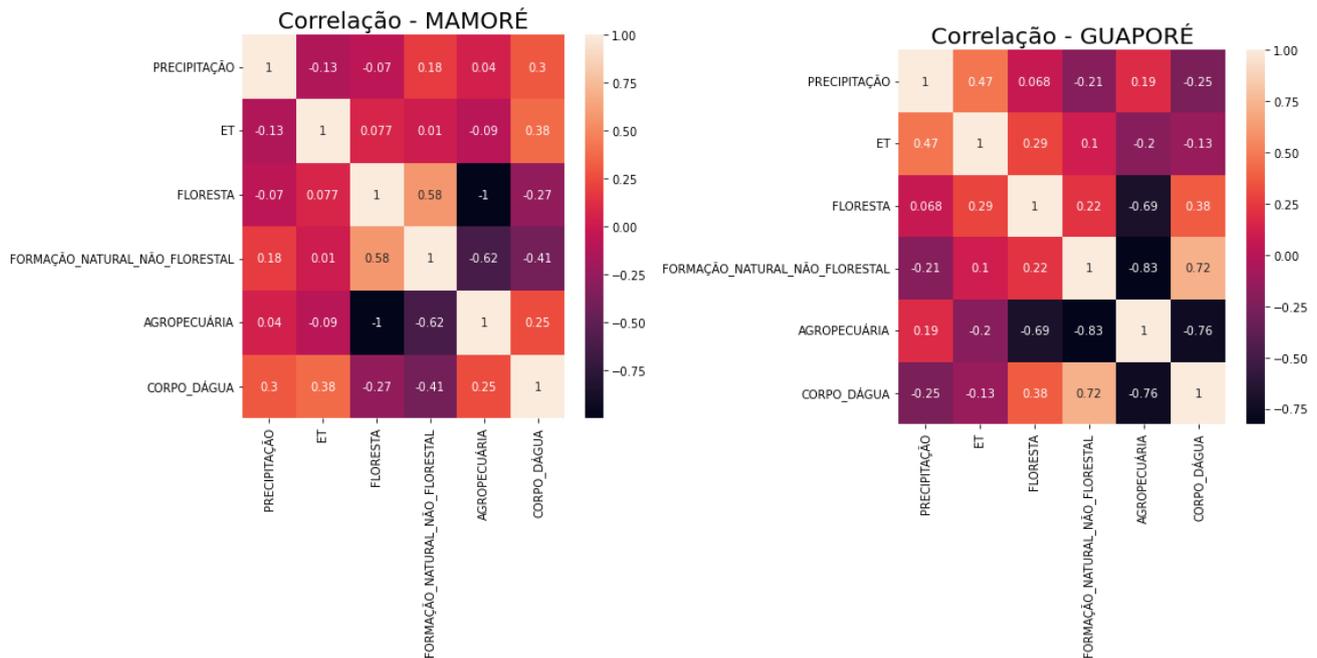


Figura 12: Mapa de calor das correlações entre o uso e cobertura do solo, a evapotranspiração e a precipitação das Bacias Hidrográficas do Rio Mamoré e Guaporé (2003-2022).

Considerações Finais

Este estudo relacionou o uso e cobertura da terra, a precipitação anual e a ET média diária em duas bacias hidrográficas da Amazônia Legal Brasileira no período de 2003 a 2022. Os resultados mostraram que as áreas que não possuem cobertura florestal apresentaram, ao longo dos anos, os menores volumes precipitados, já as regiões com área de floresta registraram os maiores volumes anuais de chuva no período de estudo. Observou-se que a área classificada como curso d'água teve uma redução durante os 20 anos analisados. Essa diminuição pode refletir uma aridificação do solo devida a alterações de fluxo de P ou de ET, ou um uso mais importante para a irrigação de novas áreas de cultura/pastagem resultando do desmatamento. Com base nos resultados da análise de correlação e gráficos de dispersão nas bacias hidrográficas dos rios Mamoré e Guaporé, observa-se a variação no coeficiente de determinação (R-quadrado) entre o uso de ocupação do solo e os fatores climáticos, sugerindo influências diferenciadas conforme a região. Na bacia do rio Mamoré, há indícios de uma influência significativa das práticas de uso da terra na precipitação, possivelmente associada a mudanças como desmatamento. Por outro lado, na bacia do rio Guaporé, embora a influência do uso de ocupação do solo seja menos expressiva, há uma relação mais forte com a evapotranspiração, destacando um papel significativo das práticas de uso da terra na regulação desse processo. Esses resultados ressaltam a importância de considerar a relação entre o uso e ocupação do solo e os processos climáticos na gestão dos recursos naturais na escala local, indicando a necessidade de estudos mais aprofundados para desenvolver estratégias adaptativas e mitigadoras diante das mudanças ambientais globais.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), a Universidade Federal da Paraíba (UFPB) pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

- Birhanu, Dereje; Kim, Hyeonjun; JANG, Cheolhee. 2019. Effectiveness of introducing crop coefficient and leaf area index to enhance evapotranspiration simulations in hydrologic models. *Hydrological Processes*, v. 33, n. 16, p. 2206-2226.
- Cavalcante, R., Ferreira, D., Pontes, P., Tedeschi, R., Wanzeler Da Costa, C., De Souza, E., 2020. Evaluation of extreme rainfall indices from CHIRPS precipitation estimates over the Brazilian Amazonia. *Atmos. Res.* 238, 104879.
- Claudino, C. M. de A., Coelho, V. H. R., Patriota, E. G., Bertrand, G. F., Almeida, C. das N. 2024. ESTIMET: a new algorithm for the Evolution and Spatial-Temporal Improvement of MODIS Evapotranspiration at finer spatial resolution and under all sky conditions - Validation over tropical biomes. Preprint, to be submitted in 2024.
- Cohen, J., Zhang, X., Francis, J., et al., 2020. Consensos divergentes sobre o Ártico influência da amplificação no inverno rigoroso de latitudes médias. *Nat. Clim. Chang.* 10, 20–29.



- De Oliveira, Juarez Ventura et al. 2018. Differences in precipitation and evapotranspiration between forested and deforested areas in the Amazon rainforest using remote sensing data. *Environmental earth sciences*, v. 77, n. 6, p. 1-14.
- Funk, Chris et al. 2015. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific data*, v. 2, n. 1, p. 1-21.
- Haghtalab, Nafiseh et al. 2020. Evaluating spatial patterns in precipitation trends across the Amazon basin driven by land cover and global scale forcings. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 140, n. 1, p. 411-427.
- Kich, Elisa De Mello. 2018. Calibração automática do modelo de estimativa de evapotranspiração por sensoriamento remoto (SEBAL). Porto Alegre, p.102.
- Li, Jun et al. A review of remote sensing for environmental monitoring in China. *Remote Sensing*, v. 12, n. 7, p. 1130, 2020.
- Lopez, Santiago. 2022. Deforestation, forest degradation, and land use dynamics in the Northeastern Ecuadorian Amazon. *Applied Geography*, v. 145, p. 102749.
- Louzada, V.M., Ribeiro, C.B.M., 2019. Impacts of land-use change on southeast Amazonia basin streamflow. *Ambiente e Agua* 14 (2). https://doi.org/10.4136/ambi_agua.2303.
- Marengo, J.A.; Espinoza, J.C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: Causes, trends and impacts. *Int. J. Climatol.* 2015, 36, 1033–1050.
- Maurano, Luis Eduardo Pinheiro; Escada, Maria Isabel Sobral; Renno, Camilo Daleles. 2019. Padrões espaciais de desmatamento e a estimativa da exatidão dos mapas do PRODES para Amazônia Legal Brasileira. *Ciência florestal*, v. 29, p. 1763-1775.
- Miro, M.E.; Famiglietti, J. S. 2018 Downscaling GRACE remote sensing datasets to high-resolution groundwater storage change maps of California's Central Valley. *Remote Sensing*, v. 10, n. 1.
- Moreira, Adriana Aparecida et al. 2019. Balanço hídrico no pantanal usando dados de sensoriamento remoto. *R. Ra'e Ga*, v. 46, n. 3, p. 20-32.
- Monteith, J. L. Evaporation and environmental. In: SYMP. SOC. EXPL. BIOL. p. 205- 234, 1965.
- Mu, Ye; Jones, Charles. An observational analysis of precipitation and deforestation age in the Brazilian Legal Amazon. *Atmospheric Research*, v. 271, p. 106122, 2022.
- Mu, Q.; Zhao, M.; Running, S. W. 2011. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment*, v. 115, n. 8, p. 1781–1800.
- Neves, Ak; koerting, Ts; fonseca, Lmg; escada, Mis. 2020. Avaliação dos dados TerraClass e MapBiomas sobre legenda e concordância cartográfica para o bioma Amazônia brasileira. *Acta Amazonica (Epub Ahead of Print)*. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201900981>
- Pan, Suli et al. Integration of remote sensing evapotranspiration into multi-objective calibration of distributed hydrology–soil–vegetation model (DHSVM) in a humid region of China. *Water*, v. 10, n. 12, p. 1841, 2018.
- Projeto MapBiomas – Coleção 8.0 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil, acessado em janeiro de 2024 através do link: <https://brasil.mapbiomas.org/downloads/>
- Ravanelli, Roberta et al. Monitoring the impact of land cover change on surface urban heat island through Google Earth Engine: Proposal of a global methodology, first applications and problems. *Remote Sensing*, v. 10, n. 9, p. 1488, 2018.
- Rocha, Vinícius Machado; Correia, Francis Wagner Silva; Fonseca, Paula Andrea Morelli. 2015. Precipitation recycling in the Amazon: a review study. *Volume 30, Número 1, Pags. 59-70*.
- Silva, C. De O. F.; Jandreice Magnoni, P. H. ; Lilla Manzione, R. . 2021. Orbital remote sensing for evapotranspiration modeling: theoretical overview and applications in cloud computing. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, Tup, v. 15, n. 3, p. 425–468.



Silva, R.M.da, Lopes, A.G. and Santos, C.A.G. 2023. "Deforestation and fires in the Brazilian Amazon from 2001 to 2020: Impacts on rainfall variability and land surface temperature," Journal of environmental management, 326, p. 116664.

Torres-Batló, Juan; Martí-Cardona, Belén. Precipitation trends over the southern Andean Altiplano from 1981 to 2018. Journal of Hydrology, v. 590, p. 125485, 2020

Weisse, m; Goldman, E. Perda de floresta permaneceu teimosamente alta em 2021. World Resources Institute, 2022.

Wiekenkamp, Inge et al. Changes in measured spatiotemporal patterns of hydrological response after partial deforestation in a headwater catchment. Journal of hydrology, v. 542, p. 648-661, 2016.

Wu, Yu et al. Do forests provide watershed services for farmers in the humid tropics? Evidence from the Brazilian Amazon. Ecological Economics, v. 183, p. 106965, 2021.



AS FERRAMENTAS DO SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL/CPRM NO AUXÍLIO AOS INSTRUMENTOS DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

1Mauricio Mattos dos Santos, 2Décio Tubbs Filho

1 Universidade do Estado do Rio de Janeiro, e-mail: mauricio.santos@profagua.uerj.br; 2 Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, e-mail: decio.tubbs@profagua.uerj.br

Palavras-chave: Serviço Geológico do Brasil/CPRM; Instrumentos de Gestão; Monitoramento de Águas Subterrâneas

Resumo

O papel do Serviço Geológico do Brasil/CPRM nos instrumentos de gestão em águas subterrâneas destaca-se como fundamental para o monitoramento e gerenciamento sustentável desses recursos hídricos. O SGB/CPRM desempenha um papel ativo na pesquisa, avaliação e mapeamento de aquíferos em todo o território nacional.

Desde a década de 1970, a CPRM iniciou estudos relacionados aos recursos hídricos, concentrando-se na avaliação e no mapeamento de aquíferos brasileiros. Nas décadas seguintes, ampliou suas atividades, incluindo a caracterização de bacias hidrográficas e mapeamento mais detalhado de aquíferos.

Com a instituição da Política Nacional de Recursos Hídricos em 1997, o SGB/CPRM passou a desempenhar um papel crucial na execução de ações relacionadas à pesquisa e ao monitoramento de recursos hídricos, incluindo as águas subterrâneas. Sua atuação contribuiu para o desenvolvimento de instrumentos de gestão em águas subterrâneas, fornecendo informações geológicas e hidrológicas essenciais para a elaboração de políticas, planos e estratégias voltadas para a utilização racional desses recursos.

Atualmente, o SGB/CPRM continua a desempenhar um papel importante na pesquisa, monitoramento e fornecimento de informações específicas sobre águas subterrâneas. Seus estudos e mapeamentos subsidiaram a gestão eficaz desses recursos, possibilitando a tomada de decisões informadas e contribuindo para a sustentabilidade e preservação dos aquíferos no Brasil.

Este artigo destaca a integração do fator água nas políticas e planos nacionais de desenvolvimento, impulsionada pelo conhecimento gerado através do monitoramento. O acompanhamento atua de maneira preventiva e preditiva, especialmente em relação às mudanças climáticas e eventos extremos, fornecendo informações cruciais para a tomada de decisões.

A Rede Integrada de Monitoramento em Águas Subterrâneas (RIMAS) e o Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), ferramentas implementadas pelo SGB/CPRM, são destacados como instrumentos cruciais na gestão dos recursos hídricos no Brasil. A RIMAS integra diversas estações de monitoramento, proporcionando uma visão holística das condições dos aquíferos, enquanto o SIAGAS representa um avanço tecnológico na organização e disseminação de informações relacionadas às águas subterrâneas.

Essas ferramentas atuam em sinergia, contribuindo para o planejamento estratégico, a implementação de políticas públicas e a preservação dos aquíferos. O SGB/CPRM, por meio da RIMAS e do SIAGAS, fornece subsídios valiosos para a gestão sustentável dos recursos hídricos, possibilitando a mitigação de impactos negativos e promovendo o uso racional desses recursos.

Destaca-se a importância da transparência e sustentabilidade na utilização dos recursos hídricos, contribuindo para a preservação dos aquíferos e o desenvolvimento socioeconômico do Brasil. Ao longo de sua história, o SGB/CPRM consolidou-se como uma referência nacional em pesquisas geológicas e recursos hídricos, desempenhando um papel relevante nos instrumentos de gestão desses recursos por meio de suas ferramentas. O suporte técnico e científico oferecido pela instituição tem sido fundamental para enfrentar os desafios atuais de exploração e uso das águas subterrâneas, estabelecendo uma base sólida para os serviços hidrológicos e contribuindo para a segurança hídrica no país.

Introdução

Quando da criação da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM, atualmente denominada Serviço Geológico do Brasil – SGB/CPRM, a mineração no Brasil encontrava-se em atraso, em relação a outros setores de atividade econômica. A produção mineral do nosso país era reduzida, quando comparada à de outros países de grande área territorial (SGB/CPRM, 2023).

Em simultaneidade com os desafios enfrentados pela área vinculada ao Departamento Nacional de Produção Mineral, o Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica também enfrentava a limitação de recursos para realizar as tarefas essenciais de compreensão do regime dos rios, assim como os estudos subsequentes sobre o potencial hidroelétrico e suas possíveis formas de aproveitamento (SGB/CPRM, 2023).

Se, na área mineral, a situação à época nos levava a uma evolução insatisfatória na indústria de minérios e sua transformação, no campo da hidrologia, que demandava períodos prolongados de observação, existia o risco da implementação de usinas hidroelétricas sem um conhecimento adequado do potencial hidráulico correspondente.



Dessa forma, em consonância com a reestruturação da época, foi estabelecida uma nova entidade, sugerindo-se o nome de "Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais", tendo como objetivo principal a realização das atividades básicas de campo e laboratório que anteriormente eram de responsabilidade do Departamento Nacional da Produção Mineral, do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, da Comissão do Plano do Carvão Nacional e da Comissão Nacional de Energia Nuclear. Além disso, sua missão incluiria a colaboração com o setor privado na pesquisa detalhada das reservas promissoras que tinham sido objeto de investigação preliminar, bem como a suplementação exclusiva no âmbito da pesquisa.

A partir do cenário apresentado, criou-se o SGB/CPRM, por meio do Decreto-Lei nº 765, de 15 de agosto de 1969, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, fortalecendo as atividades de pesquisa e mapeamento geológico e hidrológico, com a missão institucional de produzir e difundir conhecimento geocientífico, abrangendo as áreas de geologia e hidrologia, com excelência, com o propósito de contribuir para aprimorar a qualidade de vida e promover o desenvolvimento sustentável no Brasil

Na década de 1970 foram iniciados os primeiros estudos relacionados aos recursos hídricos, com foco na avaliação e no mapeamento dos aquíferos brasileiros e já nas décadas seguintes de 1980 e 1990, o SGB/CPRM começou a desenvolver estudos relacionados aos recursos hídricos, incluindo a caracterização de bacias hidrográficas e mapeamento de aquíferos (SGB/CPRM, 2023).

Em 1997, foi instituída a Política Nacional de Recursos Hídricos, por meio da Lei nº 9.433/1997, que estabeleceu diretrizes para a gestão dos recursos hídricos no país, com o SGB/CPRM desempenhando o seu papel na execução de ações relacionadas à pesquisa e ao monitoramento desses recursos.

O SGB/CPRM não é especificamente responsável pela gestão dos recursos hídricos no Brasil, mas desempenha um papel fundamental na pesquisa e no levantamento de informações sobre os recursos hídricos e outras questões geológicas, tendo como missão institucional geral e disseminar conhecimento geocientífico (geologia e hidrologia), com excelência, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida e desenvolvimento sustentável.

Assim, com o objetivo de ser um serviço geológico de excelência técnica na geração e disseminação de conhecimento nas áreas geológica, hidrológica e geoambiental, o SGB/CPRM, por meio do Programa Nacional de Hidrologia, realiza diversas atividades, dentre as quais o levantamento básico, administração de base de dados, estudos interpretativos e divulgação de conhecimento geocientífico. Atuando em todo o território nacional, a atividade contribui, por meio de ações abrangentes, para o aumento da oferta hídrica, além de prevenir e corrigir desastres naturais, com foco especial em cheias, secas e riscos geológicos. Dessa forma, cumpre sua missão de disseminar o conhecimento geocientífico para aprimorar a qualidade de vida da população brasileira.

O SGB/CPRM tem como objetivos principais participar do planejamento e coordenação, bem como executar os serviços de hidrologia de responsabilidade da União em todo o território nacional. Além disso, busca estimular a descoberta e aproveitamento dos recursos hídricos, tanto de águas superficiais quanto subterrâneas. O SGB/CPRM orienta, incentiva e colabora com entidades públicas e privadas na realização de pesquisas e estudos voltados para o melhor aproveitamento dos recursos hídricos. A elaboração de sistemas de informações, cartas e mapas que traduzam o conhecimento hidrológico de maneira acessível aos interessados é uma de suas metas. Em ação complementar aos órgãos competentes da administração pública federal, estadual e municipal, colabora em projetos de preservação do meio ambiente. Por fim, realiza pesquisas e estudos relacionados a fenômenos naturais, como deslizamentos, enchentes, secas, desertificação, entre outros, e oferece apoio técnico e científico aos órgãos governamentais em sua área de atuação.

As responsabilidades institucionais do SGB/CPRM no campo dos recursos hídricos abrangem diversas áreas: participar do planejamento, coordenação e execução dos serviços de hidrologia de responsabilidade da União em todo o território nacional; fomentar a descoberta e o aproveitamento dos recursos hídricos, tanto de águas superficiais quanto subterrâneas; orientar, incentivar e colaborar com entidades públicas ou privadas em pesquisas e estudos voltados para a otimização dos recursos hídricos; desenvolver sistemas de informações, cartas e mapas que tornem acessível o conhecimento hidrológico; contribuir em projetos de preservação ambiental, atuando de maneira complementar aos órgãos competentes da administração pública federal, estadual e municipal; realizar pesquisas e estudos sobre fenômenos naturais relacionados à terra, como deslizamentos, enchentes, secas, desertificação, entre outros; e oferecer apoio técnico e científico aos órgãos da administração pública federal, estadual e municipal dentro de sua área de atuação, conforme estabelecido pela Lei Federal nº 8.970 de 28/12/1994.

Assim, no exercício de suas atribuições, a SGB/CPRM, por meio da implementação de seu Programa de Hidrologia, gera informações hidrológicas sistemáticas e de uso diversificado. Essas informações desempenham um papel crucial como subsídio aos instrumentos estabelecidos pela Política Nacional de Recursos Hídricos, conforme delineado na Lei Federal nº 9.433. Tais instrumentos incluem a elaboração de Planos de Recursos Hídricos, a classificação dos corpos d'água em classes de acordo com os usos predominantes, a outorga dos direitos de uso dos recursos hídricos, a cobrança pelo uso desses recursos, a compensação aos municípios e o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos. Essa contribuição do SGB/CPRM é fundamental para estabelecer uma base institucional sólida para os serviços hidrológicos e dentro dessas responsabilidades o SGB/CPRM conduz o Programa Nacional de Hidrologia (SGB/CPRM, 2023), que engloba as tarefas de monitoramento hidrológico, recursos hídricos superficiais e recursos hídricos subterrâneos.

Atualmente o SGB/CPRM continua desempenhando um papel importante na pesquisa, no monitoramento e no fornecimento de informações geológicas e hidrológicas para subsidiar a gestão dos recursos minerais e hídricos no Brasil, sobretudo aos instrumentos de gestão, realizando estudos, mapeamentos e monitoramentos em todo o território nacional, para o planejamento e tomada de decisões em áreas como mineração, recursos hídricos, riscos geológicos e meio ambiente.



Ferramentas de Monitoramento de Informação dos Recursos Hídricos Produzidos Pelo SGB/CPRM

O SGB/CPRM, alinhado com suas atribuições conforme estabelecido na Lei nº 8.970/1994 e reconhecendo a necessidade de aprimorar o conhecimento hidrogeológico dos principais aquíferos do país, planeja e coordena e opera uma rede integrada de monitoramento das águas subterrâneas. Os resultados desse monitoramento constante e ininterrupto possibilita, a médio e longo prazos, a identificação de impactos nas águas subterrâneas decorrentes da exploração ou das práticas de uso e ocupação do solo, bem como a estimativa da disponibilidade do recurso hídrico subterrâneo, entre outras informações relevantes.

A rede de monitoramento proposta tem uma abordagem primariamente quantitativa, focalizando o registro das variações do nível d'água (NA). Instrumentos automáticos para registro do NA foram instalados nos poços de observação, e os dados armazenados são periodicamente coletados. Esses dados são submetidos a processos de consistência e tratamento, sendo posteriormente disponibilizados para consulta.

Embora a rede não tenha como objetivo principal avaliar qualitativamente a água subterrânea, foi implementado um sistema de alerta e controle de qualidade que realiza medições anuais da condutividade elétrica, pH e potencial de oxirredução. Além disso, atende parcialmente aos parâmetros mínimos estabelecidos pela Resolução CONAMA Nº 396 para monitoramento. Na instalação inicial do poço de observação e a cada cinco anos, ou em casos em que haja variação significativa na química da água com base nos parâmetros indicativos, serão realizadas coletas para análises físico-químicas completas, incluindo no mínimo 43 parâmetros inorgânicos, bem como orgânicos voláteis e semivoláteis, de acordo com as condições de uso e ocupação dos terrenos nas proximidades da estação.

Dada a diversidade hidrogeológica do Brasil, juntamente com as significativas disparidades sociais e econômicas que resultam em diferentes demandas por água, tanto em natureza quanto em volume, tornou-se imperativo estabelecer critérios de priorização para a monitorização de aquíferos. Os critérios considerados incluem: 1) natureza sedimentar dos aquíferos; 2) importância socioeconômica da água; 3) uso para abastecimento público; 4) vulnerabilidade natural e riscos associados; 5) representatividade espacial do aquífero; e 6) existência de poços para monitoramento (SGB/CPRM, 2023).

Com base nesses critérios, e considerando demandas específicas identificadas em interação com órgãos gestores, os seguintes aquíferos foram selecionados para o programa de implementação da rede de monitoramento: Açú, Alter do Chão, Areado, Barreiras, Bauru-Caiuá, Beberibe, Boa Vista, Cabeças, Coberturas Cenozoicas, Costeiro, Furnas, Grajau, Guarani, Içá, Itapecuru, Litorâneo, Mauriti, Missão Velha, Parecis Indiviso, Parecis-Rio Ávila, Parecis-Ronuro Pirabas, Poti-Piauí, Prosperança, Ronuro, Salto das Nuvens, Serra do Tucano, Serra Grande, Solimões, Tacaratu, Trombetas, Tucunará e Urucuia. Além disso, para atender aos projetos de investigações hidrogeológicas e hidrológicas desenvolvidos pelo SGB/CPRM, os aquíferos Areado, Fissurados e de Coberturas Cenozoicas no Estado de Minas Gerais também foram incluídos. Destaca-se que outros aquíferos serão gradualmente incorporados à medida que o programa de monitoramento avança (SGB/CPRM, 2023).

A gestão eficiente e sustentável dos recursos hídricos é um desafio crucial em um mundo onde a disponibilidade e qualidade da água enfrentam ameaças constantes. Nesse contexto, o SGB/CPRM desempenha um papel de destaque ao desenvolver e operar ferramentas avançadas de monitoramento e informação dos recursos hídricos. Essas ferramentas, notavelmente o Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) e a Rede Integrada de Monitoramento em Águas Subterrâneas (RIMAS), representam pilares fundamentais para a compreensão, análise e gestão dos aquíferos brasileiros.

O SIAGAS, uma plataforma abrangente, centraliza dados quantitativos e qualitativos, oferecendo uma visão integrada e acessível sobre as águas subterrâneas do país. Essa ferramenta proporciona informações essenciais para a tomada de decisões informadas, promovendo a transparência e a implementação de políticas públicas eficazes no campo dos recursos hídricos. Em paralelo, a RIMAS, ao operar como uma rede integrada de monitoramento, fornece dados contínuos sobre variações do nível d'água, permitindo uma análise mais aprofundada das condições hidrogeológicas em diferentes regiões.

Este artigo explorará a importância vital dessas ferramentas desenvolvidas pelo SGB/CPRM, destacando como o SIAGAS e a RIMAS desempenham um papel crucial na promoção da gestão sustentável dos recursos hídricos. Ao integrar avanços tecnológicos, conhecimento geocientífico e uma abordagem sistemática, essas ferramentas contribuem significativamente para a preservação dos aquíferos, o planejamento estratégico e a promoção do desenvolvimento socioeconômico no Brasil.

Assim, o SGB/CPRM mantém o Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) e a Rede Integrada de Monitoramento em Águas Subterrâneas (RIMAS), duas ferramentas cruciais para o monitoramento e gestão de recursos hídricos, que desempenham um papel de mais alta relevância aos instrumentos de gestão dos recursos hídricos no país.

Rede Integrada de Monitoramento em Águas Subterrâneas (RIMAS)

O projeto de monitoramento RIMAS (Rede Integrada de Monitoramento em Águas Subterrâneas), iniciado em 2009, hoje de caráter permanente, possui como objetivo geral a ampliação do conhecimento hidrogeológico dos aquíferos brasileiros e o acompanhamento das alterações espaciais e temporais na qualidade e quantidade das águas subterrâneas, visando à gestão integrada de recursos hídricos. Além disso, seus objetivos específicos incluem a promoção de uma avaliação confiável da condição quantitativa dos corpos de água subterrânea, estabelecendo avaliações de tendências de longo prazo resultantes de mudanças naturais e atividades humanas. A rede busca também definir o estado qualitativo dos corpos d'água, identificar tendências de crescimento na concentração de poluentes e rebaixamento do nível d'água, avaliar a reversão dessas tendências após a implementação de medidas mitigadoras e estabelecer o grau de interação entre águas subterrâneas e águas superficiais.

A RIMAS desempenha um papel crucial nos instrumentos de gestão dos recursos hídricos, oferecendo uma estrutura eficiente para monitorar e avaliar as condições dos aquíferos em todo o território nacional. Essa iniciativa é fundamental para o desenvolvimento de políticas e estratégias voltadas para o manejo sustentável e a preservação desses recursos hídricos subterrâneos. Essa ferramenta consiste em uma rede de poços de monitoramento distribuídos estrategicamente em diferentes regiões do Brasil. Esses poços são instrumentados para medir parâmetros hidrogeológicos, como níveis piezométricos, qualidade da água subterrânea, temperatura e outros indicadores relevantes. Esses dados são coletados e integrados em um sistema centralizado, permitindo uma análise abrangente das condições dos aquíferos ao longo do tempo.



Figura 1: Estação de Monitoramento de Águas Subterrâneas (Estação de Assis/SP).

Fonte: SGB/CPRM

A importância da RIMAS nos instrumentos de gestão dos recursos hídricos reside na capacidade de fornecer informações precisas e em tempo real sobre a dinâmica das águas subterrâneas. As informações produzidas pela RIMAS são essenciais para os instrumentos de gestão dos recursos hídricos, desempenhando um papel multifacetado nos instrumentos de gestão de recursos hídricos. Suas informações são essenciais para a elaboração de políticas e decisões relacionadas ao uso sustentável de recursos hídricos subterrâneos, proporcionando uma gestão mais eficaz e adaptativa mediante a compreensão da variação dos níveis piezométricos e da qualidade da água. Além disso, os dados coletados pela RIMAS são cruciais para o planejamento estratégico a longo prazo, garantindo a continuidade do fornecimento de água subterrânea, especialmente em regiões onde desempenha um papel crucial no abastecimento hídrico. A rede também exerce um papel vital no monitoramento ambiental, possibilitando a detecção precoce de impactos negativos, como contaminação, e facilitando a implementação de medidas corretivas e preventivas. Adicionalmente, a RIMAS oferece um suporte substancial à pesquisa científica ao fornecer uma sólida base de dados para estudos e pesquisas relacionadas à hidrogeologia, contribuindo assim para o avanço do conhecimento sobre os processos envolvidos nos aquíferos e promovendo o progresso científico.

Os dados resultantes do monitoramento das águas subterrâneas proporcionam uma série de benefícios essenciais, destacando-se a ampliação do conhecimento hidrogeológico, e tem sua divulgação assegurada pelo Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS, desenvolvido e gerenciado pelo SGB/CPRM, que será visto em seguida.

A rede de monitoramento abrange mais de 400 poços distribuídos em 24 aquíferos, englobando tanto a porção livre quanto algumas unidades confinadas e semiconfinadas, além de coberturas sedimentares indiferenciadas e aquíferos cristalinos. Conta com cerca de 100 plataformas dedicadas à coleta automática de dados meteorológicos, incluindo chuva, temperatura e umidade relativa do ar, especificamente projetadas para esse fim. Sua presença abrange 22 unidades federativas brasileiras (SGB/CPRM, 2023).

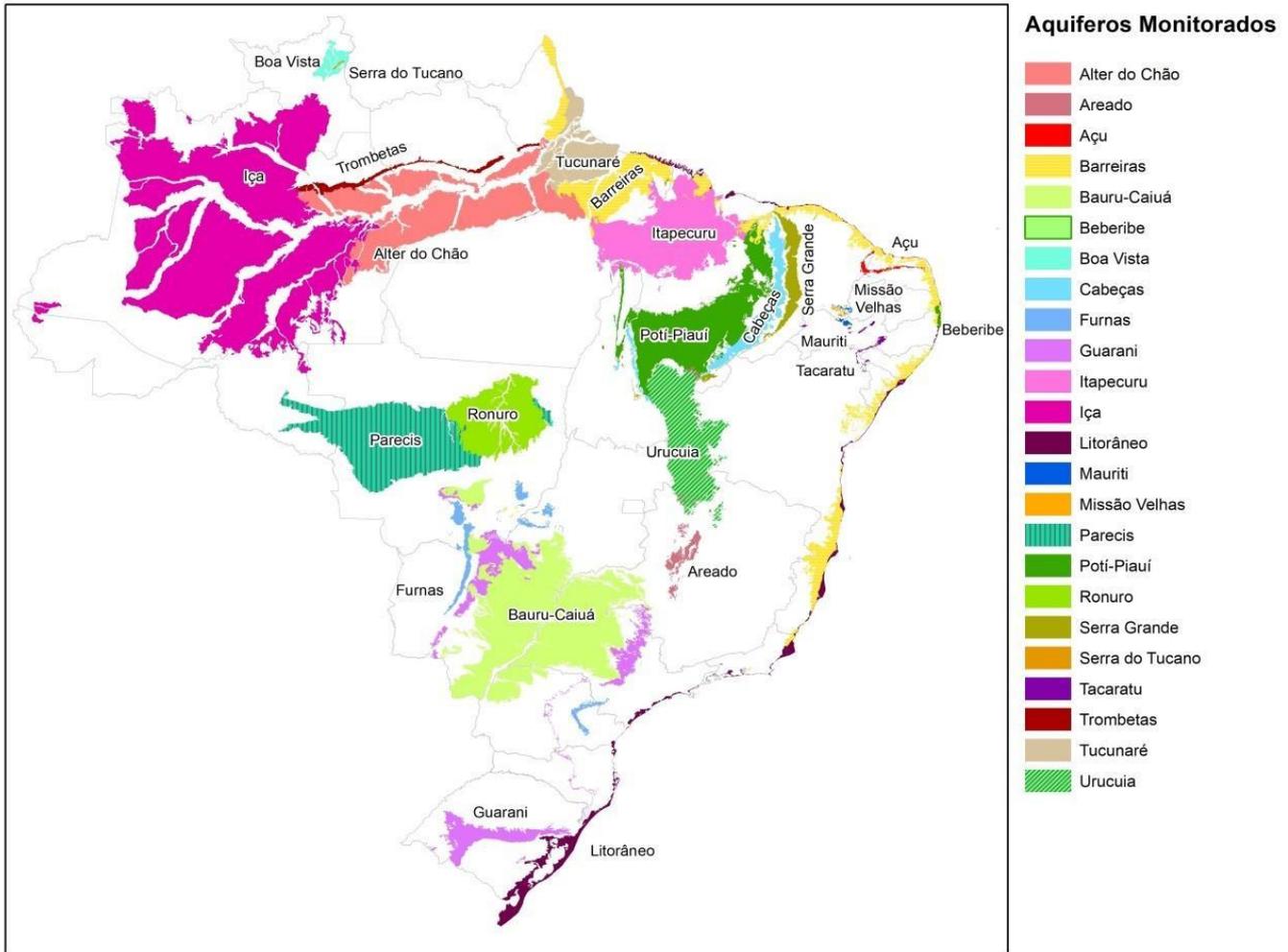


Figura 2: Mapa dos Aquíferos Monitorados pela RIMAS.
Fonte: SGB/CPRM

Em resumo, a RIMAS desempenha um papel fundamental nos instrumentos de gestão dos recursos hídricos ao fornecer dados confiáveis e abrangentes sobre as condições das águas subterrâneas, essenciais para o planejamento, implementação e avaliação da eficácia dos procedimentos de gestão. Essa ferramenta produzida pelo SGB/CPRM contribui significativamente para os instrumentos de gestão e a sustentabilidade e preservação dos recursos hídricos subterrâneos no Brasil.

Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS)

O Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) foi desenvolvido com a finalidade de reunir, verificar, armazenar e oferecer dados e informações georreferenciadas de pontos de água subterrânea. Inicialmente, sua criação visava apoiar a produção de mapas hidrogeológicos integrados ao Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do SGB/CPRM. Posteriormente, a plataforma foi ampliada para atender às necessidades dos usuários ligados à área de recursos hídricos e áreas afins.

O SIAGAS é uma ferramenta fundamental aos instrumentos de gestão dos recursos hídricos, consistindo em um sistema que compila e disponibiliza informações detalhadas sobre os aquíferos brasileiros, oferecendo um panorama abrangente e confiável sobre as águas subterrâneas.

A importância do SIAGAS nos instrumentos de gestão dos recursos hídricos é ampla, primeiramente, fornecendo dados científicos e geocientíficos sobre a distribuição e a qualidade das águas subterrâneas em diferentes regiões do Brasil. Essas informações são cruciais para a elaboração de políticas públicas, planos de gestão e tomadas de decisão relacionadas à exploração sustentável desses recursos.

A recomendação expressa do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) por meio da Moção N. 038, de 7/12/2006, advoga pela adoção do SIAGAS pelos órgãos gestores estaduais, Secretarias dos Governos Estaduais, Agência Nacional de Águas (ANA) e Usuários dos Recursos Hídricos Subterrâneos, propondo ainda a integração entre os sistemas SIAGAS, SNIRH, SINIMA, SIGHIDRO, SNIS e SIPNRH.

O SIAGAS contribui para o entendimento da disponibilidade hídrica subterrânea, auxiliando na identificação de áreas propensas a problemas de escassez ou contaminação. Além disso, ao disponibilizar dados sobre os aquíferos, o sistema permite a implementação de medidas preventivas e corretivas para proteger esses recursos contra práticas inadequadas, como a poluição.



A ferramenta também é essencial para a elaboração de instrumentos de gestão, como os Planos de Recursos Hídricos, que necessitam de informações precisas para a definição de estratégias de uso e conservação das águas subterrâneas. A integração do SIAGAS com outros sistemas e dados hidrológicos contribui para uma visão holística e integrada do ciclo hidrológico, permitindo uma gestão mais eficaz e sustentável dos recursos hídricos.

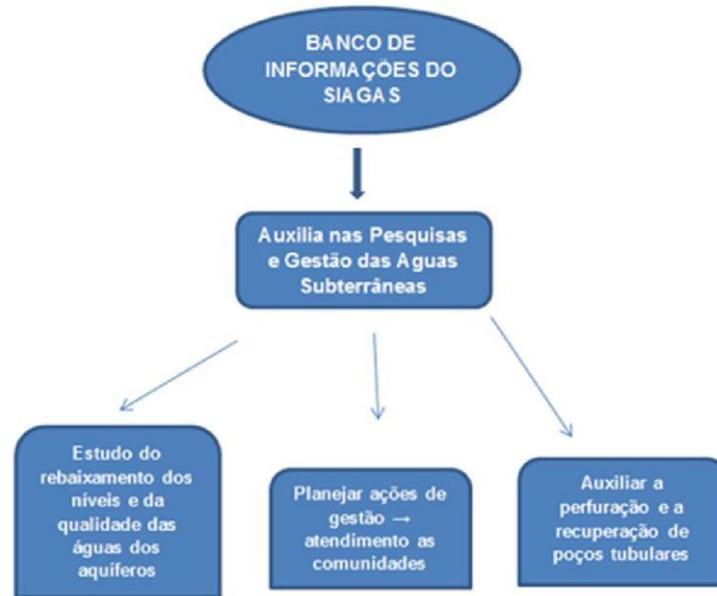


Figura 3: Fluxograma Simplificado mostrando algumas aplicações dos Dados do SIAGAS.
Fonte: SGB/CPRM

Os benefícios destas informações incluem a valorização da Base de Dados de Poços, que se torna um instrumento fundamental para apoiar a gestão racional dos recursos hídricos subterrâneos, fornecendo insumos essenciais para a elaboração de mapas temáticos em hidrogeologia, contribuindo significativamente para a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos.

Além disso, o SIAGAS atua como uma fonte de referência para a sociedade, pesquisadores, órgãos governamentais e empresas que buscam informações confiáveis sobre águas subterrâneas. O acesso a dados transparentes e atualizados promove a conscientização e a participação pública na gestão responsável desses recursos.

Em resumo, o SIAGAS desempenha um papel crucial nos instrumentos de gestão dos recursos hídricos, fornecendo informações precisas, atualizadas e acessíveis sobre os aquíferos brasileiros. Sua contribuição é essencial para o desenvolvimento sustentável e a preservação dos recursos hídricos subterrâneos no país.

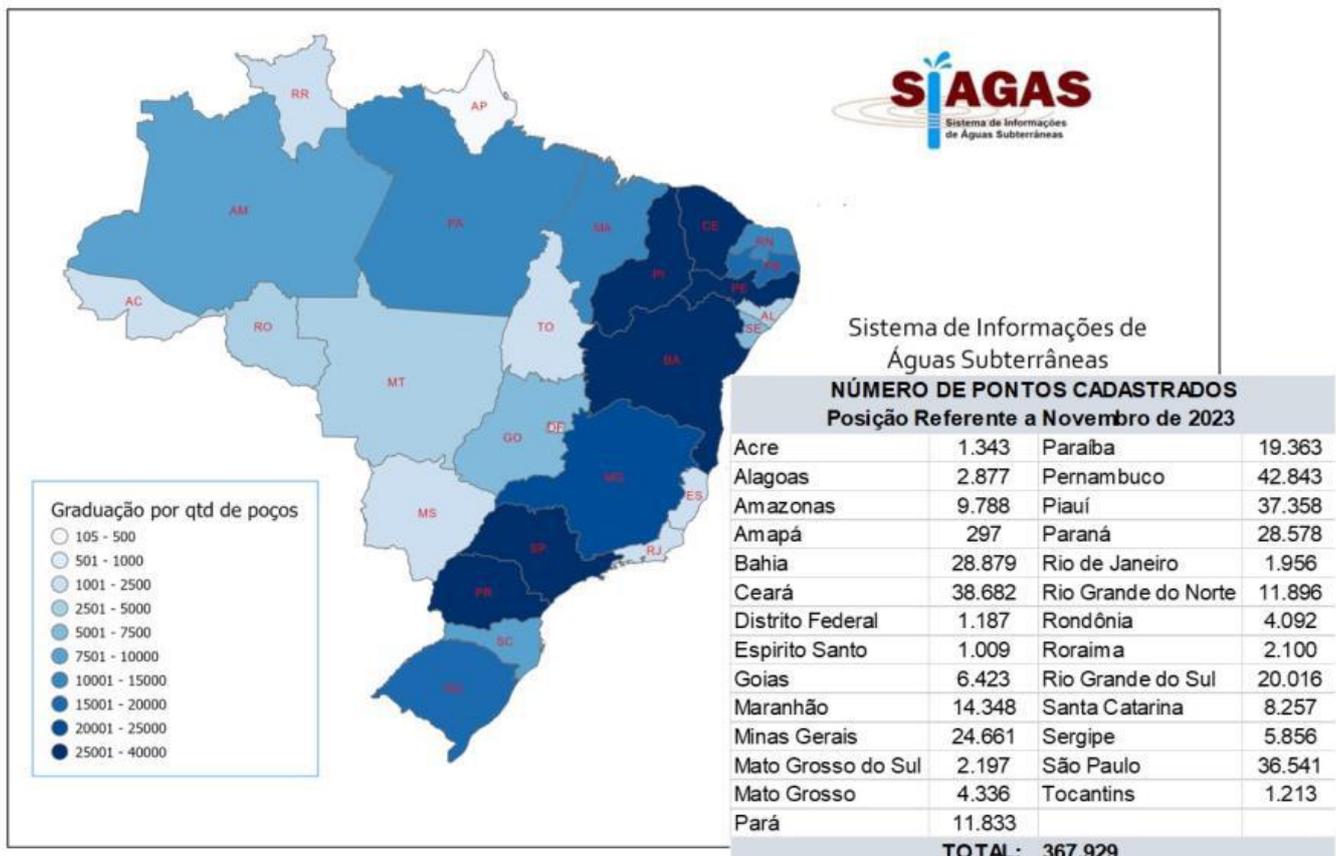


Figura 4: Mapa dos Poços Cadastrados no SIAGAS.

Fonte: SGB/CPRM - Área de abrangência do projeto com informações de pontos d'água cadastrados

Comentários finais

O fator água é integrado às políticas, estratégias e planos nacionais ou estaduais de desenvolvimento com base no conhecimento gerado pelo monitoramento. O monitoramento contribui para o estabelecimento de diagnósticos e prognósticos relacionados a alterações decorrentes das mudanças climáticas, desempenhando uma função preventiva e preditiva. Informações cruciais para a tomada de decisões diante de eventos extremos, como estiagens severas e prolongadas, são fornecidas.

A Rede Integrada de Monitoramento em Águas Subterrâneas (RIMAS) e o Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) desempenham papéis cruciais nos instrumentos de gestão dos recursos hídricos no Brasil, promovendo uma abordagem abrangente e sustentável para o manejo desses importantes recursos. O SGB/CPRM, por meio dessas ferramentas, tem fortalecido significativamente a capacidade do país em compreender, monitorar e gerir as águas subterrâneas.

A RIMAS, ao integrar diversas estações de monitoramento, proporciona uma visão holística das condições dos aquíferos em diferentes regiões do Brasil. Esse sistema permite a coleta sistemática de dados sobre níveis piezométricos, qualidade da água e outros parâmetros relevantes, contribuindo para uma compreensão mais profunda do comportamento e variabilidade dos aquíferos.

O SIAGAS, por sua vez, representa um avanço tecnológico na organização e disseminação de informações relacionadas às águas subterrâneas. Ao centralizar dados e disponibilizá-los de maneira acessível, o sistema facilita a tomada de decisões informadas por parte de gestores, pesquisadores e demais interessados, promovendo uma gestão mais eficiente e transparente dos recursos hídricos subterrâneos.

A importância desses instrumentos se reflete na contribuição essencial para o planejamento estratégico, a implementação de políticas públicas e a preservação dos aquíferos. Com a RIMAS e o SIAGAS, o SGB/CPRM fornece subsídios valiosos para a gestão sustentável dos recursos hídricos, permitindo a mitigação de impactos negativos, a promoção do uso racional e a garantia da disponibilidade desses recursos para as gerações futuras.

Ambos, o SIAGAS e a RIMAS, atuam em sinergia, proporcionando uma abordagem abrangente no que diz respeito à gestão e monitoramento de águas subterrâneas. Essas ferramentas do SGB/CPRM são fundamentais para promover a transparência e a sustentabilidade na utilização desse recurso, contribuindo para a preservação dos aquíferos e o desenvolvimento socioeconômico do Brasil, representando um passo significativo na direção da preservação e gestão eficiente das águas subterrâneas no contexto mais amplo da segurança hídrica no Brasil.

E assim, ao longo de sua história, o SGB/CPRM tem sido uma referência nacional em pesquisas geológicas e recursos hídricos, fornecendo ganhos técnicos e científicos para o desenvolvimento do país, oferecendo um suporte aos estudos



interpretativos em recursos hídricos, facilitando respostas precisas e rápidas diante dos atuais desafios de exploração e uso das águas subterrâneas, gerando informações hidrológicas sistemáticas e de uso diversificado, fundamental para estabelecer uma base institucional sólida para os serviços hidrológicos, tendo um papel relevante para os instrumento de gestão dos recursos hídricos, por meio de suas ferramentas.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Programa de Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFÁGUA), polo Universidade do Estado do Rio de Janeiro pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). **Atlas águas: segurança hídrica do abastecimento urbano**. Brasília. ANA. 2021.

BRASIL. **Lei Federal nº 9.433, 08.01.1997**. Institui a Política e o Sistema Nacional de Recursos Hídricos. Poder Executivo. **Planalto**. Brasília. DF, 09 jan. de 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm. Acesso em: 05 set. 2023.

BRASIL. **Decreto-Lei nº 764, 15.08.1969**. Autoriza a constituição da sociedade por ações Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais-CPRM. Poder Executivo. **Planalto**. Brasília. DF, 16 ago. de 1969. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/1965-1988/De10764.htm.htm. Acesso em: 05 set. 2023.

BRASIL. **Lei Federal nº 8.970, 28.12.1994**. Transforma a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) em empresa pública e dá outras providências. Poder Executivo. **Planalto**. Brasília. DF, 29 dez. de 1994. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1989_1994/18970.htm#:~:text=LEI%20N%C2%BA%208.970%2C%20DE%2028,p%C3%ABblica%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%AAsncias.. Acesso em: 05 set. 2023.

BRASIL. **Lei Federal nº 9.984, 17.07.2000**. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Poder Executivo. **Planalto**. Brasília, DF, 19 jul. de 2000. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9984compilado.htm. Acesso em: 05 set. 2023.

CONANA. **Resolução nº 396, 03.04.2008**. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Ministério do Meio Ambiente. Brasília, DF, 04 abr de 2008. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/wp-content/uploads/sites/13/2013/11/res39608.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2023.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL/CPRM. **Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas: relatório diagnóstico Aquífero Serra Grande, Bacia Sedimentar do Parnaíba**. Mickaelon B. Vasconcelos, Carlos Antônio da Luz, Maria Antonieta Alcântara Mourão, Coord. Belo Horizonte: SGB/CPRM, 2012. Disponível em https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/22234/1/aquifero_serra_grande.pdf. Acesso em: 11 dez. 2023

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL/CPRM. **Relatório SIAGAS 2020**. Valmor Freddo. Belo Horizonte: SGB/CPRM, 2020. Disponível em https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/21996/3/rel_anual_2020_siagas.pdf. Acesso em: 11 dez. 2023

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL/CPRM. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Fernando A.C. Feitosa. Rio de Janeiro: SGB/CPRM, 2020.



CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TAQUARI - TO

**1Helio Lopes Araújo, 2Sergio Nascimento Duarte, 3Vinicius Costa Barreiros,
4Jozé André de Moraes Rodrigues, 5Thaís da Silva Charles, 6 Fernando Campos Mendonça, 7Patricia
Angélica Alves Marques; 8Ediclea Lopes Araújo**

*1 Universidade de São Paulo, e-mail: helio@live.co.uk; 2 Universidade de São Paulo, e-mail: snduarte@usp.br; 3
Universidade de São Paulo, e-mail: viniciusbarreiros75@gmail.com; 4 Instituto Federal da Paraíba, e-mail:
joezandre@ifpb.br; 5 Universidade de São Paulo, e-mail: thaischarles@usp.br; 6 Universidade de São Paulo
e-mail: fernando.mendonca@usp.br; 7 Universidade de São Paulo, e-mail: paamarques@usp.br
8 Universidade Federal do Tocantins, e-mail: ediclea.piassaba@gmail.com*

Palavras-chave: Geomorfologia, hidrologia, sustentabilidade.

Resumo

As áreas de captação de água desempenham um papel crucial no planejamento ambiental e requerem uma avaliação constante, uma vez que os componentes que as constituem estão constantemente sujeitos a alterações resultantes de atividades naturais e humanas. Os dados morfométricos fornecem informações essenciais para a caracterização hidrológica, os quais podem ser utilizados para embasar o planejamento ambiental. Este estudo teve como objetivo apresentar uma análise abrangente das características morfométricas da Bacia Hidrográfica do Rio Taquari, localizada no extremo norte do Estado de Tocantins, região conhecida como “Bico do Papagaio” na cidade de Araguatins. Foram utilizadas técnicas morfométricas para quantificar e descrever as formas, dimensões e distribuição das características físicas da bacia, proporcionando uma compreensão mais profunda de sua configuração geográfica. A abordagem metodológica envolve a utilização de ferramentas cartográficas e geoespaciais, permitindo a identificação de padrões relevantes para o planejamento e gestão sustentável dos recursos hídricos na região. Por meio das análises foram constatadas que a bacia possui forma alongada, com maior escoamento, possuindo baixo-médio risco a enchentes. Através do resultado do fator de forma, indicou menor possibilidade de ocorrência de chuvas intensas na extensão da bacia. Foi constatado também que a bacia em questão é de drenagem de baixa densidade. O rio Taquari, a partir das variáveis, definiu-se como um rio sinuoso, que tem seus canais afluentes encaixados, e com fluxo lento. A hierarquia fluvial é de 5ª ordem, segundo a classificação de Strahler, considerando o canal fluvial a partir do encontro com o rio Araguaia. Os resultados deste estudo contribuem não apenas para o entendimento da geomorfologia da bacia, mas também para a implementação de estratégias eficazes de conservação e manejo ambiental na área do Rio Taquari em Araguatins - TO. Com os resultados obtidos, foi possível criar uma base de dados que espera servir de auxílio na gestão e no planejamento da bacia hidrográfica em referência e para futuras análises e estudo no local.

Introdução

A delimitação territorial da bacia hidrográfica oferece uma abordagem abrangente de diversos conceitos geográficos sob uma ótica sistêmica. A partir dessa unidade espacial, é possível explorar uma variedade de temas, como o ciclo hidrológico, o relevo, a hierarquia fluvial e as consequências das intervenções humanas na utilização e ocupação do solo. Destacam-se as atividades econômicas e o processo de urbanização, que, por sua vez, estão associados a desastres ambientais, como enchentes e deslizamentos, especialmente em áreas urbanas, frequentemente resultantes de uma ocupação desordenada do espaço (Alves, 2019).

A região de captação de água, conhecida como bacia hidrográfica, é caracterizada pela coleta natural de água proveniente da precipitação, sendo direcionada pelos cursos d'água até desaguar no rio afluente. Considerando a água potável como um recurso natural limitado, torna-se essencial adotar princípios, diretrizes e ferramentas adequadas para uma gestão eficaz do ambiente das bacias hidrográficas. Uma abordagem precisa e detalhada para estudá-las envolve a realização de análises morfométricas, um procedimento integrado às análises hidrológicas e ambientais. O principal objetivo dessas análises é abordar questões relacionadas à dinâmica ambiental de uma bacia hidrográfica, utilizando geotecnologias como meio facilitador (Ribeiro et al., 2017).

A avaliação morfométrica em bacias hidrográficas desempenha um papel crucial na identificação e descrição da dinâmica fluvial, juntamente com seus processos hidrológicos associados. A referida dinâmica é diretamente influenciada pelas condições morfoclimáticas específicas dos rios, incluindo chuvas sazonais intensas, tipos de solos presentes e a configuração do relevo, todos contribuindo para a ocorrência de eventos extremos como inundações e enchentes. Esses fenômenos são agravados pelas características do sistema de drenagem, tais como densidade e forma. Diante desses elementos, a análise morfométrica se revela uma ferramenta essencial no contexto do planejamento ambiental para a região, o conhecimento das condições naturais da bacia hidrográfica contribui para identificar a suscetibilidade, potencialidade e fragilidade desses espaços, com isso, utilizou-se as representações morfométricas para relacionar a forma da bacia aos fenômenos hidrológicos (Mendes, 2022).

A utilização da energia, por sua vez, representa as forças que impulsionam o funcionamento do sistema, onde a gravidade é reconhecida como uma forma de energia potencial que se converte em energia cinética durante o escoamento fluvial (Christofolletti, 1980).



A realização da análise abrangente dos índices morfométricos, para identificar os padrões e as tendências específicas que influenciam diretamente a dinâmica fluvial e a distribuição de recursos hídricos, é fundamental na orientação e na tomada de decisões, permitindo que se estabeleçam estratégias de manejo adequadas para enfrentar desafios como enchentes, secas e outros eventos hidrológicos extremo (Gomes, 2016).

Diversas cidades no Brasil e no mundo estão enfrentando diversos problemas relacionados à escassez de informações sobre a água. Destacam-se os processos de inundações, a degradação dos corpos hídricos e, principalmente, a falta de investimentos financeiros do Estado para adaptações e ajustes na infraestrutura dos cenários em relação aos recursos hídricos. Existem evidências observacionais de que extremos hidrometeorológicos, como secas e inundações, estão aumentando globalmente. As observações por satélite têm sido úteis para analisar as tendências desses eventos extremos e outros fatores que influenciam as mudanças no uso da terra (Koop et al., 2022).

A Bacia do Rio Taquari enfrenta desafios decorrentes de questões como a gestão inadequada, falta de saneamento básico, carência de infraestrutura e características físicas peculiares do clima e relevo, incluindo ameaças como enchentes e secas, visto que a referida bacia abastece toda a população da cidade de Araguatins e do entorno que vivem as margens do rio. Diante desse cenário, o objetivo deste estudo foi realizar uma caracterização morfométrica dessa bacia, estimando parâmetros físicos como área total, perímetro total, comprimento axial, coeficiente de compacidade, fator de forma e índice de circularidade, entre outros.

Material e Métodos

A área de estudo está localizada no município de Araguatins situado no extremo norte do Estado do Tocantins, na mesorregião conhecida como “Bico do Papagaio” (Figura 1), às margens do rio Araguaia, distante 660 km de Palmas-TO, com uma população de 31.918 mil habitantes (IBGE, 2022), e inserida na região de transição entre o Cerrado-Amazônia e do MATOPIBA, o clima da região é classificada como C2rA “a” (método de Thornthwaite), de clima úmido a sub úmido. A microbacia do rio Taquari possui uma área de 286,05 km² e inserida na “Bacia Araguaia-Tocantins”.

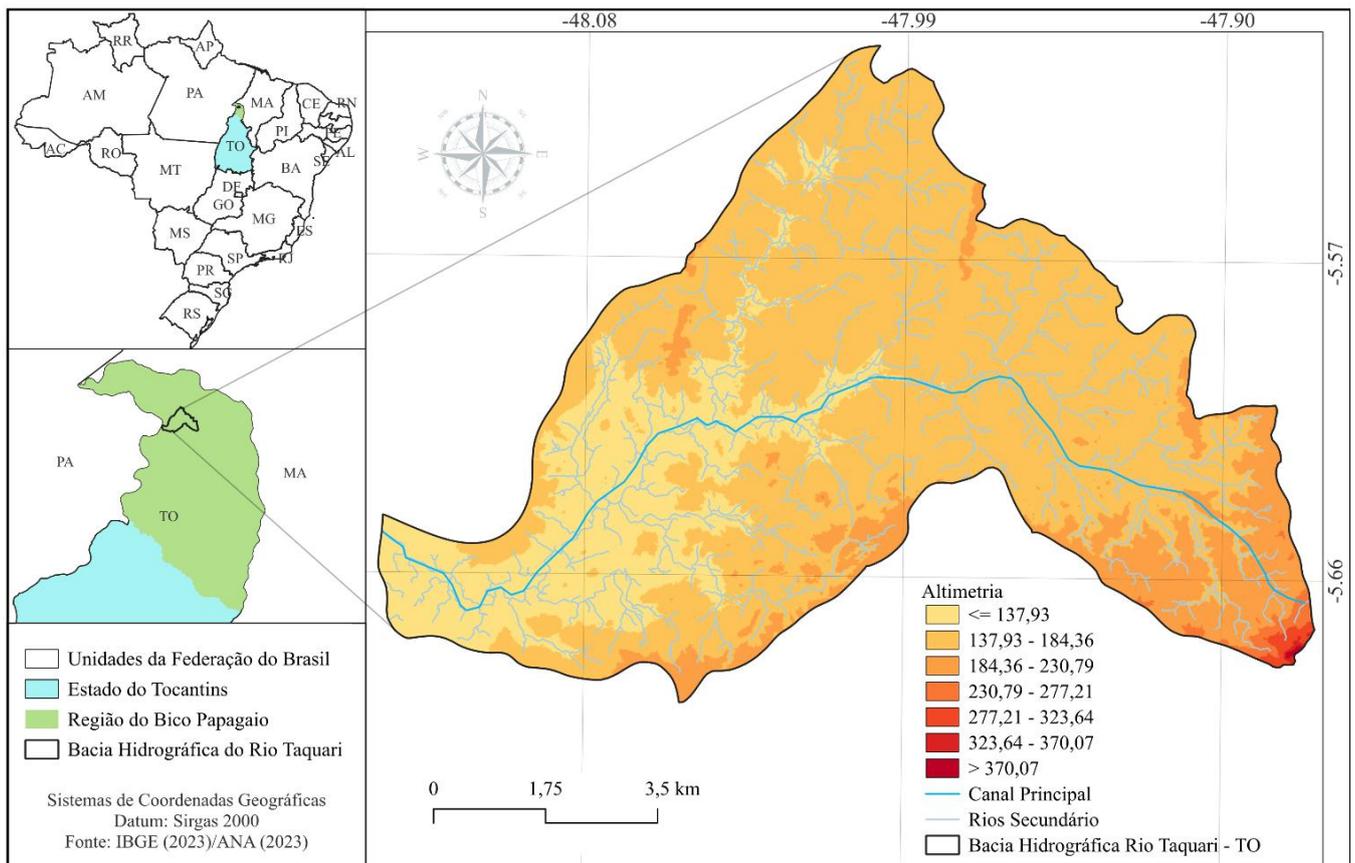


Figura 1. Área de estudo, bacia hidrográfica do rio Taquari-TO.

Para a análise quantitativa dos parâmetros morfométricos da Bacia Hidrográfica do rio Taquari, foram utilizadas informações básicas da rede de drenagem e do relevo. Para obter os dados altimétricos, recorreu-se a imagens de radar SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). Além disso, para a caracterização da bacia hidrográfica do rio em questão, foram aplicados variáveis e métodos nos ambientes de Sistema de Informação Geográfica (SIG), utilizando-se o software QGIS (Versão 3.34.0-Prizren). Os índices calculados em questão incluem:



Área da Bacia (A) e Perímetro (P)

Para Villela & Mattos (1975) a área de drenagem de uma bacia hidrográfica (A) consiste na área plana (projetada sobre o plano horizontal) incluída entre seus divisores topográficos. A área de uma bacia é o elemento básico para o cálculo das outras características físicas. Já para Tucci, (1993), a extensão da área da bacia hidrográfica é um elemento crucial para determinar seu potencial hídrico, isso deve ao fato de que a multiplicação da área pela altura da lâmina d'água precipitada fornece o volume de água que a bacia recebe.

Amplitude altimétrica da Bacia (Hm)

A amplitude altimétrica (Hm) é estabelecida como a variação entre as altitudes dos pontos mais elevado (P1) e mais baixo (P2) dentro da bacia.

Comprimento do rio principal (LRP) - Comprimento total de rios (LT)

O principal curso de água pode ser caracterizado como a rota mais extensa que a água percorre dentro de uma bacia hidrográfica. Além disso, o comprimento total dos cursos d'água (L) é determinado pela soma dos comprimentos de toda as seções de rios ao longo da bacia hidrográfica.

Este conjunto de parâmetros permitiu uma análise abrangente e detalhada da morfometria da Bacia Hidrográfica do rio Taquari.

Coefficiente de compacidade (Kc) – Relaciona a forma da bacia com a de um círculo de área equivalente. O Kc é um índice adimensional, quanto mais próximo de 1 mais arredondada é a bacia e quanto mais distante de 1 mais alongada é a bacia.

$$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

Fator de forma (Kf) – É a razão entre a área da bacia e o quadrado do seu comprimento axial. O Kf é adimensional e quanto mais próximo de 1, mais arredondada é a bacia e quando mais próximo de 0 menos arredondada ela é.

$$K_f = \frac{A}{L'^2} \quad (2)$$

Índice de circularidade (Ic) – É a relação entre o perímetro e a área da bacia. O Ic é medido em km ou m e quanto mais próximo de 1, mais arredondada é a bacia e quando mais próximo de 0 mais alongada ela é.

$$I_c = 12,57 \frac{A}{P^2} \quad (3)$$

Razão de Elongação (Re) – É a relação entre o diâmetro do círculo de área igual a área da bacia e o comprimento do eixo da bacia. Assim como o Kc, este índice mostra a susceptibilidade da bacia a enchentes: quanto maior seu valor maior sua susceptibilidade, menor valor menor sua susceptibilidade

$$R_e = 1,128 \frac{\sqrt{A}}{L'} \quad (4)$$

Densidade de Drenagem (Dd) – É a relação entre o comprimento total de todos os canais da rede de drenagem e a área da bacia.

$$D_d = \frac{L_{total}}{A} \quad (5)$$

Relação de relevo ou declividade do rio principal (Rr) – É a relação entre a Amplitude altimétrica e o comprimento do rio principal, sem considera a sinuosidade do mesmo, medidos em km.

$$R_r = \Delta h L' \quad (6)$$

Índice de rugosidade (Ir) - É a relação entre a amplitude altimétrica e a densidade de drenagem (Dd).

$$I_r = \Delta h * D_d \quad (7)$$

Densidade hidrográfica (Dh) - É a relação entre o número de segmentos de canais de drenagem e a área da bacia.

$$D_h = \frac{N_t}{A} \quad (8)$$



Extensão média do escoamento superficial (L_m) – É a relação entre a área da bacia e o comprimento da rede de drenagem.

$$L_m = \frac{A}{4 * L_{total}} \quad (9)$$

Índice de sinuosidade (I_s) – Indica os meandros do rio principal relacionado com o comprimento do mesmo e com o comprimento do eixo da bacia.

$$I_s = \frac{L}{L'} \quad (10)$$

Razão de textura – É a relação entre o número de segmentos de rio e o perímetro da bacia.

$$T = \frac{N_t}{P} \quad (11)$$

Resultados e Discussão

A microbacia hidrográfica do rio Taquari, conta com área de 286,05 km², com perímetro de 95,77 km. O Comprimento axial da bacia apresentou-se em 314,89 km, tendo 484,14 km no Comprimento total de canais, e o canal principal com extensão de 36,99 km, desde a nascente até foz quando o rio Taquari deságua no rio Araguaia. As altitudes, na bacia, variam de 91,5 m, na foz do rio Taquari, junto ao rio Araguaia, à 416 m na porção nordeste onde nasce de fato o rio Taquari, e amplitude altimétrica de 325,02 m (Tabela 1). Parâmetros que apresentam informações geométricas da bacia estão representados por: coeficiente de compacidade, o fator forma e a razão de alongação. O coeficiente de compacidade, com o valor de 1,58 indica uma bacia de forma alongada com declividade média de 8%, com baixa semelhança a forma circular, apresentando o fluxo distribuído ao longo de todo o canal principal, com baixa-média tendência de grandes cheias. Em relação ao fator de forma, quando mais próximo de 1, a bacia será mais compacta. A bacia do rio Taquari apresentou valores de 0,27 km² km⁻² indicando forma pouco compacta. A razão de alongação é outro parâmetro geométrico que indicou o grau de circularidade da bacia sendo apresentando o valor de 0,59 km, indicando uma bacia hidrograficamente alongada. O parâmetro, densidade de drenagem, faz a abordagem das condições topográficas, pedológicas, hidrológicas e de vegetação da bacia. Em relação a bacia hidrográfica do rio Taquari encontrou-se, o valor médio de densidade de drenagem, de 1,69 (km km⁻²) que caracteriza a bacia como bem drenada. Considerando que o relevo é pouco movimentado, essas condições refletem na associação de solos permeáveis e impermeáveis. A extensão média do escoamento superficial leva como fatores condicionantes a área da bacia e o comprimento total dos rios. O valor da extensão média do escoamento superficial de 0,14, representa um tempo médio de concentração na bacia, reforçando os dados indicando condições de densidade de drenagem moderada, com padrão de drenagem dendrítico. A declividade do rio principal caracterizou-se como um canal de baixa inclinação, o que acarreta fluxo de baixa velocidade. O rio Taquari, a partir das variáveis, definiu-se como um rio sinuoso, que tem seus canais afluentes encaixados, e com fluxo lento. O Coeficiente de rugosidade da bacia, representa um índice utilizado na análise dimensional da topografia, combinando informações pertinentes a amplitude topográfica e a densidade de drenagem. A hierarquia fluvial é de 5ª ordem, segundo a classificação de Strahler, considerando o canal fluvial a partir do encontro com o rio Araguaia.

Tabela 1. Parâmetros morfométricos da bacia do rio Taquari

Parâmetro	Valores e unidades	Parâmetro	Valores
Ordem da bacia	5ª	Coefficiente de compacidade ou índice de Gravelius	1,58
Altitude máxima	417 m	Densidade hidrográfica	3,58
Altitude mínima	92 m	Extensão média do escoamento superficial	0,14
Amplitude altimétrica	325 m	Fator forma	0,27
Área de drenagem	286,05 km ²	Índice de circularidade	0,39
Comprimento do canal principal	36,99 km	Índice de rugosidade	0,55
Comprimento total dos canais	484 km	Índice de sinuosidade	1,14
Densidade de drenagem	1,69 km	Número de canais	1.585
Eixo da bacia	32,28 km	Razão de relevo ou declividade	0,01
Perímetro	95,77 km	Razão de alongação	0,59
		Razão de textura	10,70



Considerações Finais

A caracterização morfométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Taquari forneceu informações valiosas sobre sua forma, dimensões, organização e declividade. Os resultados do estudo podem ser utilizados para subsidiar ações de manejo ambiental, planejamento urbano, gestão dos recursos hídricos e mitigação de riscos hidrológicos na região.

Recomenda-se a realização de estudos complementares, como análises hidrológicas e sedimentológicas, para a obtenção de um conhecimento mais aprofundado da dinâmica da bacia.

Agradecimentos

Universidade de São Paulo (USP) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ); Laboratório de Hidrologia do Departamento de Engenharia de Biosistemas (LABHA); Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz (FEALQ); Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código Financeiro 001.

Referências Bibliográficas

Alves, L. A. (2019). Estudo de bacia hidrográfica no ensino de geografia. *Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades*, 07(48).

Christofolletti, A. (1980). *Geomorfologia* (2o ed.). Edgard Blutcherr Ltda.

Gomes, F. A. L. (2016). Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Farinhas-PB através de dados SRTM. <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/3935>

IBGE. (2022). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. IBGE. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/to/araguatins/panorama>

Koop, S. H. A., Grison, C., Eisenreich, S. J., Hofman, J., & van Leeuwen, K. J. (2022). Integrated water resources management in cities in the world: Global solutions. *Sustainable Cities and Society*, 86, 104137. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2022.104137>

Mendes, J. J. (2022). Gestão dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do Rio Munim - MA. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho.”

Ribeiro, D. L., Almeida, M. L. de, & Santos, M. da R. (2017). Análises morfométrica das unidades de planejamento e gestão de recursos hídricos do rio Jequitinhonha com o uso de geotecnologias. Instituto Ensinar Brasil.

Tucci, C. E. M. (1993). *Hidrologia: Ciência e Aplicação* (1o-1993, 4o-9o-2020, Vol. 4). Editora da UFRGS / ABRH.

Villela, S. M., & Mattos, A. (1975). *Hidrologia aplicada* (1o). Editora McGraw-Hill do Brasil.



ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E FINANCEIRA DA IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO E CHUVA

1Bruno José Costa da Cunha, 2Jonilton Pantoja Paschoal

1 Mineração Paragominas S.A (Hydro), e-mail: bruno.jose.cunha@hydro.com; 2 Mineração Paragominas S.A (Hydro), e-mail: jonilton.paschoal@hydro.com

Palavras-chave: Sistemas automáticos de medição; monitoramento hídrico; gestão ambiental 4.0.

Resumo

Este trabalho analisa a viabilidade técnica e financeira da implementação de sistemas automáticos de medição de vazão e chuva na Mineração Paragominas S.A., uma empresa que extrai bauxita no estado do Pará, Brasil. O estudo é motivado pela necessidade de uma gestão eficiente dos recursos hídricos, considerando os desafios atuais como o crescimento da demanda legal e das mudanças climáticas.

A metodologia do estudo inclui uma avaliação técnica e um estudo de viabilidade financeira, com uma análise de sensibilidade para testar a robustez dos resultados. Os critérios técnicos considerados são precisão, confiabilidade, frequência de amostragem, simplicidade operacional, robustez, capacidade de monitoramento contínuo e tempo de resposta. Já a viabilidade financeira é avaliada por meio de técnicas como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), Payback simples e descontado e Índice de Lucratividade (IL), utilizando a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) como referência.

Os resultados indicaram que a implementação de estações automáticas é viável e benéfica em ambas as áreas. Do ponto de vista técnico, os sistemas automáticos oferecem maior precisão, confiabilidade e capacidade de monitoramento contínuo, apesar de exigirem um investimento inicial mais alto e mão de obra qualificada para operação e manutenção.

Introdução

A gestão eficiente dos recursos hídricos tornou-se uma prioridade incontestável diante dos desafios enfrentados pela sociedade contemporânea, incluindo o crescimento populacional, as alterações climáticas e as pressões sobre os ecossistemas aquáticos (Mukheibir et al., 2021). No cerne dessa gestão, a medição precisa e o monitoramento contínuo de variáveis hidrológicas, como vazão e chuva, desempenham papéis cruciais para embasar decisões informadas e estratégias de preservação em uma bacia hidrográfica (Razzaque et al., 2020). Diante desse contexto, a implantação de sistemas automáticos de medição emerge como uma abordagem inovadora e estratégica para otimizar a coleta de dados hidrológicos (Han et al., 2019).

A crescente disponibilidade de tecnologias avançadas de medição de vazão e chuva abre caminho para uma análise aprofundada sobre a viabilidade técnica e financeira desses sistemas de monitoramento (Li et al., 2023). Logo, é necessário analisar cada alternativa antes de concretizar um investimento utilizando uma relação de equivalência, onde todos os valores são alocados para uma única data no tempo. Para Kuhnen e Bauer (2001), investimento pode ser definido como o conjunto de técnicas que possibilitam a tomada de decisão entre diferentes possibilidades, dessa forma possibilita o investidor aceitar ou recusar o investimento analisado.

Conforme Pamplona e Montevechi (2013), em um processo de decisão de uma alternativa de investimento, existem alguns métodos que podem ser utilizados, como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), Payback e Índice Benefício Custo. Esses métodos de avaliação levam em consideração o valor do dinheiro no tempo, por esse motivo é necessário utilizar uma taxa de juros ao aplicá-los. Essa taxa denomina-se Taxa Mínima de Atratividade (TMA).

Nesse sentido, explorar as mais recentes inovações tecnológicas, tais como sensores remotos, redes de sensores sem fio e sistemas automatizados de coleta de dados, avaliando sua aplicabilidade em diferentes contextos geográficos e climáticos, se faz necessário para o desenvolvimento de uma gestão ambiental baseada na indústria 4.0 (Chang et al., 2022). Adicionalmente, é necessário dedicação na análise de custos associados à implementação desses sistemas, incluindo investimentos iniciais, custos operacionais e potenciais benefícios econômicos e ambientais (Macedo, 2019).

Este estudo foi desenvolvido com base nas operações da Mineração Paragominas S.A, empresa que extrai bauxita para a produção de alumina e alumínio. O monitoramento hidrométrico (vazão e volume de chuva) faz parte do programa de gestão ambiental da empresa, atualmente essa atividade ocorre a partir de quatro régua linimétrica e sete pluviômetros do tipo Ville de Paris.

A partir dessa condição, o objetivo desse estudo é avaliar a viabilidade técnica e econômica da substituição de métodos tradicionais de medição de vazão e pluviometria por soluções tecnológicas automatizadas que efetuam medições e transmissão de dados de maneira contínua.

Material e Métodos

Nesse item será apresentado algumas características da área de estudo, bem como delineado as estratégias e abordagens adotadas para conduzir uma avaliação técnica abrangente, um estudo de viabilidade financeira detalhado e uma análise de sensibilidade.



Caracterização da área de estudo

A Mineração Paragominas S.A. (MPSA) é composta por dois depósitos de bauxita em planaltos contíguos denominados Miltônia 3 (M3) e Miltônia 5 (M5), situados no município de Paragominas, região noroeste do Estado do Pará, no Norte do Brasil. A mina está localizada nas coordenadas geográficas 2° 59' 51" S; 47° 21' 13" O. Veja o mapa de localização na Figura 1.

O empreendimento inclui um sistema integrado de produção que inclui lavra, beneficiamento e transporte de bauxita por meio de um duto de 244 km que atravessa sete municípios do Estado do Pará (PA), a maior parte desse duto sendo subterrânea. Nas proximidades deste trajeto existe uma Linha de Transmissão de Energia de 236 km para suprir a demanda de energia da usina com a Estação Elevatória 2 (PS2), localizada em Tomé-açu/PA.

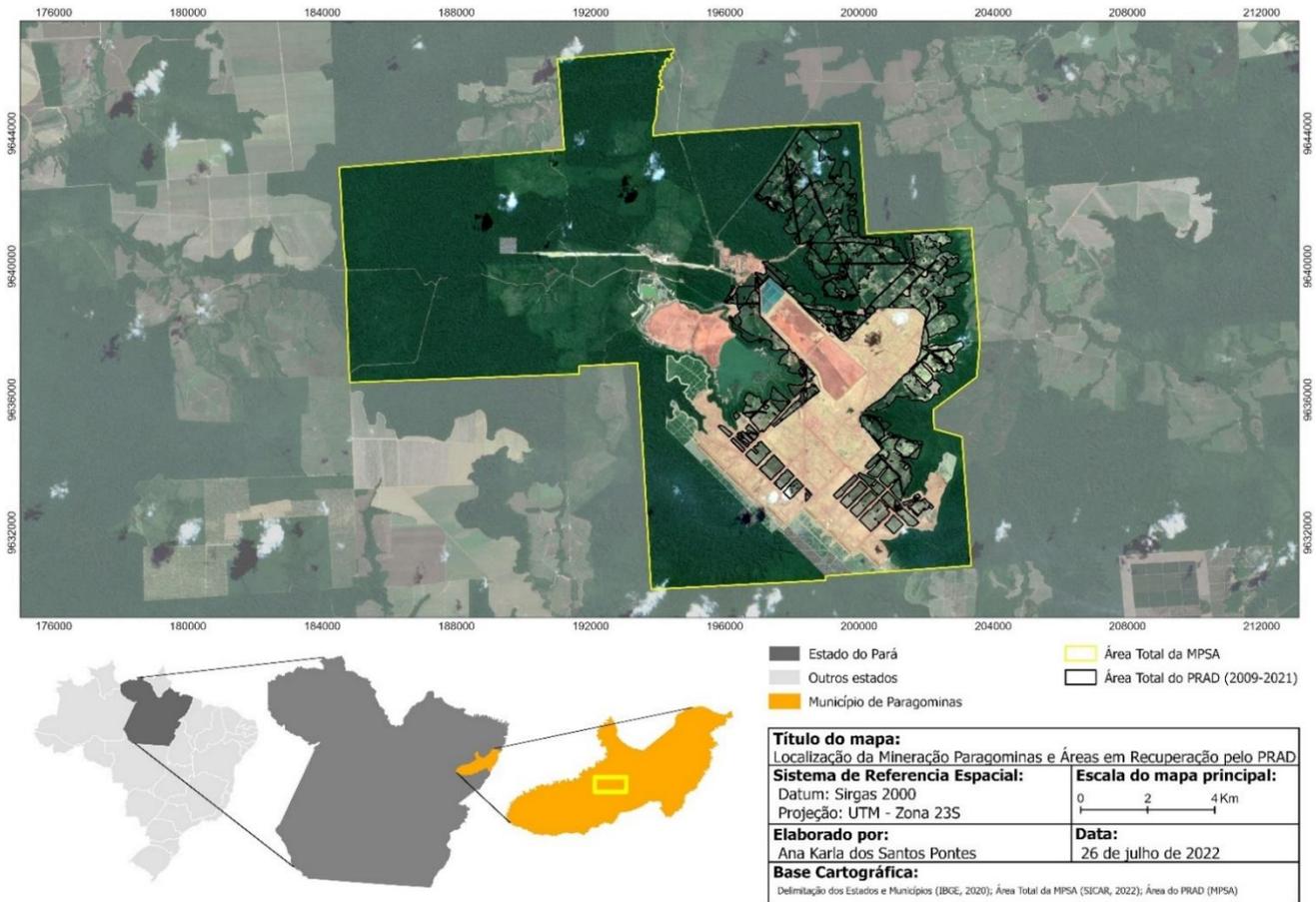


Figure 16: Mapa de localização da Mineração Paragominas S.A.

Estudo de viabilidade técnica

Para o estudo de viabilidade técnica para a implementação de estações automáticas em substituição ao método tradicional de medição, que inclui a observação de nível d'água em curso d'água e o volume de chuva, levando em consideração os seguintes itens:

- Precisão e confiabilidade: avaliação da precisão das medições e da confiabilidade dos dados gerados por cada método.
- Frequência de amostragem: Consideração da capacidade de cada método em fornecer dados em intervalos temporais adequados para a análise hidrológica proposta.
- Tempo de resposta: avaliação da rapidez com que os dados são coletados e disponibilizados para análise, especialmente em situações de eventos hidrológicos críticos.
- Custo: análise do investimento necessário para implementação e manutenção de cada método ao longo do tempo.
- Simplicidade operacional: consideração da facilidade de operação e compreensão do método, levando em conta a complexidade técnica e a necessidade de treinamento.
- Robustez: avaliação da capacidade de cada método em lidar com condições adversas, como variações climáticas extremas ou interferências externas.
- Capacidade de monitoramento contínuo: verificação da capacidade de obter dados de forma contínua, sem interrupções, ao longo do período de estudo.

A seleção desses critérios permitiu a análise abrangente e equilibrada, contribuindo para a tomada de decisão do método mais apropriado para atender aos objetivos da gestão hídrica.



Estudo de viabilidade financeira

Para a análise de viabilidade financeira da implantação das estações automatizadas de pluviometria e fluviometria foram levados em consideração os custos com a aquisição de equipamentos, montagem, manutenções e operação. Maiores detalhes sobre esses itens estão descritos no Quadro 1.

Quadro 1: Descrição da composição de custo para aquisição, implantação, operação e manutenção das estações automatizadas

Atividades	Método tradicional	Método automatizado
Aquisição de equipamentos + implantação das estações	Para este estudo de caso a empresa possui atualmente quatro (04) réguas linimétricas e sete (07) pluviômetros do tipo Ville de Paris. Portanto, não serão considerados custos de aquisição desses instrumentos, pois eles já existem na empresa.	<ul style="list-style-type: none"> - Custo para aquisição das estações automatizadas, considerando os seguintes componentes: poste de fixação, transdutor de pressão para medição de nível d'água e coletor pluviométrico, cabos, bateria, transmissor via satélite, data logger, tudo pvc, painel solar de 6 watts, disponibilidade dos dados em plataforma online. - Insumos para fixação dos postes (concreto), cerca de proteção, placa de identificação dos pontos de monitoramento e mão de obra para montagem das estações. - Custo total por estação pluviométrica = R\$ 30.000,00. - Custo total por estação fluviométrica = R\$ 32.000,00.
Manutenção e operação (custo mensal)	Foram considerados os custos de transporte (veículo + combustível), técnicos de campo, insumos para limpeza dos equipamentos. <ul style="list-style-type: none"> - Custo diário por pluviômetro Ville de Paris = R\$ 86,65 / R\$ 2.599,50 por unidade ao mês. - Custo diário por régua linimétrica = R\$ 102,33 / R\$ 3.069,90 por unidade ao mês. - Custo mensal total para operação e manutenção = R\$ 30.476,10. 	Foram considerados os custos de transporte (veículo + combustível), mão de obra especializada, insumos para limpeza dos equipamentos, calibrações, software para gestão dos dados aferidos. <ul style="list-style-type: none"> - Custo mensal por estação pluviométrica = R\$ 1.050,52; custo total para as sete estações pluviométricas = R\$ 7.353,64; - Custo mensal por estação fluviométrica = R\$ 715,19; custo total para as quadro estações fluviométricas = R\$ 2.860,76; - Custo mensal total para operação e manutenção = R\$ 10.214,40.

Para a realização do estudo de viabilidade financeira foram utilizadas as seguintes técnicas de análise de viabilidade de projetos:

a) Payback simples: consiste no tempo exato de retorno necessário para se recuperar um investimento inicial. Conforme Branco (2016), todo projeto deve ter um prazo limite para retorno dos investimentos, no caso desta técnica se o resultado obtido for menor que o prazo máximo aceitável, aceita-se o projeto, caso contrário o rejeitasse o projeto. O payback simples é obtido através da seguinte equação:

$$\text{Payback} = I / RA \quad (1)$$

Onde: I é investimento inicial, RA as Receitas anuais ou entradas líquidas de caixa.

b) Payback descontado (PBD): é similar ao payback simples, exceto pelo fato de considerar uma taxa de atratividade ou de desconto, ou seja, reduz os pagamentos futuros pelo seu custo de capital. Neste método é descontado todos os elementos do fluxo de caixa à taxa definida, trazendo ao valor presente, na data zero. O PBD, segundo Bischoff (2013), é obtido pela seguinte equação:

$$VP = VF / (1 + K)^t \quad (2)$$

Onde: VP é o valor presente, VF o valor futuro, K é taxa de rentabilidade equivalente periódica (IRR) e "t" é o prazo.

c) Valor Presente Líquido (VPL): indicador que permite avaliar a viabilidade econômica do projeto a longo prazo. O VPL é definido pelo valor atual dos benefícios menos o valor atual dos custos ou desembolsos. Conforme Bordeaux-Rêgo (2013) o VPL pode ser obtido através da equação:



$$VPL = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+r)^t} + \frac{VR}{(1+r)^n} \quad (3)$$

Onde: “I₀” é o investimento inicial, “r” é o custo de capital definido pela empresa, “VR” é o valor residual de projeto ao final do período de análise, “FC” são os fluxos previstos de entradas de caixa em cada período de vida do projeto (benefícios de caixa).

d) Taxa Interna de Retorno (TIR): para Hirschfeld (2016) é a taxa necessária para igualar os fluxos de caixa ao valor presente (PV), ou seja, é o custo ou rentabilidade efetiva de um projeto ou simplesmente a taxa de desconto igual aos fluxos de caixa ao investimento inicial, seja pelo regime de juros compostos ou simples. A equação de obtenção da TIR é:

$$I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{I_t}{(1+k)^t} = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+k)^t} \quad (4)$$

Onde: “I₀” o montante do investimento no momento zero (início do projeto), “I_t” são os montantes previstos de investimentos em cada momento subsequente, “K” é a taxa de rentabilidade equivalente periódica (IRR), “FC” são os fluxos previstos de entradas de caixa em cada período de vida do projeto (benefícios de caixa).

e) Índice de Lucratividade (IL): é uma medida relativa entre o valor presente dos fluxos de caixa recebidos e o investimento inicial: $IL = VP/I$ ou $IL = (VPL+I)/I$, sendo o valor do investimento colocado em módulo, ou seja, sempre positivo. Conforme Bordeaux-Rêgo (2013) as interpretações possíveis dos resultados do IL são:

- IL > 1: os investimentos serão recuperados, remunerado ao menos à taxa exigida e haverá ainda um aumento de riqueza;
- IL = 1: o investimento será recuperado, remunerado exatamente à taxa exigida;
- IL < 1: o investimento não será recuperado.

Em todas as técnicas de análise de projeto que carecem da taxa mínima de atratividade, foi adotada o valor da Selic, fixada em 11,25% ao ano (consulta em 25/02/2024 - Banco Central do Brasil).

Análise de sensibilidade

Após o estudo de viabilidade financeira da implantação dos sistemas de medição de vazão e pluviometria automatizados, foi realizada uma análise de sensibilidade dos resultados obtidos no estudo. A análise de sensibilidade tem por finalidade auxiliar na tomada de decisão ao ser avaliados eventuais alterações de valores. Neste trabalho foram definidos três (03) cenários de avaliação, sendo eles:

- Cenário I: calcular o investimento máximo que poderá ser realizado em uma possível implantação do sistema de monitoramento automatizado de pluviometria e fluviometria, mantendo os custos iniciais de manutenção e operação tanto do método tradicional quanto dos sistemas automatizados;
- Cenário II: calcular o valor máximo que os custos de manutenção e operação do método tradicional de medição hidrométrica deve ter para viabilizar a manutenção deste método. Nesse cenário, são mantidos os valores de investimento e do custo de manutenção e operação dos sistemas automatizados;
- Cenário III: calcular o valor máximo que os custos de manutenção e operação das estações automáticas poderá ter para viabilizar a sua implantação. Nesse cenário, foram mantidos os valores de investimento, bem como os custos de manutenção e operação do método tradicional.

Em cada cenário foram fixados os critérios mais desfavoráveis para cada método de análise de viabilidade de projetos. Assim, foram adotados os seguintes valores, para: VPL = 0; TIR = taxa mínima de atratividade; Payback simples = 5 anos; Payback descontado = 5 anos; IL = 1.

Resultados e Discussão

Com base na metodologia previamente delineada, os resultados da análise da viabilidade técnica e financeira da implementação de sistemas automáticos de medição de vazão e chuva na Mineração Paragominas S.A. serão apresentados neste item.

Estudo de viabilidade técnica

A transição para estações automáticas representa uma abordagem inovadora, visando aprimorar significativamente a eficiência e a precisão na coleta de dados hidrológicos. Ao substituir o método tradicional de monitoramento hidrométrico por sistemas automáticos, espera-se não apenas otimizar o tempo e os recursos envolvidos na obtenção de informações, mas também mitigar potenciais erros humanos e acidentes de trabalho. Este método não só moderniza a coleta de dados, mas também proporciona a capacidade de monitoramento contínuo em tempo real, oferecendo um acompanhamento mais dinâmico das condições hidrológicas.

A observação manual, utilizando métodos tradicionais como a medição do nível d'água e a coleta em pluviômetro Ville de Paris, apresenta vantagens relacionadas à simplicidade operacional e ao custo inicial mais baixo. Além disso, permite uma interação direta com os dados e uma compreensão mais intuitiva das condições locais. No entanto, essa abordagem também possui desvantagens significativas, como a suscetibilidade a erros humanos, a limitação na frequência de amostragem devido à



dependência de intervenção manual e a impossibilidade de monitoramento em tempo real sem a presença humana, o que pode resultar em informações menos precisas e oportunas.

Por outro lado, os sistemas automáticos de monitoramento pluviométrico e fluviométrico oferecem diversas vantagens notáveis. A automação permite uma coleta de dados contínua e em tempo real, melhorando a precisão e a frequência das medições. Além disso, reduz a dependência de intervenção humana, minimizando erros e otimizando a eficiência operacional. Contudo, as desvantagens incluem um custo inicial mais elevado para implementação e manutenção, a necessidade de fontes de energia e internet estáveis para operação contínua e a possível complexidade na interpretação dos dados automáticos, exigindo maior capacitação técnica. Cabe ressaltar ainda, que o monitoramento automático não elimina a necessidade da ida de técnicos de campo no local, apenas reduz a frequência, pois há necessidade de realizar a limpeza dos instrumentos semanalmente.

Em conclusão, a transição do monitoramento “manual” para estações automáticas de monitoramento hidrológico representa um avanço significativo na coleta de dados, buscando aprimorar eficiência e precisão. Ao substituir métodos manuais por sistemas automáticos, espera-se não apenas otimizar recursos e tempo, mas também mitigar erros humanos, bem como aprimorar a análise hidrológica de uma bacia hidrográfica. Embora a observação manual ofereça simplicidade operacional e custos iniciais mais baixos, as desvantagens, como suscetibilidade a erros e limitações na frequência de amostragem, são evidentes. Por outro lado, os sistemas automáticos proporcionam coleta contínua e em tempo real, melhorando a precisão, embora apresentem desafios como custos iniciais mais altos e exigências de mão de obra qualificada. A escolha entre os métodos deve ser cuidadosa, considerando as necessidades específicas do estudo e equilibrando vantagens e desvantagens para garantir dados hidrológicos confiáveis e relevantes para análise.

Estudo de viabilidade financeira

A partir dos custos unitários para implantação, manutenção e operação das estações automatizadas foi obtido um valor total de R\$ 338.000,00 para a aquisição e implantação de 04 estações fluviométricas e 07 estações pluviométricas automáticas. Quanto ao custo mensal de operação e manutenção, foram calculados em R\$ 30.476,10 no método tradicional e R\$ 10.214,40 no monitoramento automático, logo a diferença mensal entre os custos de manutenção e operação do método tradicional versus os sistemas automatizados é de R\$ 20.261,70, totalizando R\$ 243.140,40 por ano. A partir dessas informações foi gerado o fluxo de caixa (Figura 2) que irá compor o estudo de viabilidade financeira do projeto.

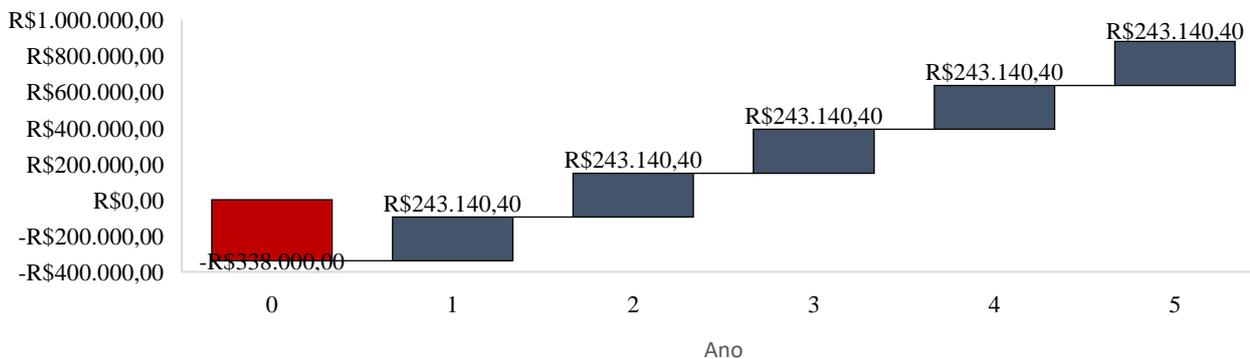


Figura 2: Fluxo de caixa estimado para o projeto.

Tendo como base o fluxo de caixa previsto para o empreendimento após a implantação dos sistemas de monitoramento automatizado de pluviometria e fluviometria, foi realizada a análise de viabilidade do projeto, mediante o uso de técnicas de análise de investimentos apresentadas anteriormente. Na Tabela 2 segue os resultados obtidos no estudo.

Tabela 2: Fluxo de caixa do projeto e cálculos do payback simples e payback descontado

Ano	Fluxo de caixa do projeto	Saldo (Payback simples)	Fluxo de caixa descontado (VP)	Saldo (Payback descontado)
0	-R\$338.000,00	-R\$338.000,00	-R\$338.000,00	-R\$338.000,00
1	R\$243.140,40	-R\$94.859,60	R\$218.553,17	-R\$119.446,83
2	R\$243.140,40	R\$148.280,80	R\$196.452,29	R\$77.005,45
3	R\$243.140,40	R\$391.421,20	R\$176.586,32	R\$253.591,78
4	R\$243.140,40	R\$634.561,60	R\$158.729,28	R\$412.321,06
5	R\$243.140,40	R\$877.702,00	R\$142.678,01	R\$554.999,07



Ao final dos cálculos do estudo de viabilidade financeira do projeto, foram obtidos os seguintes resultados:

- VPL = R\$ 554.999,07 – este resultado indica que o projeto é viável, pois, o VPL foi maior que R\$ 1,00;
- TIR = 66,28% - a taxa interna de retorno, neste projeto, foi maior que a taxa mínima de atratividade de 11,25%, portanto, de acordo com esta técnica o projeto é viável;
- Payback simples = 1,39 anos (16,7 meses) – conforme este resultado, o retorno do investimento ocorrerá em um período menor que o máximo aceitável de 5 anos, portanto o projeto é viável;
- Payback descontado = 1,61 anos (19,3 meses) – igualmente ao payback descontado, o projeto deve ser aceito, visto que o tempo de retorno é inferior a 5 anos;
- Índice de lucratividade = R\$ 2,64 – para cada real (R\$ 1,00) investido, o investidor terá R\$ 2,64 reais de retorno, desta forma o projeto é viável.

Portanto, em todos os métodos adotados para a avaliação da viabilidade financeira o projeto de automatização do monitoramento hidrométrico, o resultado foi viável, ou seja, é recomendado que o projeto seja executado.

Análise de sensibilidade

Após a análise de viabilidade do projeto, foram realizados os cálculos da análise de sensibilidade. Os resultados obtidos nos cenários avaliados estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados da análise de sensibilidade do projeto

Condições avaliadas	Cenário I	Cenário II	Cenário III
Para VPL = 0	R\$ 892.999,07	R\$ 17.883,45 (Pluviometria = R\$ 50,97; Fluviometria = R\$ 59,83)	R\$ 22.832,32 (Pluviometria = R\$ 2.348,23/und; Fluviometria = R\$ 1.598,67)
TIR = 11,25%	R\$ 892.999,07		
IL = 1	R\$ 892.999,07		
Payback = 5 anos	R\$ 1.215.702,00	R\$ 15.848,17 (Pluviometria = R\$ 45,17; Fluviometria = R\$ 53,02)	R\$ 24.868,39 (Pluviometria = R\$ 2.557,64; Fluviometria = R\$ 1.741,23)
Payback descontado = 5 anos	R\$ 1.004.362,31	R\$ 17.032,41 (Pluviometria = R\$ 48,54; Fluviometria = R\$ 56,99)	R\$ 23.683,20 (Pluviometria = R\$ 2.435,74; Fluviometria = R\$ 1.658,25)

Para maior entendimento e assimilação dos resultados obtidos em cada cenário avaliado, segue na Tabela 4 um resumo dos valores de investimento, custos mensais para a operação e manutenção pelo método manual e automático em cada cenário que foi avaliado.

Tabela 4: Resumo dos valores de investimento, custos mensais para a operação e manutenção pelo método de monitoramento manual e automático

Condições avaliadas	Cenário I	Cenário II	Cenário III
Investimento para aquisição	R\$ 892.999,07 a R\$ 1.215.702,00	R\$338.000,00	R\$338.000,00
Custos mensal de operação e manutenção do método tradicional (04 réguas limimétricas + 07 pluviômetros Ville de Paris)	R\$ 30.476,10	R\$ 15.848,17 a R\$ 17.883,45	R\$ 30.476,10
Custo mensal de operação e manutenção pelo método automatizado (04 réguas linimétricas + 07 pluviômetros Ville de Paris)	R\$ 10.214,40	R\$ 10.214,40	R\$ 22.832,32 a R\$ 24.868,39

Conforme os resultados apresentados na Tabela 2 e Tabela 3, mantendo a economia anual de R\$ 243.140,40, o investidor pode realizar um investimento máximo viável de R\$ 892.999,07, compatível com três das cinco metodologias avaliadas.

No cenário II, considerando o investimento de R\$ 338.000,00 e os custos iniciais de operação e manutenção das estações automáticas em R\$ 10.214,40, o valor máximo para tornar economicamente viável a manutenção e operação do método tradicional de hidrometria varia entre R\$ 15.848,17 e R\$ 17.883,45 por mês.

O cenário III avaliou o custo máximo para operação e manutenção das estações automáticas, considerando o investimento inicial de R\$ 338.000,00 e o custo mensal de operação e manutenção dos pontos de monitoramento pelo método



manual em R\$ 30.476,10. O valor máximo para a manutenção e operação das estações automatizadas é de R\$ 24.868,39, representando um aumento de 143% em relação ao valor inicial. Esse montante representa os custos unitários de operação e manutenção para sete (07) estações pluviométricas a R\$ 2.557,64 e quatro (04) estações fluviométricas a R\$ 1.741,23.

Comentários finais

A implementação de sistemas automáticos de monitoramento hidrométrico na Mineração Paragominas S.A. demonstrou ser uma estratégia viável tanto tecnicamente quanto financeiramente. A análise técnica ressaltou as vantagens significativas da automação, incluindo a melhoria na precisão e na frequência das medições, a capacidade de monitoramento contínuo e em tempo real, e a redução da dependência de intervenção humana, o que minimiza erros e otimiza a eficiência operacional. Apesar dos custos iniciais mais elevados para a implementação e manutenção dos sistemas automáticos, a médio prazo, estes são compensados pela diminuição dos custos operacionais e de manutenção, além de proporcionarem uma coleta de dados mais robusta e confiável, essencial para uma gestão hídrica eficaz.

Do ponto de vista financeiro, o estudo revelou que o projeto de modernização do sistema de monitoramento hidrométrico é economicamente viável, com um Valor Presente Líquido positivo de R\$554.999,07, uma Taxa Interna de Retorno de 66,28%, e um período de payback simples de, aproximadamente, 1,39 anos. Esses resultados, juntamente com a análise de sensibilidade realizada, reforçam a robustez do projeto mesmo diante de variações nos custos. Portanto, a transição para o monitoramento automatizado é recomendada, alinhando-se com as práticas da indústria 4.0 e promovendo uma gestão ambiental mais eficiente e contribuindo para a preservação dos ecossistemas aquáticos e para o desenvolvimento sustentável.

Referências Bibliográficas

BISCHOFF, L. *Análise de Projetos de Investimentos*. ed. Ferreira, 2013.

BORDEAUX-RÊGO, R. *Viabilidade econômica-financeira de projetos*. 4°. ed. Rio de Janeiro: FGV, 2013.

BRANCO, A. C. C. *Matemática Financeira Aplicada: método algébrico, HP 12C: Microsoft Excel*. 4°. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2016.

Chang, H., Wang, X., & Wang, Z. (2022). Smart Water Resources Management System Based on 5G and Artificial Intelligence. In 2022 IEEE 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA) (pp. 47-50). IEEE.

Chen, Y.; Wang, L.; & Yang, H. (2022). Wireless sensor networks for hydrological monitoring: A review. *Journal of Hydrology*, 603, 127134. doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.127134.

Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (2019). Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods. *Water Resources Research*, 35(7), 233-241. doi: 10.1029/1999WR900205.

Han, D., Gao, S., Wang, J., & Liu, Y. (2019). Review on recent development in sensor technology for water quality monitoring in China. *Environmental Chemistry Letters*, 17(4), 1621-1631.

HIRSCHFELD, H. *Engenharia Econômica e Análise de Custos*. 7°. ed. São Paulo: Atlas, 2016.

Jones, E.; & Brown, C. (2020). Water scarcity impacts of global warming: A hydrologic, economic, and regional analysis in the Maipo Basin of Chile. *Science of The Total Environment*, 715, 136995. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136995.

KUHNEN, O L; BAUER, U. R. *Matemática financeira aplicada e análise de investimentos*. 3 ed. São Paulo: Atlas, 2001.

Li, M., Wu, Y., & Zhao, L. (2023). Application of sensor networks in water resources management: A review. *Water Science and Engineering*, 16(2), 115-125.

MACEDO, A. L.A.; 2019. Viabilidade econômica do aproveitamento energético de resíduos do processamento da madeira. XXXIX Encontro Nacional De Engenharia De Produção, pp.1-14.

Mukheibir, P., & Bunn, D. W. (2021). Real-time sensor network monitoring and control of urban drainage systems: A review. *Journal of Hydroinformatics*, 23(3), 562-576.

PAMPLONA, E. O; MONTEVECHI, J. A. B. *Análise de Viabilidade de Empreendimentos*. 2013.

Pereira, L. S.; & Oliveira, T. M. A. (2021). Water resources management in agriculture: A review. In *Handbook of Climate Change Resilience* (pp. 531-557). Springer. doi: 10.1007/978-3-030-66301-5_23.



Razzaque, M. A., Mamun, A. A., & Maniruzzaman, K. M. (2020). Internet of Things for Water Quality Monitoring: State-of-the-Art, Challenges, and Future Directions. *IEEE Access*, 8, 137826-137854.



CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA E DIAGNÓSTICOS DE IMPACTOS MACROSCÓPIOS NA BACIA DO RIBEIRÃO CAMBÉ - PR

1Maria Clara do Santos Lopes, **2**Andreia Costa Barbosa, **3**Karine Zucco Salton, **4**Bianca da Silva Carvalho, **5**Mauricio Moreira dos Santos, **6**Kátia Valéria Marques Cardoso Prates

*1*Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: marialopes@alunos.utfpr.edu.br; *2*Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e-mail: andreiabarbosa@alunos.utfpr.edu.br; *3* Universidade Tecnológica Federal do Paraná, email: karynesalton@gmail.com, *4* Universidade Tecnológica Federal do Paraná, email: biancacarvalho.bsc@gmail.com; *5* Universidade Tecnológica Federal do Paraná, email: msantos@professores.utfpr.edu.br; *6* Universidade Tecnológica Federal do Paraná, email: kprates@professores.utfpr.edu.br

Palavras-chave: Geoprocessamento, Gestão Urbana, Urbanização.

Resumo

A caracterização morfométrica de uma bacia hidrográfica permite elucidar as questões relacionadas ao entendimento da dinâmica local e regional de uma bacia, tendo em vista que fornecem informações relacionadas à drenagem, relevo e geologia associadas a dinâmica ambiental. O uso desses protocolos permite realizar uma análise visual da paisagem em pontos pré-estabelecidos e quando aplicado de forma contínua, podem registrar as condições ambientais de determinada área, podendo ser de forma descritiva ou qualitativa. O objetivo desse trabalho é realizar uma caracterização morfométrica da bacia para compreender a morfologia da bacia e a aplicar de um diagnóstico de impactos macroscópios por meio de um PAR na bacia do Ribeirão Cambé-Pr. A escolha desta bacia hidrográfica e devido à forte influência na formação da área urbana na bacia. A metodologia foi dividida em duas etapas, sendo i) Caracterização, que contempla a análise morfométrica da bacia e ii) Diagnóstico macroscópico, que refere-se ao uso de PAR para diagnóstico da área. Os dados foram de morfometria foram obtidos pelo Modelo de Elevação Digital (MDE). Analisou-se declividade, hipsometria, amplitude altimétrica máxima, área total, perímetro, fator forma, coeficiente de compacidade, comprimento do curso principal, hierarquia fluvial, índice de circularidade e densidade de drenagem. O diagnóstico macroscópico foram analisados pelo PAR, onde foram selecionados seis pontos amostrais no perfil longitudinal da bacia, com características ambientais diferentes e deu-se preferência para as áreas com diferentes características e perturbações ambientais, sendo assim, a amostragem foi feita em área de nascente, local com alta influência urbana, Lago Igapó, formação florestal e área rural. Os dados foram quantificados de 0 a 10 e interpretados como “ruim”, “regular”, “bom” e “ótimo”. Para espacializar a visualização das métricas, os resultados foram interpolados pelo método Inverso da Distância Ponderado (IDW). Os resultados indicaram que a Bacia do Ribeirão Cambé tem uma amplitude altimétrica máxima de 249m, com um relevo de predominância ondulado (totalizando 68,5% da área), hierarquia fluvial de 4º ordem, área total de 73,89km² e 50,48km de perímetro. Além disso, os índices fator forma (0,18) e coeficiente de compacidade (1,64) e índice de circularidade (0,36) indicam que a bacia tende a uma forma mais alongada, por isso a bacia, de forma geral, tem tendências a baixas ocorrências de grandes enchentes e uma densidade de drenagem regular (1,16). Os resultados da aplicação do PARU nos trechos do Ribeirão Cambé distribuíram-se entre duas classes: boa e regular, sendo o ponto 1 (nascente) com a melhor condição e o ponto 5 com as piores condições devido a ausência de vegetação, presença de resíduos sólidos e grandes bancos de sedimentos. A partir do conjunto de dados analisados, foi possível cumprir o objetivo do trabalho, tendo em vista que com a análise morfométrica foi possível reconhecer o comportamento da rede de drenagem da bacia e o PAR serve como uma ferramenta de baixo custo e fácil aplicação para identificar questões ambientais e avaliá-los de formas similares. De forma geral, com as métricas apresentadas neste estudo, a Bacia do Ribeirão Cambé pode ser considerado uma bacia com nível de perturbação regular, pois tem uma problemática quanto ao descarte de resíduos sólidos e a falta de cobertura vegetal.

Introdução

O levantamento de dados referente ao monitoramento ambiental de bacias possibilita caracterizar e reconhecer o estado de conservação ou degradação de uma determinada área. Estas informações auxiliam no fornecimento de subsídios para a tomada de decisões de propostas de prevenção ou recuperação do local. A caracterização morfométrica de uma bacia hidrográfica permite elucidar as questões relacionadas ao entendimento da dinâmica local e regional de uma bacia, tendo em vista que fornecem informações relacionadas à drenagem, relevo e geologia associadas a dinâmica ambiental. Esses parâmetros revelam indicadores físicos de um determinado local, essenciais para estudos de vulnerabilidade ambiental, além servir de subsídios para a gestão pública do local (Teodoro *et al.*, 2007). Além disso, para o contexto ambiental, a caracterização de uma bacia, pode ser aplicada para diferentes propostas, que pode ser utilizado para identificar áreas de susceptíveis a erosão (Vaz *et al.*, 2021), fragilidade ambiental (Moura *et al.*, 2023), compreender a influência da cobertura do solo na capacidade de drenagem (Souza; Cunha, 2022), relação do uso e cobertura do solo com relevo (Gritti *et al.*, 2023) entre outras aplicações.



Para análises de diagnósticos de impactos macroscópios, pode-se utilizar protocolos de avaliação rápida (PAR), pois estes permitem uma análise sistemática de uma paisagem em diferentes pontos. Pedroso e Colesanti (2017) ressaltam a importância de aplicar PARs de forma contínua, para verificar a intensificação das atividades de uso e ocupação do solo em áreas de bacias hidrográficas, gerando a degradação de cursos d'água e seus respectivos entornos. As aplicações dos PARs podem ser feitas de formas unitária, onde o objetivo é realizar a caracterização visual e quali-quantitativa, como Segantim (2023), Castello Branco *et al.*, (2020), Silva *et al.*, (2023) ou associados a outras variáveis ambientais, como qualidade da água (Callisto *et al.*, 2021; Urata *et al.*, 2022), análise morfométrica (Pedroso e Colesanti, 2017), educação ambiental (Machado, 2019) entre outros.

Nesse contexto, o objetivo desse trabalho é realizar uma caracterização morfométrica da bacia para compreender a morfologia da bacia e a aplicar de um diagnóstico de impactos macroscópios por meio de um PAR na bacia do Ribeirão Cambé-Pr. A escolha desta bacia hidrográfica e devido à forte influência na formação da área urbana na bacia. A hipótese central deste trabalho é que esta bacia vem sendo significativamente alterada devido ao processo de urbanização e que por meio da aplicação de um PAR pode-se verificar a influência da antropização.

Materiais e Métodos

Os processos metodológicos desenvolvidos neste trabalho estão organizados de acordo com o diagrama da Figura 1.

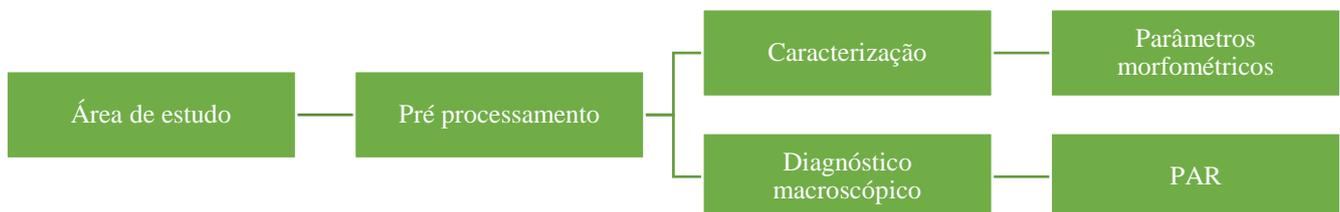


Figura 1: Processos metodológicos para grau de conservação da bacia.

A área de estudo escolhida refere-se a Bacia Hidrográfica do Ribeirão Cambé, localizada nos municípios de Londrina e Cambé no estado do Paraná (Figura 2 e Tabela 1), pertencente a bacia hidrográfica do Tibagi, e desagua em sua foz, no Ribeirão Três Bocas. Foram selecionados seis pontos amostrais no perfil longitudinal da bacia, com características ambientais diferentes, para a aplicação do Protocolo de Avaliação Rápida (PAR), onde deu-se preferência para as áreas com diferentes características e perturbações ambientais, sendo assim, a amostragem foi feita em área de nascente, local com alta influência urbana, Lago Igapó, formação florestal e área rural.

Tabela 1: Pontos de aplicação do PAR

Ponto	Coordenadas (m)		Característica
	Latitude	Longitude	
P1	476177,850	7424717,745	Nascente
P2	477976,197	7422892,325	Alta influência urbana
P3	480724,285	7421400,422	Lago Igapó/Alta influência urbana
P4	482872,476	7419966,681	Lago Igapó/Alta influência urbana
P5	485646,815	7418297,181	Parque Arthur Thomas/Formação florestal
P6	493266,919	7416775,971	Área rural

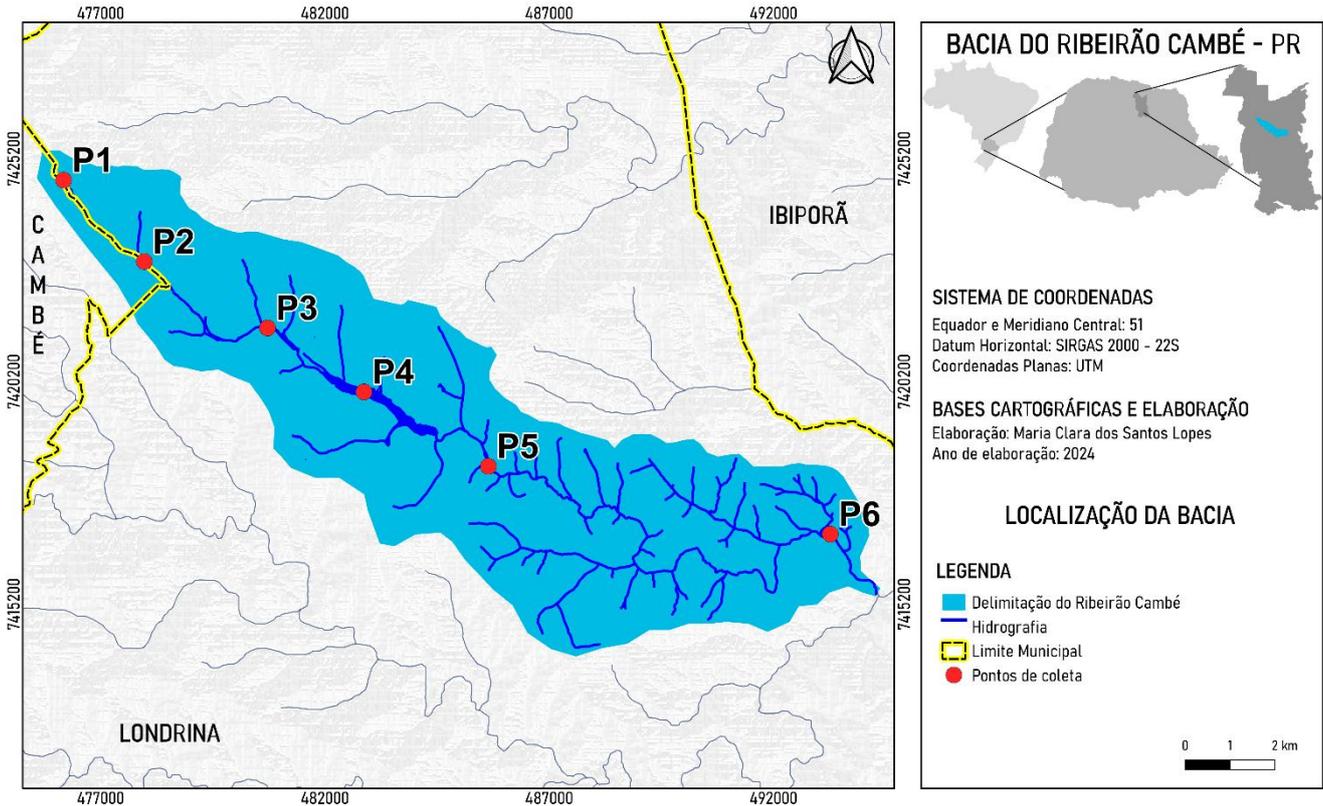


Figura 2: Mapa de Localização do Ribeirão Cambé.

A delimitação da área da bacia do Ribeirão Cambé foi realizada com a utilização do Modelo Digital de Elevação (MDE) disponibilizada pelo projeto FABDEM (Hawker, 2022), que possibilitou o emprego da técnica de processamento para extração da sub-bacias realizada no software Qgis (Versão Desktop 3.23.3) com auxílio do plugin Grass-Project (2013).

Inicialmente o Modelo Digital de Elevação foi reprojetoado para o SRC em UTM 22S, referente a área de estudo. Em seguida, realizou-se o processo de correção das falhas do MDE. As falhas ocorrem pela diferença de elevação e cota, assemelhando-se a uma depressão, esse processo é realizado pela função “r.fill.dir”, que utiliza a interpolação de vizinho mais próximo (Sobrinho *et al.*, 2010). A direção e rede de drenagem foram determinadas pelo “r.watershed”, onde tem-se os produtos de direção do escoamento da água e a representação matricial da drenagem, respectivamente (Santos; Lollo; Mauad, 2014). Com o produto da drenagem, determina-se o ponto-coordenada do exutório para a delimitação da bacia para o processo de extração “r.water.outlet”. Em seguida bacia foi vetorizada para facilitar a manipulação dos dados.

Para realizar as análises morfométricas da bacia do Ribeirão Cambé, utilizou-se os índices morfométricos apresentados no Quadro 1.

Quadro 1: Análises morfométrica realizadas

Característica morfométrica	Parâmetro
Relevo	Declividade (Embrapa, 1979)
	Hipsometria
	Amplitude altimétrica máxima (Christofoletti, 1980)
Geometria	Área
	Perímetro
	Fator de forma (Horton, 1945)
	Coefficiente de compacidade (Lima, 1996)
Rede de drenagem	Comprimento do curso principal
	Hierarquia fluvial
	Índice de Circularidade (Christofoletti, 1974)
	Densidade de drenagem (Vilela, Matos, 1975)

A declividade de um relevo pode ser classificada de acordo com as classes propostas pela Embrapa (1979). Para isso, é necessário realizar a transformação dos dados de graus para porcentagem. A classificação considera como Plano o intervalo de



0-3%, suavemente ondulado 3-8%, ondulado 8-20%, fortemente ondulado 20-45%, montanhoso 45-75% e acima de 75% fortemente montanhoso. Villela e Matos (1975) atribuem os intervalos de densidade de drenagem (Dd), na unidade km/km², em cinco classes, sendo inferior a 0,5 uma densidade de drenagem pobre, 0,5 - 1,5 regular, 1,5 - 2,5 boa, 2,5 - 3,5 muito boa e acima de 3,5 excepcionalmente bem drenada.

O PAR tem como objetivo realizar um diagnóstico de impactos ambientais macroscópios negativos influenciados por processos de urbanização. Para isso, utiliza-se uma lista de critérios pré-estabelecidos (Quadro 1), que exploram as particularidades da paisagem, atribuindo métricas numérica em uma escala de 0 a 10, interpretadas como “ótimo, bom, regular e ruim”, sendo ótimo (10) e ruim (0) (Quadro 3) e depois interpretados conforme a Tabela 2 (Campos; Nucci, 2021).

Quadro 2: Descrição dos critérios máximos e mínimos de avaliação do PAR

Critério de avaliação	Descrição	
	Valor máximo (100)	Valor mínimo (0)
Estabilidade da margem	Margem estável, sem evidência de erosão	Margem instável, com evidência de erosão em mais da metade de sua extensão. Margens canalizadas ou retificadas sem vegetação restabelecida
Presença e estado de conservação da mata ciliar	A vegetação ocupa quase toda margem e é composta predominantemente por espécies arbustivas e arbóreas, sem sinais de degradação causadas por atividades humanas	A vegetação é praticamente inexistente. O solo está exposto a intempéries naturais ou está impermeabilizado ou ocupado por edificações
Ocupação das margens do rio	A mata ciliar compreende toda (ou quase toda) margem do rio e é composta principalmente por espécies arbóreas e arbustivas	A margem é ocupada prioritariamente por estruturas urbanas, como residências, comércios, indústrias, etc
Resíduos sólidos	Não se observam resíduos sólidos no fundo nem nas margens do rio	Existe uma grande quantidade de resíduos sólidos no fundo e/ou nas margens do rio
Esgoto doméstico e efluente natural	Não se observa canalização, odor, presença de espuma, mancha escura, óleo ou sedimento na água	Existem três ou mais das seguintes evidências: 1) canalização das margens, 2) espuma na água ou sedimento, 3) odor característico de esgoto doméstico ou outro odor forte na água.
Alterações antrópicas no canal fluvial	Ausência de alterações antrópicas no canal fluvial, como dragagens, pontes, diques, estabilização artificial de margens	O rio encontra-se retificado e canalizado, com margens totalmente (ou quase totalmente) cimentadas
Deposição de sedimentos	Ausência de bancos de areia (feições deposicionais que podem aparecer na forma de ilhas ou barras que se desenvolvem ao longo das margens). As águas correm normalmente	Há muito sedimento depositado no rio, indicando alto nível de assoreamento. Os bancos de areia se estendem ao longo das margens e do rio e atrapalham o escoamento da água.
Substratos e/ou habitat disponíveis	Existem vários tipos e tamanhos de substratos e habitats estáveis para a biota aquática, tais como galhos e troncos, cascalhos, folhas e plantas aquáticas	Ausência de substratos e habitats estáveis disponíveis. Não existem galhos ou troncos, cascalhos, folhas e plantas aquáticas, ou estão soterrados
Soterramento	Não se observa acúmulo de lama ou areia no fundo do ribeirão	O fundo do ribeirão apresenta muita lama ou areia, cobrindo os substratos e habitats disponíveis
Animais	Observam-se com facilidade peixes, insetos aquáticos, anfíbios (sapos, rãs ou pererecas)	Não é visível nenhum animal aquático ou silvestre no ribeirão ou margens

Adaptado de: Campos (2020)

Os três primeiros critérios (estabilidade da margem, presença e estado de conservação da mata ciliar e ocupação das margens do rio) avaliam as condições das margens do rio, ocorrendo separadamente em margem direita (MD) e margem esquerda (ME). A escala gradativa das notas amplia a avaliação do campo e favorece a diferenciação das condições observadas. Com o



objetivo especializar a visualização das métricas atribuídas para a bacia, aplicou-se a técnica de interpolação das variáveis pelo método Inverso da Distância Ponderada (IDW), a partir dos parâmetros observados e a posição geográfica do ponto amostral. Para isso, utilizou-se o software Qgis (Versão desktop 3.26.3).

Tabela 2: Intervalos de avaliação geral do rio com auxílio do PARU

Pontuação	Condição geral
81-100	Ótimo (recuperado)
51-80	Boa (alterado)
21-50	Regular (impactado)
0-20	Ruim (muito impactado)

Fonte: Campos; Nucci, (2021)

Resultados e discussão

A bacia do Ribeirão Cambé tem uma amplitude altimétrica máxima de 249 m de altura considerando o MDE de relevo, sendo sua nascente (oeste – 634m) até a foz (sudeste – 385m). De acordo com a classificação de declividade (Tabela 3) proposto pela Embrapa, a bacia tem predominância de relevo ondulado (suavemente ondulado e ondulado) totalizando 68,5% da área e apenas 1% da área montanhosa (montanhoso e fortemente montanhoso). O relevo ondulado da bacia indica que o escoamento superficial, para maior parte dos solos, tende a ser médios ou rápidos.

Tabela 3: Classes de declividade

Classe de declividade	Descrição	Área (Km ²)
0 – 3	Plano	15,43
3 – 8	Suavemente ondulado	27,3
8 – 20	Ondulado	23,38
20 – 45	Fortemente ondulado	7,11
45 – 75	Montanhoso	0,72
≥ 75	Fortemente montanhoso	0,02

Com a análise de hierarquia fluvial da bacia do Ribeirão Cambé, pode-se observar cinco tipos de ramificações. A ramificação de 4º ordem contém uma extensão de 27,49 km², seguido da 3ª ordem com 6,4km², a 2ª ordem com 14,15 km² e a 1ª ordem, com 53 ramificações, totalizou 37,69 km². Os resultados da caracterização morfométrica estão na Tabela 4. A bacia totaliza uma área de aproximadamente 74 km². Os índices fator forma (Kf) e coeficiente de compacidade (Kc) indicam que a bacia tende a uma forma mais alongada, corroborando com o valor baixo do índice de circularidade (Ic), por isso a bacia, de forma geral, tem tendências a baixas ocorrências de grandes enchentes. Além disso, o resultado da densidade de drenagem (Dd) indicam uma bacia com densidade de drenagem regular (1,16), conforme indicado por Villela e Mattos (1975).

Tabela 4: Resultado da caracterização morfométrica

Parâmetro	Resultado
Área (km ²)	73,89
Perímetro (Km)	50,48
Fator de forma (Kf)	0,18
Coeficiente de compacidade (Kc)	1,64
Comprimento do curso principal (Lc)	27,49
Índice de Circularidade (Ic)	0,36
Densidade de drenagem (Dd)	1,16

O perfil longitudinal foi extraído a partir do curso hídrico da bacia do Ribeirão Cambé está ilustrado na Figura 3. O



ponto 1 (P1) pertence a nascente do Ribeirão Cambé, localizado na cota 604m. No ponto 4 (P4) é possível observar o trecho referente a área alagada do Lago Igapó (entre 5 e 10 km). O Lago Igapó corresponde uma área de represamento do Ribeirão Cambé. A obra foi realizada com o propósito de solucionar o problema de drenagem da área (Junior e Osvaldo, 2020). O ponto 5 (P5) apresenta uma variação de altitude de aproximadamente 50m, referente a uma queda d'água localizada no Parque Estadual Arthur Thomas. Esse espaço foi aproveitado para ser implementada a Usina Cambé que foi a primeira usina hidrelétrica de Londrina, inaugurada em 1939 funcionando por 28 anos (Prefeitura de Londrina, 2022).

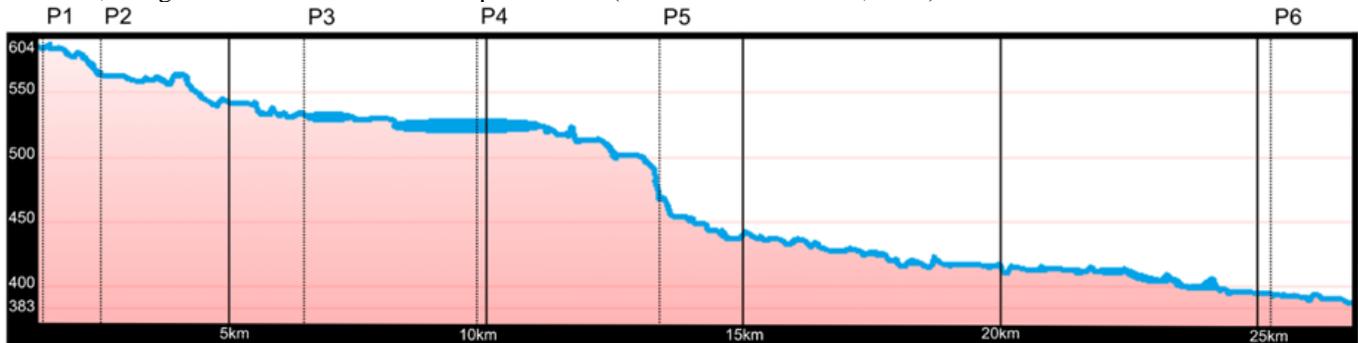


Figura 3: Processos de delimitação da bacia.

Os resultados da aplicação do PARU nos trechos do Ribeirão Cambé distribuíram-se entre duas classes: boa e regular. Os resultados podem ser visualizados na Tabela 5 e Figura 5. A pior condição foi constatada no ponto 5 e a melhor no ponto 1. O primeiro ponto analisado está localizado próximo à nascente, com cobertura vegetal, mas com alterações evidenciadas por aberturas e clareiras. Observa-se a ausência de encanamentos de esgoto, no entanto com a presença de resíduos sólidos nas margens (Figura 3 – P1). O segundo ponto analisado foi marcado pela quantidade volumosa de resíduos antecedendo a entrada no corpo hídrico, além de ocupações residenciais e comerciais, que influenciam diretamente na instabilidade das margens do rio (Figura 3 – P2). O terceiro ponto refere-se ao Lago Igapó IV. Nesse ponto é perceptível a ausência da vegetação ciliar e nota-se a erosão nas margens, e alteração no canal fluvial devido a ponte que liga as duas margens, no entanto tem a presença de sedimentos e animais na área (Figura 3 – P3). O ponto 4 é o Lago Igapó II, o local apresenta um canal fluvial com alterações, mata ciliar comprometida e bancos de sedimento (Figura 3 – P4). O ponto 5, embora esteja localizado dentro de uma Unidade de Conservação da cidade, apresentou a menor pontuação média do PAR (41,5). Isso ocorreu devido à ausência de vegetação no entorno do corpo hídrico, presença de resíduos sólidos e margens alteradas. Além disso, há a presença de grandes bancos de sedimentos e soterramento que comprometem a visibilidade de substratos no corpo hídrico (Figura 3 – P5). Por fim, o ponto 6 (Figura 3 - P6), é uma área com predominância de campos de pastagem ao longo das margens do rio. Embora há presença de vegetação, esta não é densa e apresenta clareiras. As margens estão descobertas e em alguns trechos apresentam indícios de erosão.

A presença de resíduos ao longo da bacia do Ribeirão Cambé é uma realidade que já foi relatada e quantificado em outros estudos ambientais no local, tais como Santos *et al.*, (2018), Beninca (2021), Feitosa (2019). Além de ter sido encontrado microplásticos em sedimento (Sousa, 2023) e Abdurahiman (2021) que identifica os principais pontos de acúmulos de resíduos no entorno da bacia.

Tabela 5: Resultado da caracterização morfométrica

Ponto	Característica	Pontuação por margem		Pontuação média	Condição geral média
		D	E		
P1	Nascente	69	72	70,5	Boa
P2	Alta influência urbana	49	62	55,5	Regular
P3	Lago Igapó (Lago IV)	60	57	58,2	Boa
P4	Lago igapó (Lago II)	46	46	46	Regular
P5	Parque Arthur Thomas	41	42	41,5	Regular
P6	Área rural	46	55	45,5	Regular

D = Direita, E = Esquerda

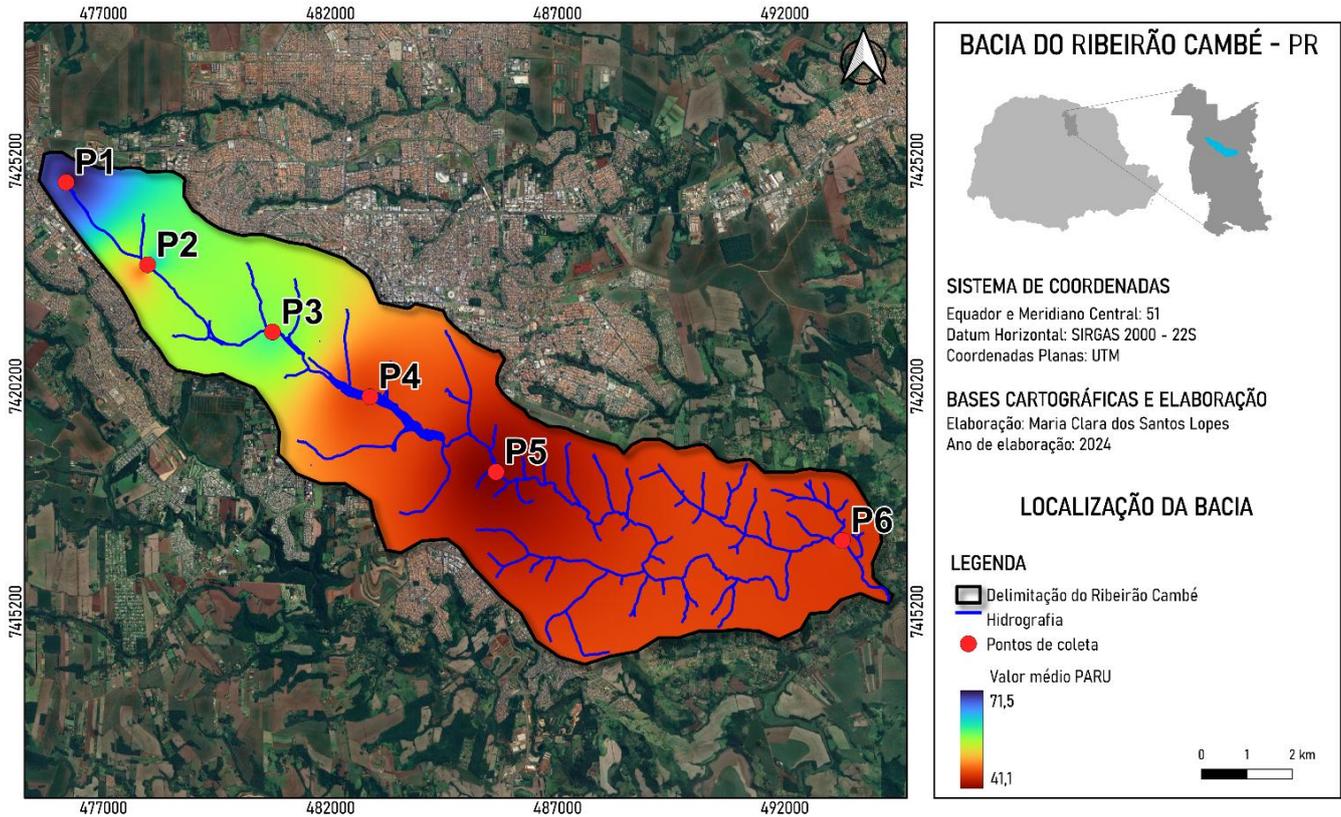


Figura 5: Processos de delimitação da bacia.



Figura 6: Pontos de análises.

Considerações finais

A análise morfométrica possibilita a compreensão integrada dos processos hidrológicos da bacia e a partir disso, é possível reconhecer o comportamento da rede de drenagem da bacia. No entanto, vale ressaltar que os padrões de drenagem sofrem interferências quando estão sob pressões da urbanização. Isso ocorre devido as alterações de uso e cobertura do solo que modificam os processos naturais de infiltração da água no solo, além das canalizações das margens, que consequentemente aumentam o volume de água que escoar e acumula no canal. Essas alterações no curso d'água tendem a aumentar processos de erosão e assoreamento ao longo dos anos.



Complementarmente, o PAR serve como uma ferramenta de baixo custo e de fácil aplicação, onde o pesquisador consegue identificar questões ambientais e avaliá-los de forma similar. Estas constatações são objetivas e pontuais, mas servem como orientação para propostas de intervenções.

De modo geral, com as métricas analisadas neste estudo a bacia do Ribeirão Cambé pode ser considerado como uma bacia com nível de perturbação regular pois apresenta problemas quanto ao descarte de resíduos sólidos e falta da cobertura vegetal.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a CAPES e Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo apoio financeiro e institucional, respectivamente.

Referências Bibliográficas

- Abdurahiman, B. (2021). Identificação dos pontos de acúmulo de resíduos sólidos urbanos no entorno da bacia do Ribeirão Cambé no município de Londrina/PR (Trabalho de Conclusão de Curso; p. 59). Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- Almeida, R. F. B.; Bayer, M.; Ferreira Junior, L. G. (2016). Morphometric compartmentation of the Coco River basin as subsidy to analysis of environmental fragility. *Mercator - Revista de Geografia da UFC*, v. 15, p. 83-94.
- Beninca, A. O. (2021). Quantificação de resíduos recicláveis na drenagem urbana do Lago Igapó I em Londrina - PR. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, p. 1-47.
- Branco, A. C.; Souza, L. L.; Sampaio, T. M.; Farias, A. K. S. R.; Miranda, K. H. F.; Neto, J. L. P.; Rodrigues, S. F. (2020). Protocolo de avaliação rápida como ferramenta de gestão de recursos hídricos urbanos. *Revista Mineira de Recursos Hídricos*, v. 1, p. 1-17.
- Callisto, M.; Macedo, D. R.; Alves, C. B. M.; Golgher, A. B.; Agra, J. U.; Magalhães, S.; Costa, I. S. (2021). Avaliação Ecológica Rápida de qualidade de água no rio das Velhas. *Zenodo*, v. 23, p. 1-23.
- Campos, J. C. (2020). Protocolo de avaliação rápida de rios urbanos como subsídio ao planejamento da paisagem: estudo de caso da bacia do Rio Palmital na Região Metropolitana de Curitiba (PR). 2020. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Campos, J. C.; Nucci, J. C. (2021). Protocolo de Avaliação Rápida de Rios Urbanos (PARU) como ferramenta de monitoramento ambiental. *GOT: Revista de Geografia e Ordenamento do Território*, n. 21, p. 121.
- Castello Branco, A., Lacerda, L., Sampaio, T. M., Karoline, A., Freitas, H., Lemes, J., & Stela Ferreira Rodrigues. (2020). Protocolo de avaliação rápida como ferramenta de gestão de recursos hídricos urbanos. *Revista Mineira de Recursos Hídricos*, 1(2). <https://doi.org/10.59824/rmrh.v1i2.197>
- Christofoletti, A. *Geomorfologia*. 2. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1974. v. 1p. 101
- Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (1999). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília. P. 412.
- Feitosa, M. C. (2019) Análise da estrutura limnológica e proposta de recuperação ambiental do reservatório do Parque Arthur Thomas (Londrina - PR) Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, p. 1-88.
- Gritti, O.; Boza, D.; Trentin, R. (2023). Uso da geotecnologia na análise morfométrica da bacia hidrográfica do rio Baios. *Revista de Geografia*, v. 40, p. 179-199.
- Hawker, L.; Uhe, P.; Paulo, L.; Sosa, J.; Savage, J.; Sampson, C.; Neal, J. (2022). A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*, v. 17, p. 1-12.
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological society of America bulletin*, v. 56, p. 275-370
- Lima, W. de P. (1996). Análise física da bacia hidrográfica. In LIMA, Walter de Paula. *Introdução ao manejo de bacias hidrográficas*. Piracicaba:ESALQ, p.49-66.



- Machado, A. P. F. (2019). Adaptação de um protocolo de avaliação rápida de rios e sua utilização como recurso didático em educação ambiental no ensino médio. Dissertação (Mestrado em E Conservação de Recursos Naturais do Cerrado) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Urataí, p. 1-70.
- Moura, B. B., Bressan, L. M., Wojahn, V. de S., Boeira, L. dos S., & Silva, V. S. S. (2023). Análise da Fragilidade Ambiental em uma Sub-Bacia Hidrográfica na Metade Sul do Rio Grande do Sul com o uso de geoprocessamento. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16(5), 2375–2389. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.5.p2375-2389>
- Prefeitura de Londrina (2022). Cartilha Digital: Parque Municipal Arthur Thomas, v.1, p.1.
- Pedroso B., L., Colenseti, M. T. M. (2017). Aplicação do Protocolo De Avaliação Rápida de Rios em uma microbacia hidrográfica localizada ao sul de Goiás. *Caminhos De Geografia*, v. 18, p. 248–262.
- Santos, F. M.; Lollo, J. A.; Mauad, F. F. (2014). Drainage characterization of the Córrego Caçula River Basin – Ilha Solteira/Sp. *Anais: Encontro Nacional das Águas Urbanas*, v. 10, p. 1-4.
- Santos, R. S; Deus. S. P.; Grizio-Orita, E. V. (2018). Descarte recorrente e irregular de resíduos sólidos às margens do Ribeirão Cambé -Londrina/Pr. *Geographia Opportuno Tempore, Londrina*, v. 4, p. 57-69.
- Segantim, L. P. (2023). Efeitos da urbanização na sub-bacia do Ribeirão Barra Nova - Apucarana-PR. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, p. 1-105.
- Silva, J. G. S., Scusse, C, Varela, E. P, Nicoladelli, T. B, Luz, C, Pires, D. A, Milanez, R. P, Olivo, E. F, Zocche, J.J (2023). Aplicação de protocolo de avaliação rápida da integridade ambiental na bacia hidrográfica do Rio Araranguá, SC. *Boletim Paulista de Geografia*, n. 109, p. 1-25.
- Sobrinho, T. A.; Oliveira, P. T. S.; Rodrigues, D. B. B.; Ayres, F. M. (2010). Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, v. 30, p. 46-57.
- Souza, C. C.; Cunha, M. C. (2022). Análise dos Parâmetros Morfométricos da Rede de Drenagem e Rede Viária da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Paraíso, Jataí-GO. *Sociedade & Natureza*, v. 34, p. 1-10.
- Souza, G. A. (2023). Análise de microplásticos em sedimentos de lagos urbanos. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, p. 1-67.
- Teodoro, V. L. I.; Teixeira, D.; Costa, D. J. L.; Fuller, B. B. O Conceito de Bacia Hidrográfica e a Importância da Caracterização Morfométrica para o Entendimento da Dinâmica Ambiental Local. *Revista Brasileira Multidisciplinar*, v. 11, p. 137-156.
- Urata, S. L. U., Lara, B. B, Presenti, M. E. A. Marques, T. A., Prates, K. V. M. C. Nível de perturbação e análise da qualidade da água de um córrego urbano no município de Londrina – Pr. *Anais: 19º Congresso Nacional do Meio Ambiente – Poços de Caldas*, v. 1, p. 1-19.
- Vaz, A. P. M. S.; Ramos, S. M.; Froehner, S. J. (2021). Bacia hidrográfica do rio balsas: diagnóstico físico e avaliação qualitativa de áreas suscetíveis à erosão. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 26, p. 77-87.
- Villela, S. M.; Mattos (1975), A. *Hidrologia aplicada*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, p. 1-245.



AVALIAÇÃO AMBIENTAL ESTRATÉGICA NA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL: UMA REVISÃO

1Lais Almeida de Souza, 2José Cordeiro do Nascimento, 3José Wilker de Freitas Sales, 4Juliano Curi de Siqueira, 5Rose Mary Teixeira de Lemos, 6Simone Mendonça dos Santos, 7Frederico Fabio Mauad

1Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP), e-mail: laisalmeida@usp.br; 2Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP), e-mail: josecordeirojr99@gmail.com; 3Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP), e-mail: josewfsales@usp.br; 4Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP), e-mail: julianocuri@usp.br; 5 4Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP), e-mail: roselemos@usp.br; 6Universidade Federal do Paraná (UFPR), e-mail: simone.santos@ufpr.br; 7Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP), e-mail: mauadffm@sc.usp.br

Palavras-chave: Planejamento de Recursos Hídricos; Gestão de Recursos Hídricos Integradas; Ferramenta para Políticas, Planos e Programas.

Resumo

O presente trabalho foi desenvolvido para avaliar o estado da arte da aplicação do processo de Avaliação Ambiental Estratégica (AAE) como ferramenta a elaboração ou avaliação de Políticas, Planos e Programas (PPPs) de Recursos Hídricos. Como definida por diversos autores, Avaliação Ambiental Estratégica consiste em um processo abrangente de avaliação dos impactos ambientais decorrentes da Políticas, Planos e Programas, mostrando alternativas para reduzir os impactos e subsidiar os processos decisórios. O processo da Avaliação Ambiental Estratégica, quando elaborado adequadamente, insere os conceitos ambientais e de sustentabilidade para a tomada de decisões estrategicamente. Os recursos hídricos consistem nos recursos naturais de múltiplas funcionalidades, necessários a todos seres-vivos, seu aproveitamento inadequado causa diversos efeitos negativos que podem afetar a disponibilidade de qualidade desse recurso para as próximas gerações. A gestão e planejamento dos recursos hídricos deve ser realizada de forma integrada e estratégica, e esta visão é promovida pela associação da Avaliação Ambiental Estratégica nesses processos. Para este diagnóstico realizou-se uma pesquisa na base de dados Scopus® com as palavras-chave “Strategic Environmental Assessment” AND “water resources” limitando-se a trabalhos com área de estudo nacional. Seguindo a metodologia definida, classificou-se 12 artigos científicos, dos quais foi realizada uma avaliação crítica. Sobre o estado da arte de estudos publicados sobre a aplicação de Avaliação Ambiental Estratégica em recursos hídricos pode-se concluir que é mais recorrente quando aplicada a Planos e, a abordagem principal dos estudos publicados visa propor sua aplicação.

Introdução

A Avaliação Ambiental Estratégica (AAE) possui um papel central no processo de planejamento e de tomada de decisão de Políticas, Planos e Programas (PPPs) (TETLOW; HANUSCH, 2012), em razão de superar algumas limitações dos estudos de impactos ambientais ao introduzir considerações prévias sobre alternativas e facilitar a identificação dos impactos ambientais desde os estágios iniciais do processo decisório (WOOD; DJEDDOUR, 1992; LEE; WALSH, 1992). Além disso, a AAE auxilia na melhora da performance ambiental no contexto complexo do quadro de decisões que antecipa o desenvolvimento de projetos (PARTIDARIO, 2015).

[A AAE consiste em um instrumento abordado formalmente pela *US National Environmental Policy Act (NEPA)* em 1969 (POPE *et al.* 2013; JONES *et al.* 2005) sendo, desde então, introduzido dentro de um enquadramento legal de governos, organizações internacionais e bancos de desenvolvimento ao redor do globo (LEE; WALSH, 1992; WOOD, 2002; SADLER, 2004). Nesse contexto, o sistema de AAE foi transformado numa exigência legal em mais de 60 países (NOBLE, 2009; FAITH-ELL; FISCHER, 2021 *apud* NWANEKEZIE; NOBLE; POELZER, 2022), e sua eficácia vem sendo discutida e otimizada desde meados da década de 90 (GEISSLER *et al.*, 2019).

A AAE é caracterizada como um processo sistemático e participativo que visa assegurar que as questões ambientais relevantes sejam integradas no processo de tomada de decisões estratégicas de PPPs desde as fases iniciais (PARTIDARIO, 2015; 2021), com rigor científico (FISCHER, 2007), e com o papel de contribuir para que princípios, diretrizes e ações de proteção ambiental sejam atendidos aos requisitos legais (DUARTE; SOUZA; DOS SANTOS, 2022). Por conseguinte, o seu objetivo final é ajudar a proteger o ambiente e a promover a sustentabilidade em uma abordagem proativa (THERIVEL, 2004; TETLOW; HANUSCH, 2012; NOBLE; KWANEKEZIE, 2017), e identificar e avaliar os impactos potenciais do desenvolvimento e implementação de PPPs (TETLOW; HANUSCH, 2012) a partir de um contexto não estático e que evolui ao longo do tempo (MONTAÑO; FISCHER, 2019).

Entre PPPs que visam a propagação do contexto de sustentabilidade, deve-se destacar que no Brasil as preocupações com a sustentabilidade hídrica foram adiadas pela conhecida abundância de seus recursos hídricos. Uma vez que o País possui o maior suprimento hídrico do planeta, a necessidade de uma gestão eficiente foi por muito tempo abrandada (SILVA; PRUSKI, 2005; VASCONCELOS, 2013).



O Código das Águas de 1934 destacou-se como primeira tentativa de regulação do acesso aos recursos hídricos, contudo, em um modelo centralizador com foco no aproveitamento hidráulico, aspectos característicos do desenvolvimento econômico da época. Passados 63 anos, seguindo uma tendência internacional (VEIGA; MAGRINI, 2013), em termos de gestão integrada e descentralizada ao nível da bacia hidrográfica, em 1997, a Lei nº 9.433 de 1997 instaurou um novo paradigma de gestão hídrica no País (VASCONCELOS, 2013). Entre os instrumentos estabelecidos pela Lei das Águas, destacam-se os Planos de Recursos Hídricos, que visam orientar e fundamentar a implementação da Política e o gerenciamento dos recursos hídricos (BRASIL, 1997). Entre os fundamentos da PNRH, ressalta-se a gestão descentralizada, com participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades (BRASIL, 1997). Para atingir seus objetivos, a política conta com instrumentos, entre eles, os Planos de Recursos Hídricos, realizados por unidades territoriais de gestão, que são as Bacias Hidrográficas.

Os Planos de Bacia Hidrográfica (PBHs) a serem elaborados pelos Comitês, compostos por representantes da União, dos Estados e Distrito Federal, municípios, usuários das águas e entidades civis situadas na bacia hidrográfica em questão. Em bacias hidrográficas com conflitos instalados, os PBHs devem, portanto, estabelecer, de forma organizada, soluções negociadas entre os diversos atores, com objetivo de minimizar os atuais e evitar conflitos futuros.

De acordo com Santos (2015), o planejamento de recursos hídricos realizado por da elaboração de PBHs consiste em processo que busca a otimização da utilização dos recursos, definindo as melhores alternativas nos aspectos ambientais, econômicos e sociais. Contudo, apesar da importância estratégica atribuída aos PBHs como indutores da Gestão Integrada dos Recursos Hídricos no país (LANNA; PEREIRA; HUBERT, 2002; ANA, 2013; ZUFFO, 2016), entraves técnicos e políticos têm dificultado a definição de alternativas de desenvolvimento capazes integrar as demandas, os objetivos e valores dos diversos atores envolvidos no processo decisório no âmbito dos CBHs, limitando a implementação e adoção desses planos por parte dos diversos setores usuários (CAMPOS; SOUSA, 2003).

Como uma abordagem mais ampla do que a Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) a Avaliação Ambiental Estratégica (AAE) surgiu da necessidade de adoção de abordagens participativas e transparentes, em relação à tomada de decisão, associando crescimento econômico, equidade social e preservação ambiental de modo equilibrado, reforçando assim o conceito de desenvolvimento sustentável (ESPINOSA, 1996). A relação entre as opções de desenvolvimento, a apropriação (sustentável) da base de recursos ambientais e os impactos delas resultantes fundamentam, portanto, o processo de AAE (TEIXEIRA, 2008). Trata-se de um processo sistemático e contínuo, com análises e considerações estratégicas para atingir os objetivos propostos, promovendo a integração efetiva das considerações ambientais, econômicas, sociais e políticas (COORDENADORIA DE PLANEJAMENTO AMBIENTAL – SP, 2018).

Em face desta problemática, é importante perceber o potencial da AAE como uma das possíveis soluções para esse cenário crítico, uma vez que tem sido descrita como uma ferramenta útil para a gestão de recursos hídricos (GULLÓN, 2005; KING; SMITH, 2016; COELHO *et al.*, 2017).

Este trabalho teve como objetivo avaliar o uso da Avaliação Ambiental Estratégica na elaboração de Políticas, Planos e Programas relacionados a gestão de recursos hídricos no Brasil.

Material e Métodos

Para a estruturação de uma base de referência analítica, realizou-se pesquisa por palavras-chave na base de dados Scopus®, que além de ser considerada a maior base de dados de documentos científicos de referência do mundo (CAPES, 2007; ELSEVIER, 2023), contempla apenas a literatura acadêmica (FISCHER; ONYANGO, 2012), contribuindo para uma pesquisa mais focada e precisa.

Assim, após avaliação de alguns termos de busca, foram utilizados como palavras-chave os termos: “*strategic environmental assessment*” AND “*water resources*”. Para refinar o foco da pesquisa, utilizou-se a ferramenta de filtro automático da base de dados, limitando a busca ao título do artigo, resumo ou palavras-chave.

Como resultado da busca, e o refinamento para apenas trabalhos que tratassem do histórico brasileiro, foram encontrados 12 (doze) artigos científicos. A partir desses documentos, realizou-se, em um segundo momento, a correlação destes com a temática de AAE a partir da leitura e análise qualitativa dos títulos, resumos e palavras-chaves e, finalmente, do corpo dos trabalhos.

Após leitura do corpo de todos os artigos selecionados, a última triagem apontou 7 (sete) artigos científicos, os quais foram analisados de forma detalhada a partir da leitura do texto completo, visando identificar as lacunas de conhecimento e suas contribuições e entraves para a AAE.

Resultados e Discussão

A partir dos 12 (doze) artigos científicos encontrados, 05 (cinco) foram retirados da análise (Tabela 1). Identificou-se que esses estudos não abordam a temática da AAE voltada para a gestão de recursos hídricos. As avaliações abordadas nos estudos excluídos consistiram, por exemplo, em avaliação dos efeitos da plantação de cana de açúcar no solo, análise e caracterização da seca na região da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, desenvolvimento rodoviário e a relação entre AAE e mudanças climáticas.



Tabela 1 - Artigos científicos excluídos da análise

Título do artigo original	Referência
Capturing the implications of land use change in Brazil through environmental assessment: Time for a strategic approach?	Gallardo e Bond (2011)
Spatial-Temporal Characterization of Droughts in the Paraíba do Sul Basin	Santana, Santos e Justi da Silva (2020)
Tiering strategic environmental assessment and project environmental impact assessment in highway planning in São Paulo, Brazil	Sánchez e Silva-Sánchez (2008)
Identifying the missing link between climate change policies and sectoral/regional planning supported by Strategic Environmental Assessment in emergent economies: Lessons from Brazil	Nadruz <i>et al.</i> (2018)
Multi-criteria analysis for selection of priority management programs for the Japarutuba River Basin, SE, Brazil	dos Santos <i>et al.</i> (2021)

O artigo de Nadruz *et al.* (2018) não apresentou foco na relação buscada por esta revisão, não relacionando os ganhos ou alterações promovidas na sistematização da AAE em conjunto aos recursos hídricos. Já no artigo de dos Santos *et al.* (2021), foi apresentado o estudo realizado sobre o Plano da Bacia Hidrográfica do Rio Japarutuba (PBHJ), localizado no Estado de Sergipe. De acordo com os autores, a Bacia estudada é avaliada como uma das mais degradadas do estado de Sergipe, principalmente pela pressão da urbanização sobre os ecossistemas e pela falta de saneamento adequado, havendo então a necessidade de reavaliação do Plano. Para isso, os autores desenvolveram um método de análise multicritério de decisão aplicando-se o Processo Hierárquico Analítico, com o objetivo de definir uma escala de prioridade para execução dos 24 programas adotados no plano.

O método do Processo Hierárquico Analítico foi de suma importância para definir os programas prioritários para a gestão sustentável da Bacia do Rio Japarutuba, possibilitando entender melhor os níveis de criticidade e ampliar a visão ambiental estratégica nos processos de gestão integrada da bacia (DOS SANTOS *et al.*, 2021). Entretanto, como o artigo trata apenas da utilização da análise multicritério para avaliação dos programas adotados no PBHJ, não são apresentadas contribuições e nem entraves da AAE para a gestão de Recursos Hídricos no artigo, desta forma, conforme os critérios inicialmente estabelecidos, o artigo também foi excluído da análise fundamental.

Em resultado, a triagem dos documentos apontou 07 (sete) artigos científicos, os quais foram analisados de forma detalhada a partir da leitura do texto completo, visando identificar as lacunas de conhecimento e suas contribuições e entraves para a AAE, estão apresentados no Tabela 2.

Os autores analisados identificaram que a AAE é uma boa ferramenta para elaboração de PPPs voltados a gestão de recursos hídricos, sendo recomendado que sejam realizados estudos mais abrangentes envolvendo AAE em bacias hidrográficas, sempre visando a redução da vulnerabilidade das bacias e conseqüentemente uma melhoria na qualidade ambiental do local (ÁVILA *et al.*, 2018).

Em suas etapas, a AAE demanda que seja realizado o levantamento de alternativas e metas, que são ponderadas e consideram os impactos ambientais a longo prazo, diretos e indiretos, bem como cumulativos, desde os estágios iniciais do planejamento (GARFÌ *et al.*, 2011; PIZELLA; SOUZA, 2013; SECRON *et al.*, 2017; SIQUEIRA; DOS SANTOS, 2021).

Neste contexto, a AAE possui potenciais benefícios quando realizada em conjunto a elaboração de planos, atuando como uma forma de garantir a inserção das variáveis ambientais em todas as fases de sua elaboração (PIZELLA; SOUZA, 2013) e, ainda atua cobrindo a lacuna de falta de políticas ou planejamento estratégicos (GARFÌ *et al.*, 2011). No geral, os autores reforçam a importância de que estes aspectos sejam agregados desde os estágios iniciais do planejamento (WESTIN, DOS SANTOS, MARTINS, 2014; ÁVILA *et al.*, 2018; DUARTE, SOUZA, DOS SANTOS, 2022).



Tabela 2 - Artigos científicos selecionados relativos à aplicação de AAE em sistemas de gestão de recursos hídricos no Brasil, visando identificar as lacunas do conhecimento e as contribuições e entraves relacionados à temática

Título	Área de estudo / Nível hierárquico	Lacuna do conhecimento	Referência
Contributions of the French Strategic Environmental Assessment to Brazilian planning in water source areas: the Billings Reservoir sub-basin case	São Paulo / Plano	Desenvolver estudos sobre a participação da sociedade, a definição de recomendações, mitigação de impactos adversos, potencialização de impactos positivos e para a etapa de acompanhamento.	Duarte, Souza e dos Santos (2022)
Solutions proposed for socio-environmental conflicts and concerning multiple-use hydroelectric reservoirs in Brazil	Nacional / Política	Desenvolver estratégias eficazes para gerir a incerteza dentro do contexto da AAE, especialmente em relação aos recursos hídricos e às várias partes interessadas envolvidas.	Siqueira e dos Santos (2021)
Relevance of strategic environmental assessment to Rio Grande basin management	Minas Gerais / Plano	N/A	Ávila <i>et al.</i> (2018)
Proposal of a hydric index to support industrial site location decision-making applying a fuzzy multi-attribute methodology	Bahia / Programa	Uso associado de metodologias multicriteriais pode promover a AAE em outras esferas. Como exemplo, a metodologia aplicada (Fuzzy), permite modelar e monitorar os resultados, auxiliando a subjetividade do tomador de decisão.	Secron <i>et al.</i> (2017)
Hydropower expansion and analysis of the use of strategic and integrated environmental assessment tools in Brazil	N/A	Analisar as diferenças entre a aplicação de Avaliações Ambientais Integradas e AAE, e suas contribuições na tomada de decisão ao setor hidrelétrico.	Westin, dos Santos e Martins (2014)
Avaliação ambiental estratégica de planos de bacias hidrográficas	São Paulo / Plano	N/A	Pizella e Souza (2013)
Multi-criteria analysis for improving strategic environmental assessment of water programmes. A case study in semi-arid region of Brazil	Minas Gerais / Programa	Potencial uso de Metodologias Multicritério de Apoio à Decisão em importantes etapas, destacando as fases de escolha de alternativas e de monitoramento.	Garfi <i>et al.</i> (2011)

(N/A = Não Apresentado)

Ainda entre as principais contribuições observadas, os autores destacam o cumprimento e compatibilização das Políticas, Planos e Programas do contexto em avaliação, bem como a integração de diretrizes internacionais e convenções políticas relevantes (PIZELLA; SOUZA, 2013, SIQUEIRA; DOS SANTOS, 2021).

Quanto aos levantamentos para a identificação de lacunas de conhecimento, para que possa estabelecer subsídios teóricos para estudos futuros, dois documentos estudados não apresentaram lacunas no seu arcabouço analisado (PIZELLA; SOUZA, 2013 e ÁVILA *et al.*, 2018). Entretanto, há um destaque importante quanto ao uso associado de metodologias multicriteriais, como enfatizam Garfi *et al.*, (2011) e Secron *et al.*, (2017), uma vez que o potencial uso destas metodologias de apoio à decisão, em importantes etapas do estudo do impacto, auxiliam a subjetividade do tomador de decisão, destacando-se fases de escolha de alternativas e de monitoramento.

Corroborando com Malczewsky (2006) que afirma que a associação da Análise Multicritério e de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) podem ser pensados como um processo que transforma e combina dados geográficos e juízos de valor para obter informações para a tomada de decisões. Duarte *et al.*, (2022) enfatizam a necessidade de desenvolver estudos sobre a participação da sociedade, a definição de recomendações, a mitigação de impactos adversos, a potencialização de impactos positivos e para a etapa de acompanhamentos. Já Westin *et al.*, (2014) sugere analisar as diferenças entre a aplicação de Avaliações Ambientais Integradas e AAE, e suas contribuições na tomada de decisão ao setor hidrelétrico.

Por fim, Siqueira e Santos (2021) abordam desenvolver estratégias eficazes para gerir a incerteza dentro do contexto da



AAE, especialmente em relação aos recursos hídricos e às várias partes interessadas envolvidas.

O principal entrave diagnosticado e citado pelos autores é a falta de regulamentação da AAE no País; é comum o posicionamento de que ela poderia desempenhar um papel importante na proteção ambiental. Esta ausência legal é relatada como um problema para a abordagem deste instrumento por Garfi *et al.* (2011), Pizella e Souza (2013), Ávila *et al.* (2018) e Siqueira e dos Santos (2021).

Pizella e Souza (2013) ainda destacam a ausência de diretrizes para a elaboração e a falta de informações importantes (banco de dados), bem como as falhas no processo de divulgação antes da realização da AAE. Siqueira e dos Santos (2021) afirmam que falta de funcionamento integrado das instituições públicas, e já Ávila *et al.* (2018) destaca que ainda há uma falta considerável de integração na legislação ambiental brasileira que resulta em uma abordagem insuficiente e em um apoio político insuficiente.

Considerações finais

A Avaliação Ambiental Estratégica pode ser analisada como uma ferramenta potencial para uso na gestão de recursos hídricos, adotando uma abordagem integrada na preparação e avaliação dos Planos de Bacia Hidrográfica em vista a aumentar a perspectiva da participação de diversas partes interessadas.

Essa participação promove a quebra de barreiras tradicionais entre os grupos de interesse e, particularmente durante o processo de planejamento pode auxiliar com a solução de diversos problemas considerados complexos de recursos hídricos. Os procedimentos integrados de consulta são os mais propícios para abordar as questões sociais, econômicos e ambientais que formam a base dos procedimentos sustentáveis de gestão da água.

Os autores analisados identificaram que a AAE é uma boa ferramenta para elaboração de PPPs voltados a gestão de recursos hídricos, sendo recomendado que sejam realizados estudos mais abrangentes envolvendo AAE em bacias hidrográficas, sempre visando a redução da vulnerabilidade das bacias e conseqüentemente uma melhoria na qualidade ambiental do local (ÁVILA *et al.*, 2018).

Em suas etapas, a AAE demanda que seja realizado o levantamento de alternativas e metas, que são ponderadas e consideram os impactos ambientais a longo prazo, diretos e indiretos, bem como cumulativos, desde os estágios iniciais do planejamento (GARFI *et al.*, 2011; PIZELLA; SOUZA, 2013; SECRON *et al.*, 2017; SIQUEIRA; DOS SANTOS, 2021).

Neste contexto, a AAE possui potenciais benefícios quando realizada em conjunto a elaboração de planos, atuando como uma forma de garantir a inserção das variáveis ambientais em todas as fases de sua elaboração (PIZELLA; SOUZA, 2013) e, ainda atua cobrindo a lacuna de falta de políticas ou planejamento estratégicos (GARFI *et al.*, 2011). No geral, os autores reforçam a importância de que estes aspectos sejam agregados desde os estágios iniciais do planejamento (WESTIN, DOS SANTOS, MARTINS, 2014; ÁVILA *et al.*, 2018; DUARTE, SOUZA, DOS SANTOS, 2022).

Ainda entre as principais contribuições observadas, os autores destacam o cumprimento e compatibilização das Políticas, Planos e Programas do contexto em avaliação, bem como a integração de diretrizes internacionais e convenções políticas relevantes (PIZELLA; SOUZA, 2013, SIQUEIRA; DOS SANTOS, 2021).

De acordo com os documentos analisados, o principal entrave diagnosticado e citado pelos autores é a falta de regulamentação da AAE no País; é comum o posicionamento de que ela poderia desempenhar um papel importante na proteção ambiental. Mas embora a AAE ainda não ser um sistema regulamentado no Brasil, este fato não impede sua aplicação.

Destaca-se como possível benefício da incorporação de AAE no planejamento e execução de PPPs relacionadas à gestão de recursos hídricos, a oportunidade de inclusão de considerações ambientais desde as etapas iniciais do processo decisório visando promover a sustentabilidade ambiental no setor hídrico e a proteção das bacias hidrográficas em todo o território nacional.

Destaca-se ainda o uso de ferramentas integradas, como ferramentas de apoio a decisão como importantes para ganho de qualidade na Avaliação Ambiental Estratégica que está sendo elaborada.

Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer a Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

- Ávila, P. A. *et al.*; 2018. Relevance of strategic environmental assessment to Rio Grande basin management. CERNE, v. 24, n. 3, p. 225-232.
- Bond, J.; Cherp, A.; 2000. Quality review package for strategic environmental assessments of land-use plans. Impact Assessment and Project Appraisal, v. 18, n. 2, p. 99-110.
- Brasil.; 1997. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 09 jan. 1997, p. 470.
- Coelho, R. S. *et al.*; 2017. Use of indicators in River Basin Management Planning and Strategic Environmental Assessment processes. Impact Assessment and Project Appraisal, v. 36, n. 2, p. 155-172.



- Dos Santos, C. Z. A. *et al.*; 2021. Multi-criteria analysis for selection of priority management programs for the Japaratuba River Basin, SE, Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 25, n. 10, p. 717-724.
- Duarte, C. G.; Souza, L. R.; Dos Santos, S. M.; 2022. Contributions of the French Strategic Environmental Assessment to Brazilian planning in water source areas: The Billings Reservoir sub-basin case. *Sustainability in Debate*, v. 13, n. 1, p. 133-150.
- Fischer, T. B.; Onyango, V.; 2012. Strategic environmental assessment-related research projects and journal articles: an overview of the past 20 years. *Impact Assessment and Project Appraisal*, v. 30, n. 4, p. 253-263.
- Gallardo, A. L. C. F.; Bond, A.; 2011. Capturing the implications of land use change in Brazil through environmental assessment: Time for a strategic approach? *Environmental Impact Assessment Review*, v. 31, n. 3, p. 261-270.
- Garfi, M. *et al.*; 2011. Multi-criteria analysis for improving strategic environmental assessment of water programmes. A case study in semi-arid region of Brazil. *Journal of Environmental Management*, v. 92, n. 3, p. 665-675.
- Geissler, G. *et al.*; 2019. Effectiveness of strategic environmental assessment in Germany? – meta-review of SEA research in the light of effectiveness dimensions. *Impact Assessment and Project Appraisal*, v. 37, n. 2, n. 3-4, p. 219-232.
- Gullón, N.; 2005. Links between the water framework directive and SEA. In: SHMIDT, M.; JOÃO, E. (Eds.). *Implementing strategic environmental assessment*. Cap. 35. Berlin: Springer-Verlag, p. 513-521.
- Jones, C. *et al.*; 2005. *Strategic Environmental Assessment and Land Use Planning: An International Evaluation*. 1a ed. Oxfordshire: Routledge.
- King, H.; Smith, L.; 2016. Many Rivers to Cross: Evaluating the Benefits and Limitations of Strategic Environmental Assessment for the Koshi River Basin. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*, v. 18, n. 2, p. 1-21.
- Lee, N.; Walsh, F.; 1992. Strategic environmental assessment: an overview. *Project Appraisal*, v. 7, n. 3, p. 126-136.
- Malczewski, J.; 2006. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 20, n. 7, p. 703-726.
- Malvestio, A. C.; Montaña, M.; 2019. From medicine to poison: how flexible strategic environmental assessment may be? Lessons from a non-regulated SEA system. *Impact Assessment and Project Appraisal*, v. 37, n. 5, p. 437-451.
- Matthews, B; Ross, L.; 2010. *Research Methods: A Practical Guide for the Social Sciences*. Harlow: Pearson Education Limited.
- Montaña, M.; Fischer, T. B.; 2019. Towards a more effective approach to the development and maintenance of SEA guidance. *Impact Assessment and Project Appraisal*, v. 37, n. 2, p. 97-106.
- Nadruz, V. do N. *et al.*; 2018. Identifying the missing link between climate change policies and sectoral/regional planning supported by Strategic Environmental Assessment in emergent economies: Lessons from Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 88, p. 46-53.
- Noble, B. *et al.*; 2019. Effectiveness of strategic environmental assessment in Canada under directive-based and informal practice. *Impact Assessment and Project Appraisal*, v. 37, n. 3-4, p. 344-355.
- Noble, B.; Kwanekezie, K.; 2017. Conceptualizing strategic environmental assessment: Principles, approaches and research directions. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 62, p. 165-173.
- Noble, B.F.; 2009. Promise and dismay: the state of strategic environmental assessment systems and practices in Canada. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 29, n. 1, p. 66-75.
- Nwanekezie, K.; Noble, B.; Poelzer, G.; 2022. Strategic assessment for energy transitions: A case study of renewable energy development in Saskatchewan, Canada. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 92, p. 106688.
- Nwanekezie, K.; Noble, B.; Poelzer, G.; 2021. Transitions-based strategic environmental assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 91, p. 106643.



Oliveira I. S. D.; Montañó M.; Souza M. P.; 2009. Avaliação Ambiental Estratégica. São Carlos: Suprema.

Partidario, M. R.; 2015. A strategic advocacy role in SEA for sustainability. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*, v. 17, n. 1, p. 1550015.

Partidario, M. R.; 2021. Strategic thinking for sustainability (ST4S) in strategic environmental assessment. In: Fischer, T. B.; González, A. (Eds.). *Handbook on Strategic Environmental Assessment*. Cap. 4. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, p. 41-57.
Partidario, M. R.; 2020. Transforming the capacity of impact assessment to address persistent global problems. *Impact Assessment and Project Appraisal*, v. 38, n. 2, p. 146-150.

Pellin, A. *et al.*; 2011. Avaliação ambiental estratégica no Brasil: considerações a respeito do papel das agências multilaterais de desenvolvimento. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.16, n.1, p. 27-36.

Pizella, D. G.; Souza, M. P. de.; 2013. Strategic environmental assessment for watershed management plans. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 18, n. 3, p. 243-252.

Pope, J. *et al.*; 2013. Advancing the theory and practice of impact assessment: Setting the research agenda. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 41, p. 1-9.

Sadler, B.; 2004. On evaluating the success of EIA and SEA. In: A. Morrison-Saunders and J. Arts (eds.). *Assessing impact – Handbook of EIA and SEA follow-up*. Cap. 11. London: Routledge, p. 248-285.

Sánchez, L. E.; Silva-Sánchez, S. S.; 2008. Tiering strategic environmental assessment and project environmental impact assessment in highway planning in São Paulo, Brazil. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 28, n. 7, p. 515–522.

Santana, G. R. De A.; Santos, E. B.; Justi Da Silva, M. G.; 2020. Caracterização Espaço-Temporal das Secas na Bacia do Rio Paraíba do Sul. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 43, n. 4.

Secron, M. B. *et al.*; 2017. Proposal of a hydric index to support industrial site location decision-making applying a fuzzy multi-attribute methodology. *Ecological Indicators*, v. 83, p. 427-440.

Siqueira, F. B.; Dos Santos, M. A.; 2021. Solutions proposed for socio-environmental conflicts and concerning multiple-use hydroelectric reservoirs in Brazil. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, v. 40, n. 5, p. e13645.

Tetlow, M.; Hanusch, M.; 2012. Strategic environmental assessment; the state of the art. *Impact Assessment and Project Appraisal*, v. 30, n. 1, p. 15-24.

Therivel, R.; 2004. *Strategic Environmental Assessment in Action*. London: Routledge.

Tshibangu, G. M.; Montañó, M.; 2019. Outcomes and contextual aspects of strategic environmental assessment in a non-mandatory context: the case of Brazil. *Impact Assessment and Project Appraisal*, v. 37, n. 3-4, p. 334-343.

Westin, F. F.; Dos Santos, M. A.; Martins, I. D.; 2014. Hydropower expansion and analysis of the use of strategic and integrated environmental assessment tools in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 37, p. 750-761.

Wood, C. M.; Djeddour, M.; 1992. Strategic environmental assessment: EA of policies, plans and programmes. *Impact Assessment Bulletin*, v. 10, n. 1, p. 3-22.



ANÁLISE COMPARATIVA DE COTAS SENSOR (PCD) X COTAS DISPLAY (OBSERVADOR) - ESTUDO DE CASO ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA DE JI-PARANÁ

1Fernanda Aline Petry, 2Eyck Adan de Medeiros Silva Fonseca, 3Fernando Mainardi Fan
1 Serviço Geológico do Brasil, e-mail: fernanda.petry@sgb.gov.br; 2 Serviço Geológico do Brasil, e-mail: eyck.fonseca@sgb.gov.br; 3 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: fernando.fan@ufrgs.br

Palavras-chave: Sensor de nível; observador hidrológico; estação fluviométrica

Resumo

No âmbito da hidrologia as atividades realizadas pelo observador hidrológico, que são a leitura e registro diários de dados de cota dos rios, têm sido fundamentais para a criação de séries históricas de informações hidrológicas e, conseqüentemente, para a construção de curvas de descarga confiáveis para os mais diversos usuários, como por exemplo os sistemas de alerta hidrológicos (SAHs) que são usados principalmente pela Defesa Civil para retirada de pessoas de áreas sujeitas a enchentes. Muitos observadores têm 10, 20, 30 anos de observação e desempenharam durante todo esse tempo um serviço de suma importância, porém, com a evolução de sistemas, hoje são gerados e transmitidos 96 dados de cota diariamente por meio dos sensores de nível atrelados às Plataformas de Coleta de Dados – PCD. O presente estudo realizou a comparação entre os dados de cota obtidos por meio de sensor de nível com os dados inseridos no display da PCD pelo observador hidrológico da estação fluviométrica Ji-Paraná, utilizando o Painel de Indicadores da RHN e RHNr e teve por objetivo discutir a possibilidade de extinção das atividades de leitura de réguas linimétricas para esta estação.

Introdução

O estudo da água na Terra, ocorrência, circulação, distribuição e relação com os seres vivos é o objetivo da hidrologia (Tucci, 2000). No Brasil, desde 2000, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA é a entidade responsável pelo gerenciamento dos monitoramentos hidrometeorológicos que são imprescindíveis para as tomadas de decisão relacionadas ao uso, gestão e preservação dos recursos hídricos. Este monitoramento tem por objetivo “levantar os dados básicos necessários ao conhecimento das características quantitativas e qualitativas de nossos rios, assim como os índices pluviométricos, com suas distribuições no espaço e no tempo” (ANA, 2016b).

Com a finalidade de atender à necessidade de conhecimento das características quantitativas são instaladas em todo o território nacional um conjunto de estações hidrometeorológicas, a Rede Hidrometeorológica Nacional – RHN, mantidas e operadas por entidades públicas e privadas, cujos dados gerados são disponibilizados gratuitamente ao público por meio do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos – SNIRH (ANA;SGB, 2016).

Um dos tipos de estação hidrometeorológica é a fluviométrica que é dotada de um conjunto de dispositivos utilizados para o “estabelecimento de uma relação bem definida entre a cota e a descarga líquida do rio” (Fan, 2021). A fim de obter maior acurácia nessa relação são usados dados das séries históricas dos níveis da coluna d’água (cota) associados às informações obtidas em campanhas periódicas na seção de medição relativas à determinação da vazão do rio, dos parâmetros de qualidade da água e das características sedimentométricas (ANA, 2016a).

Em relação ao termo cota sua definição consiste na “leitura feita por um observador em uma régua linimétrica instalada na margem do curso d’água” (Fan, 2021). Com o avanço da tecnologia é possível coletar informação da cota (ou nível) dos rios por meio de sensor de nível, que é um dispositivo que determina automaticamente a posição vertical da superfície d’água em relação a um plano de referência pré-estabelecido, armazenar a informação na memória interna das Plataformas de Coleta de Dados – PCDs e transmitir telemetricamente ao banco de dados corporativo da ANA (ANA, 2016a). Para as informações geradas em toda a RHN é utilizado o sistema HIDRO que permite o gerenciamento da base de dados hidrometeorológica (armazenada de forma centralizada em um banco de dados relacional) e a manipulação dos dados por meio de um aplicativo, como exemplos citamos “a entrada de dados por parte das entidades que operam uma rede hidrometeorológica, o cálculo de funções hidrometeorológicas básicas e a visualização dos dados armazenados em diversos formatos (gráficos, imagens, etc.)” (ANA, 2016b).

Na Figura 01 podemos observar um gráfico gerado por meio do sistema HIDRO-Telemetria tendo como filtro a estação Ji-Paraná e os dados registrados pelo sensor de nível e transmitidos pela PCD.

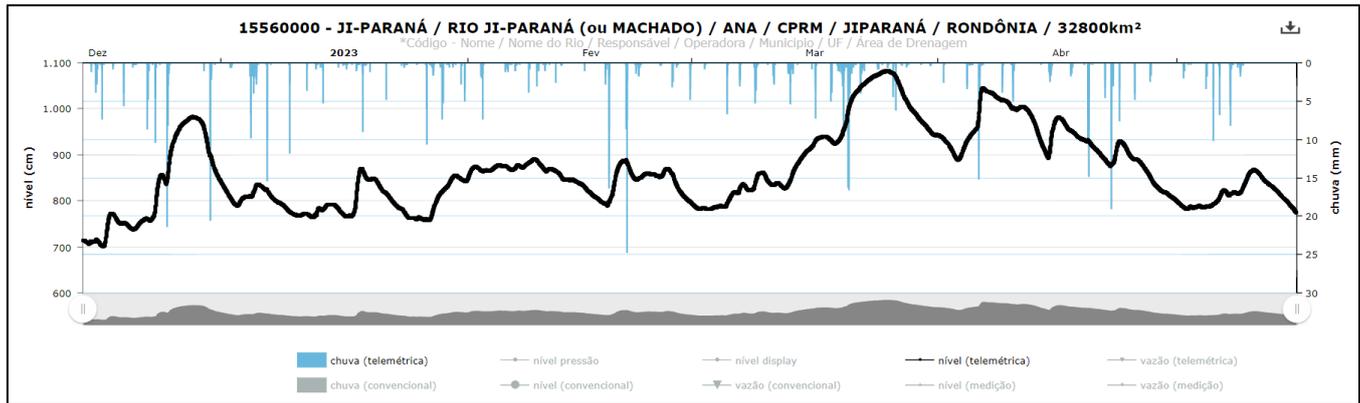


Figura 01: Dados de cota disponíveis no sistema HIDRO-Telemetria no período de 14/12/2022 a 16/05/2023 da estação Ji-Paraná.

A tecnologia vem crescendo de forma sustentável ano após ano e isso se reflete na nossa atuação como técnicos em hidrologia já que por muito tempo tínhamos apenas o registro de dois dados diários de cota obtidos pela leitura da régua linimétrica por meio do observador hidrológico, hoje, com a evolução dos sistemas e de equipamentos, recebemos 96 dados de cota por dia no sistema HIDRO-Telemetria por meio de sensores e transmissão via satélite. Dessa forma, temos em algumas estações da RHN um dispositivo chamado de display (Figura 02) que é acoplado à PCD onde o observador da referida estação insere a cota da leitura da régua linimétrica duas vezes ao dia ou até mais, caso seja um momento de cheia do curso d'água, fazendo com que essa informação chegue mais rapidamente ao banco de dados, já que as visitas regulares de inspeção são realizadas com intervalos de 2 a 3 meses.



Figura 02: Display para inserção de dados de cota obtidos por meio de leitura de réguas linimétricas.

Para a obtenção das informações deste estudo foi utilizado o Painel de Indicadores da RHN e RHNR que foi desenvolvido internamente com o uso da ferramenta Microsoft Power BI e acoplada ao Sistema HIDRO-Telemetria e tem por objetivo auxiliar os gestores locais sobre o funcionamento e desempenho da operação da rede para que os dados possam estar disponíveis pelo maior período de tempo possível.

Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo comparar o nível de confiabilidade entre a cota obtida por meio do sensor automático e a cota lida pelo observador na régua linimétrica, buscando subsidiar futuras decisões quanto à descontinuidade do uso de réguas linimétricas no monitoramento fluviométrico à exemplo do que acontece atualmente nos Estados Unidos da América por meio do Serviço Geológico (USGS), que possuem um sistema totalmente automatizado.

Material e Métodos

Para a realização deste estudo foram utilizados dados de cota registrados na PCD, tanto pelo observador (através da inserção da informação no display) quanto pelo sensor de pressão, no período de 14/12/2022 a 16/05/2023 da estação fluviométrica Ji-Paraná (código ANA 15560000) que está instalada na margem direita do rio Machado ou Ji-Paraná (coordenadas geográficas 10°52'27.1"S 61°56'08.5"W), afluente da margem direita do rio Madeira na região hidrográfica do Rio Amazonas (Figura 03) tendo uma área de drenagem de aproximadamente 32.800 Km².



Figura 03: Localização da estação fluviométrica Ji-Paraná

Conforme pode ser verificado na figura 04, a estação está instalada em um trecho retilíneo do rio e nas figuras 05 e 06 é possível observar a proximidade da PCD com a seção de réguas linimétricas e casa do observador.



Figura 04: Trecho retilíneo da seção transversal da estação fluviométrica Ji-Paraná.



Figura 05: Seção de réguas linimétricas da estação Ji-Paraná.



Figura 06: Localização da PCD, casa do observador e seção de réguas linimétricas da estação fluviométrica Ji-Paraná.

As cotas registradas e transmitidas pela PCD foram obtidas por meio do indicador “Diferença de nível entre sensor e display” do painel interno de indicadores da RHN e RHNR (Figuras 07 e 08).



INDICADORES DA RHN E RHNR

Este painel tem por objetivo apresentar indicadores de desempenho das PCD's da Rede Hidrológica Nacional - RHN e Rede Hidrológica Nacional de Referência - RHNR, visando auxiliar os gestores na tarefa de acompanhamento da operação da rede.

MAPA - LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES RHNR

ESTAÇÕES COM TENSÃO DE BATERIA <= 12 VOLTS (ÚLTIMAS 24 HORAS)

PCD SEM TRANSMISSÃO A MAIS DE 24 HORAS

ESTAÇÕES COM POTÊNCIA DE TRANSMISSÃO <= 36 dB (ÚLTIMAS 24 HORAS)

SENSORES DE NÍVEL AUTOMÁTICOS PARALISADOS A MAIS DE 24 HORAS

DISPONIBILIDADE DE DADOS DE VAZÕES ANUAIS DE CADA SUREG OU REGIONAL

PERCENTUAL DE TRANSMISSÃO DE DISPLAY NOS ÚLTIMOS 30 DIAS

DISPONIBILIDADE DE DADOS DE COTAS ANUAIS

DIFERENÇA DE NÍVEL ENTRE SENSOR E DISPLAY

DISPONIBILIDADE DE DADOS DE CHUVAS ANUAIS

TEMPO DE REPARO DAS PCD'S ÚLTIMOS 90 DIAS

ACOMPANHAMENTO DAS ESTAÇÕES DA RHNR

Data da Última Atualização:
03-04-2023 21:01

(Clique nos links para visualizar os indicadores)

Versão 2.3.7
de 09/02/2023

Figura 07: Painel de indicadores da RHN e RHNR.

Diferença de Nível entre Sensor e Display

Estatística para o Período Selecionado

Regional	Estação	Nome	Média da Diferença (cm)	Desv. Pad. da Diferença (cm)
REPO	15560000	JI-PARANÁ	1,43	1,4

LEGENDA:

- NORMAL
- SUSPEITO
- IRREGULAR
- SEM DADOS

Tabela de Dados não Resumidos

Regional	Estação	Nome	Data e Hora	Diferença (cm)	Sensor (cm)	Display (cm)
REPO	15560000	JI-PARANÁ	02-04-23 09:00	5	921	916
REPO	15560000	JI-PARANÁ	01-04-23 08:00	5	939	934
REPO	15560000	JI-PARANÁ	31-03-23 08:00	5	945	940
REPO	15560000	JI-PARANÁ	12-04-23 08:00	5	995	990
REPO	15560000	JI-PARANÁ	19-08-23 20:00	4	660	664
REPO	15560000	JI-PARANÁ	01-07-23 09:00	4	686	682
REPO	15560000	JI-PARANÁ	26-02-23 18:00	4	856	860
REPO	15560000	JI-PARANÁ	14-04-23 18:00	4	896	892
REPO	15560000	JI-PARANÁ	18-03-23 09:00	4	934	930
REPO	15560000	JI-PARANÁ	30-03-23 19:00	4	956	952
REPO	15560000	JI-PARANÁ	30-03-23 09:00	4	964	960
REPO	15560000	JI-PARANÁ	11-04-23 19:00	4	1002	998
REPO	15560000	JI-PARANÁ	03-08-23 08:00	3	657	654
REPO	15560000	JI-PARANÁ	27-01-23 18:00	3	783	780

Ir para Tabela Ampliada

Ir para Gráfico

Filtros

Código

Procurar

 15560000

Regional

Procurar

- (Vazio)
- REFO
- REPO
- RETE
- SUREG/BE
- SUREG/BH
- SUREG/GO

Nome

Procurar

- ABUNÁ
- CABIXI
- FAZENDA FLOR DO CAMPO
- GUAJARÁ-MIRIM
- JI-PARANÁ
- PEDRAS NEGRAS

Hora e Data

Último 1 Anos

25-08-2022 - 24-08-2023

Rede

RHNR

1

Quantidade

Figura 08: Indicador “Diferença de nível entre sensor e display” na estação fluviométrica Ji-Paraná.

A partir da tabela de dados do indicador apresentado anteriormente os dados de cota foram compilados na tabela do apêndice 01 e foram avaliados quantitativamente quanto à diferença registrada entre ambas as formas de coleta do dado de cota da mesma estação fluviométrica: leitura da cota na régua linimétrica e inserção da informação pelo observador no display e sensor de pressão.

Outro item avaliado foi o percentual de transmissão de display da estação que indica a frequência com que o observador insere os dados de cota no display (Figura 09).

É importante destacar que o sistema compara os dados de cota inseridos pelo observador com a cota registrada pelo sensor e os classifica em normal (Figura 10), suspeito e irregular (Figura 11) e, para efeito do cálculo do percentual de transmissão do display só considera as cotas normais no sistema. Então, mesmo que o observador tenha digitado 100% do esperado, pode ocorrer redução do percentual caso uma cota seja classificada como suspeita, quando a diferença entre as cotas estiver entre 5 e 10 cm, ou irregular, quando a variação da diferença entre sensor e display estiver acima de 10 cm.

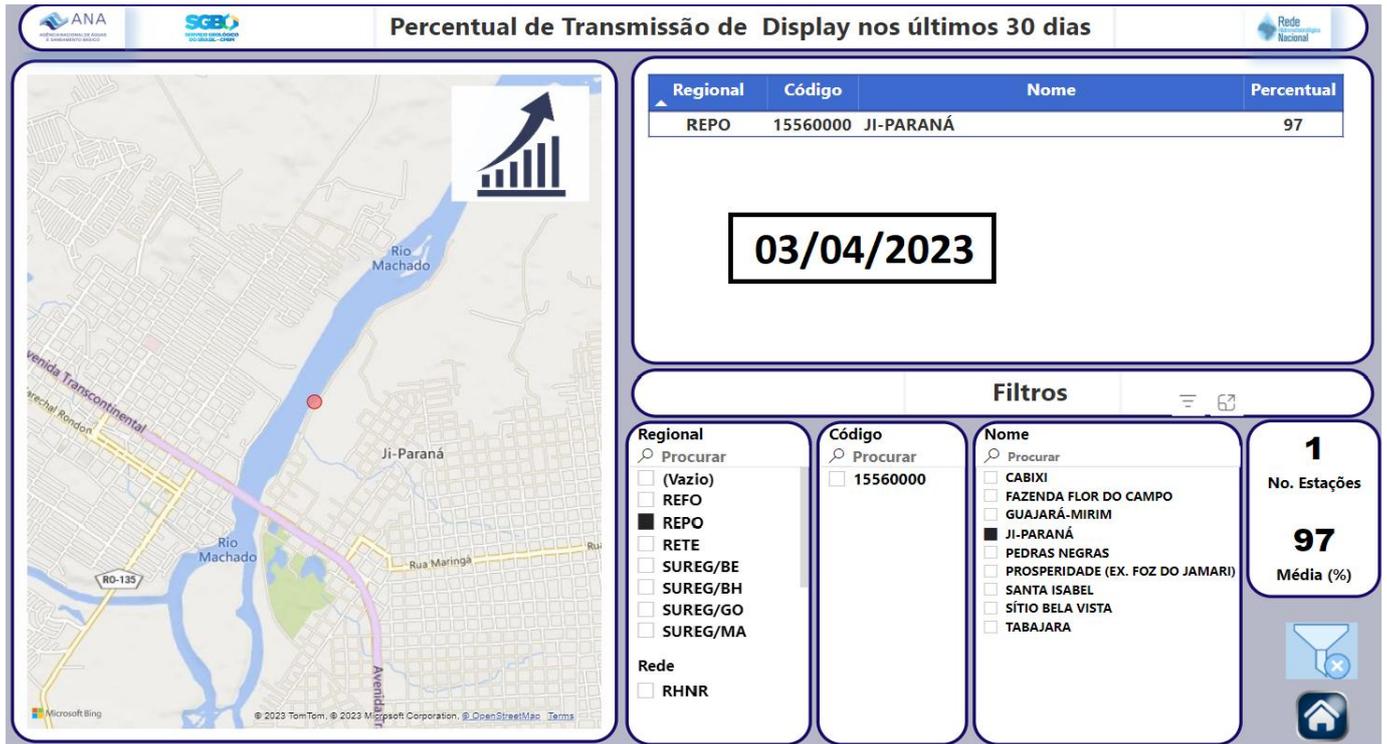


Figura 09: Exemplo do indicador “Percentual de transmissão do display nos últimos 30 dias” para a estação fluviométrica Ji-Paraná.

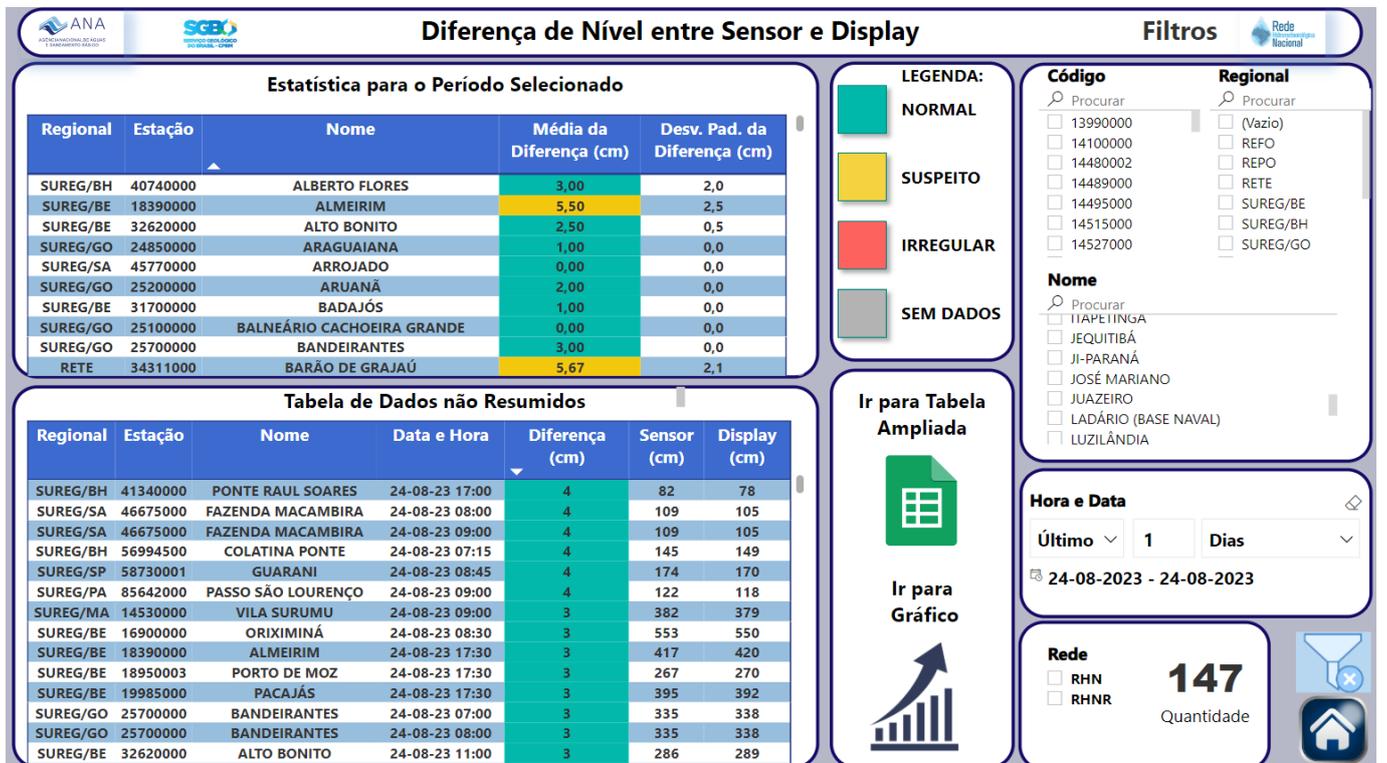


Figura 10: Exemplo de classificação das cotas como normal no indicador “Diferença de nível entre sensor e display”.

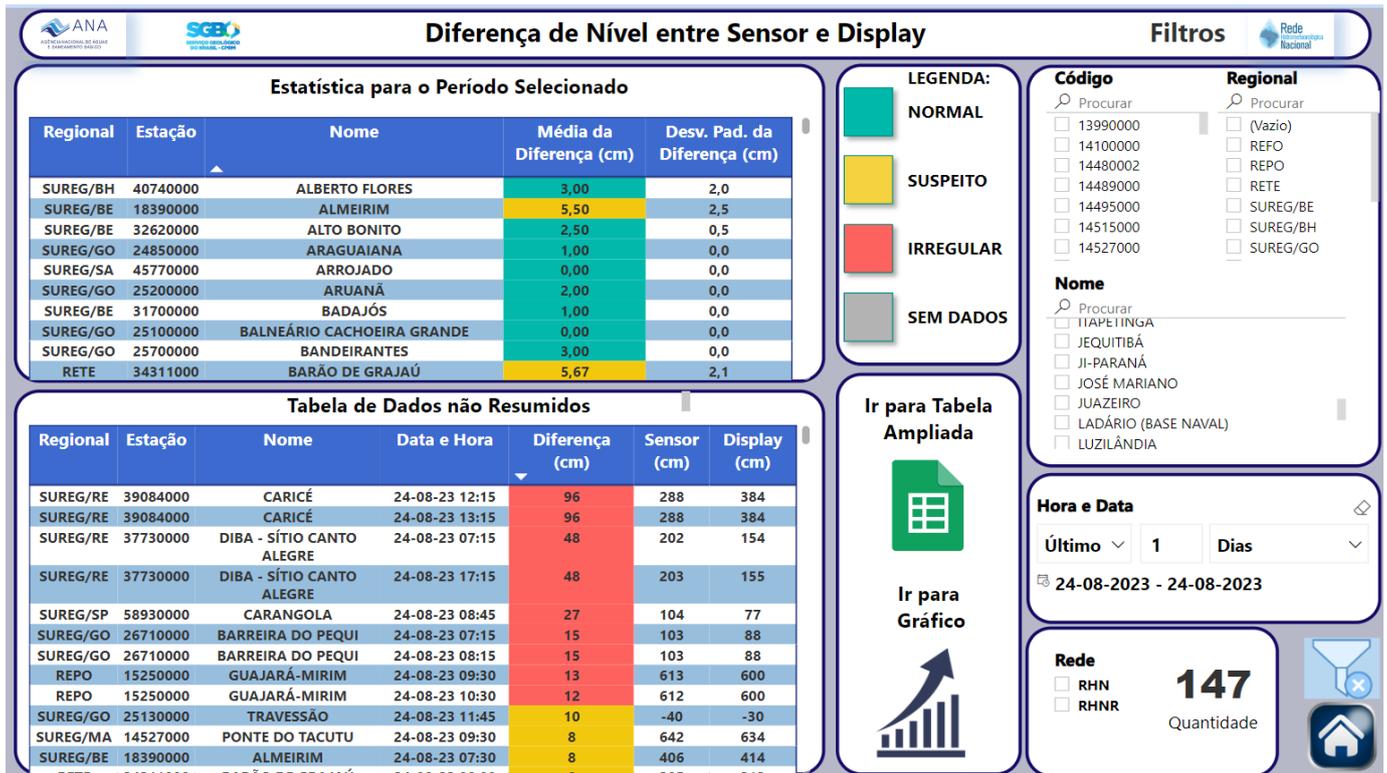


Figura 11: Exemplo de classificação das cotas como suspeito e irregular no indicador “Diferença de nível entre sensor e display”.

Por fim, tendo por base os resultados comparativos e das análises quantitativas dos dados, procedeu-se à avaliação qualitativa e busca de hipóteses para os pontos de discrepância de valores de cota.

Resultados e Discussão

A estação fluviométrica Ji-Paraná apresenta diversas condições que possibilitam a comparação de dados de cota obtidos a partir de um sensor de pressão com dados de cota obtidos pela leitura das régua linimétrica e posterior inserção dos dados no display conectado à PCD.

Como registrado na Figura 06 pode-se observar a proximidade entre a PCD e seu sensor de pressão e a seção de régua linimétrica o que permite inferir que a cota do rio é a mesma tanto para o sensor de pressão quanto para a leitura das régua linimétrica, estando estas corretamente niveladas. O fato de que a seção está instalada em um trecho retilíneo do rio (Figura 04), onde ocorre com menor intensidade processos de erosão e sedimentação, favorece a estabilidade das régua linimétrica reduzindo consideravelmente a necessidade de correções do nivelamento.

O comprometimento do observador com suas atividades é um fator primordial para a contínua inserção dos dados de cota no display da PCD e a instalação da estação próxima à sua residência facilita esta atividade sendo que no presente estudo o percentual de digitação da cota no display chegou a 97% do esperado.

Utilizando-se a ferramenta interna painel de indicadores da RHN e RHNR efetuou-se a comparação de cotas entre sensor de pressão e display, e os dados coletados estão tabelados e disponíveis no Apêndice 01, sendo que nas Tabelas 01 e 02 e Gráficos 01 e 02 são apresentados os principais resultados obtidos.

Na Tabela 01 e Gráficos 01 e 02 observamos que para o período analisado a maior variação de cota observada entre o sensor de pressão e o valor inserido pelo observador no display foi de 9 centímetros representando uma variação percentual de 0,96 % e para obter esta análise utilizou-se a equação (1) a seguir:

$$\text{Variação Percentual} = \left(\frac{\text{nível pressão} - \text{nível display}}{\text{nível display}} \right), \quad (1)$$

As variações ocorridas no período de estudo são classificadas como normais para 91,25% dos dados, apenas 8,75% dos dados foram classificados como suspeitos e nenhum dado foi classificado como irregular.

Observou-se que essas variações ocorreram de forma mais intensa quando ocorreu mudança brusca da cota e podem ocorrer pela eventual movimentação do sensor de pressão que está próximo ao leito do corpo hídrico sendo que quando a equipe realiza o nivelamento da seção de régua e manutenção da PCD essa diferença é corrigida.



Tabela 01: Resumo dos dados coletados da estação Ji-Paraná

Data inicial	14/12/2022
Data final	16/05/2023
Total de dias	153
Total de dados esperados (display)	306
Total de dados inseridos (display)	263
Percentual de inserção dos dados	86%
Maior cota sensor	1081 cm
Maior cota display	1080 cm
Menor cota sensor	707 cm
Menor cota display	707 cm
Maior diferença no período	9 cm
Menor diferença no período	0 cm
Classificação normal (entre 0 e 4 cm)	91,25 %
Classificação suspeito (entre 5 e 10 cm)	8,75 %
Classificação irregular (acima de 10 cm)	0 %

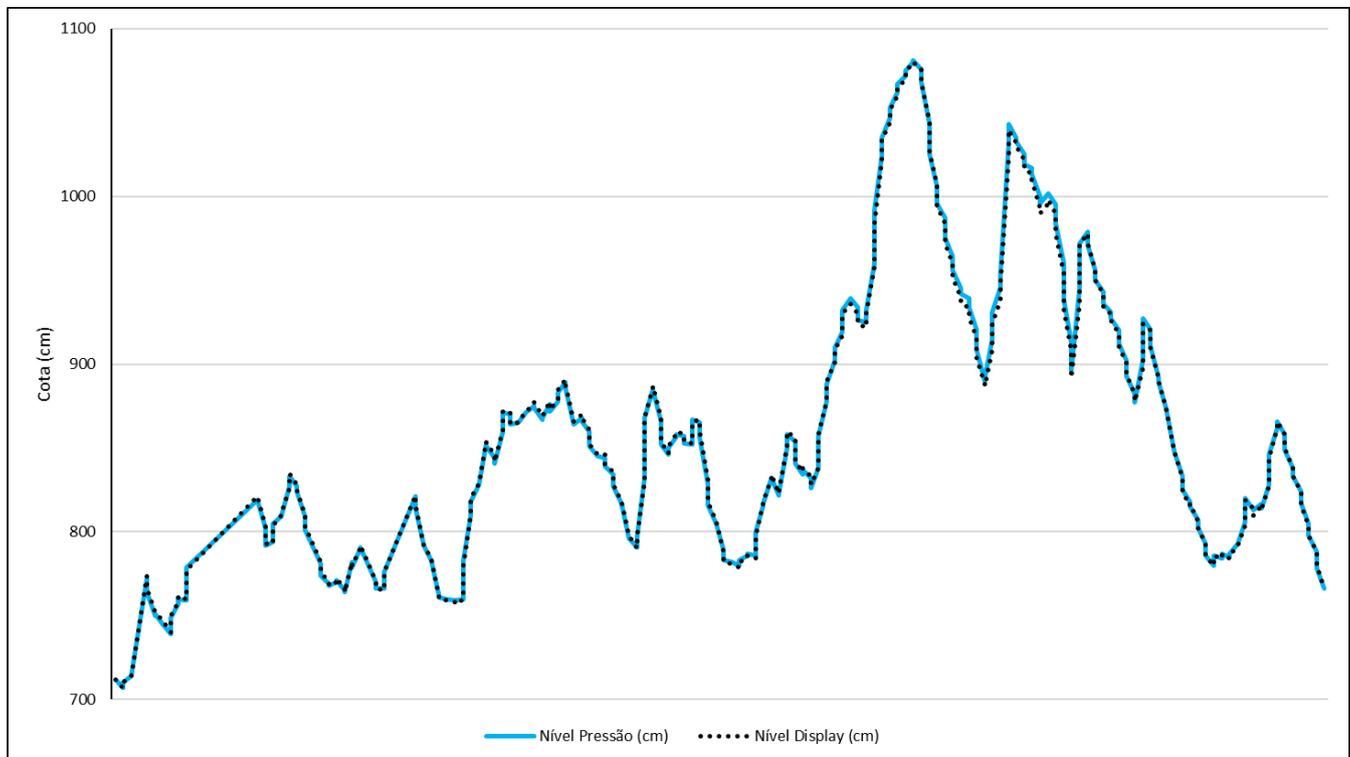


Gráfico 01: Comparação entre a cota do sensor e a cota do display no período de 14/12/2022 a 16/05/2023 da estação Ji-Paraná, com destaque para a maior variação encontrada (9 cm).

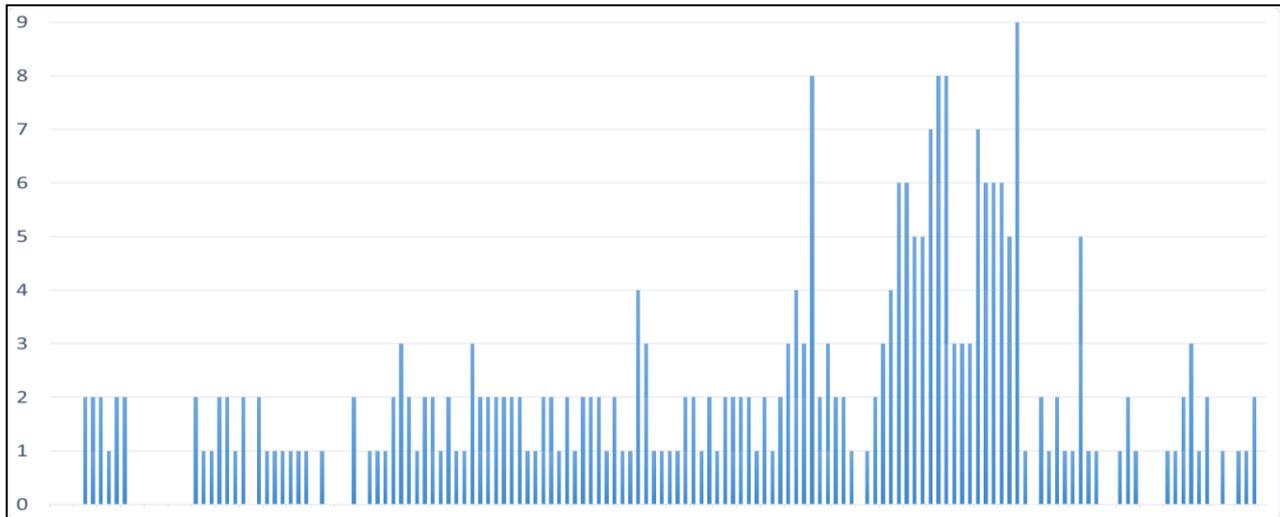


Gráfico 02: Distribuição das diferenças de cota encontradas no período de 14/12/2022 a 16/05/2023 na estação Ji-Paraná.

Na Tabela 02 estão inseridas informações sobre a variação média estimada da vazão e variação total da vazão em função das diferenças de cota encontradas entre o sensor de pressão e o dado inserido no display.

Tabela 02: Resumo das análises realizadas sobre os dados coletados da estação Ji-Paraná

Diferenças encontradas (cm)	Recorrência	Recorrência (%)	Variação média estimada da vazão (m ³ /s)	Variação total da vazão (m ³ /s)
9	1	0,38%	55,906	55,906
8	3	1,14%	52,030	156,091
7	3	1,14%	43,659	130,978
6	8	3,04%	38,060	304,484
5	8	3,04%	31,351	250,811
4	6	2,28%	25,734	103,408
3	17	6,46%	19,267	251,927
2	64	24,33%	12,159	-215,840
1	103	39,16%	5,930	-157,731
0	50	19,01%	0	0
TOTAL				880,034

Para o cálculo da vazão utilizou-se os parâmetros da curva de descarga apresentados na Tabela 03.

Validade início	Validade fim	Cota mínima (cm)	Cota máxima (cm)	Tipo de equação	a	h0 (m)	n
18/01/2005	31/12/2023	600	901	Potência	193,9518	5,45	1,62
18/01/2005	31/12/2023	901	1121	Potência	232	5,33	1,441
18/01/2005	31/12/2023	1121	1200	Potência	118,11	5,2	1,8

Tabela 03: Parâmetros da curva de descarga da estação Ji-Paraná.

Merecem destaque as variações de 9 e 6 cm. Para a primeira situação observou-se que a variação de 9 cm nesta cota (945 cm, conforme Apêndice 01) representa uma alteração de 55,906 m³/s na vazão e para a variação de 6 cm a alteração média de vazão é 38,060 m³/s porém, por ter ocorrido 8 vezes durante o período de estudo, a variação total da vazão em função da alteração de 6 cm da cota foi de 304,484 m³/s e a variação total da vazão durante o período de estudo foi de 880,034 m³/s.

Comentários finais

O presente estudo foi importante para efetuar a comparação de cotas obtidas por meio do sensor automático de nível com as cotas lidas pelo observador nas régua linimétricas, visto que temos atualmente muitos problemas na comparação com esses



dados. Muitas vezes as diferenças são relevantes e é necessário investigar qual dado é mais confiável, se do observador ou do sensor.

É realmente um desafio comparar 96 dados obtidos pelo sensor automático com 2 dados informados pelo observador, pois por ter poucos dados diários, o dado do observador por vezes não acompanha a naturalidade da curva do sensor. Portanto, nesse caso, conclui-se que não dá para condenar o sensor, tampouco condenar o observador por uma diferença alta que apareça ocasionalmente, pois como mostrado no estudo, a leitura do sensor e a leitura do observador estão coerentes, se tratando apenas de uma imprecisão no momento em que o dado é comparado. Também ficou evidente que quanto mais próximo o sensor estiver da régua fluviométrica, melhores serão os resultados obtidos.

Concluiu-se com este estudo que a estação Ji-Paraná, que possui uma estação fluviométrica instalada em condições hidráulicas muito favoráveis ao bom funcionamento do sensor de nível, margens estáveis e boa acessibilidade, poderia funcionar de forma totalmente automatizada, sem a existência de réguas fluviométricas e necessidade de observador desde o reparo do equipamento seja realizado em um curto espaço de tempo quando necessário.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Serviço Geológico do Brasil – CPRM/SGB e ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS pela oportunidade de aprendizado e apoio recebidos.

Referências Bibliográficas

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. 2016a. Manual de procedimentos para instalação, operação e manutenção de estações fluviométricas. Brasília: ANA.

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. 2016b. Metodologias para análise de dados fluviométricos de estações telemétricas. Brasília: ANA.

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico; Serviço Geológico do Brasil. 2016. Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência: objetivos e critérios da RHNR. Brasília: ANA.

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Sistema HIDRO-Telemetria. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidrotelemetria/Mapa.aspx>>. Acesso em: ago. 2023.

Fan, F. M.. 2021. Fluviometria: apostila. Porto Alegre: UFRGS.

Serviço Geológico do Brasil. Banco de Dados. Acesso interno em: ago. 2023a.

Serviço Geológico do Brasil. Painel de Indicadores da RHN e RHNR. Acesso interno em: ago. 2023b.

Tucci, C.. (org.). 2000. Hidrologia – ciência e aplicação. Porto Alegre: Editora da Universidade, ABRH.



ESTAÇÃO HIDROMETEOROLÓGICA E SISTEMA AQUISIÇÃO DE DADOS PARA MONITORAMENTO E ALERTA EM REGIÃO MONTANHOSA

1Jim Lau, 2Cláudia Weber Corseuil, 3Edson Ney Martins Júnior, 4Marcos Ricardo Giehl, 5Eduardo Chedid Padilha Ribeiro

1Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e-mail: jim.lau@ufsc.br; 2Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e-mail: claudia.weber@ufsc.br; 3Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e-mail: edsonneyjr@gmail.com; 4Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e-mail: mrgiehl@gmail.com; 5Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e-mail: duducpribeiro@gmail.com

Palavras-chave: chuva; nível dos rios; internet das coisas.

Resumo

No mundo inteiro pessoas têm sido afetadas por eventos naturais extremos como, tempestades severas, temperaturas extremas, secas, furacões, ciclones, inundações repentinas, deslizamentos de terra, entre outros. Esses fenômenos são naturais, porém quando ocorrem em áreas ocupadas pelo homem, podem causar danos materiais, prejuízos econômicos e perdas de vidas humanas. De acordo com Emergency Disaster Data Base (EM-DAT), do Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) as inundações e os movimentos de massa úmida (fluxo de detritos, deslizamentos de terra, etc.) são categorizados como desastres naturais hidrológicos. Esse tipo de desastre é causado por chuvas intensas e/ou por acúmulos elevados de chuvas. No Brasil, assim como o extremo sul de Santa Catarina, os desastres hidrológicos são em maior número. Nesse aspecto, estudos relacionados ao monitoramento hidrometeorológico e à sistemas de alerta são fundamentais para a gestão dos desastres hidrológicos. Assim, o objetivo do presente trabalho foi desenvolver um sistema de monitoramento e de alerta (SMA) hidrometeorológico, levando em consideração as características das bacias hidrográficas de ambiente montanhoso, onde a resposta hidrológica é rápida, o acesso é difícil e há escassez de estações hidrometeorológicas. O SMA foi desenvolvido, visando abranger desde as cabeceiras dos rios até a planície de inundação adjacente e, assim, permitir analisar os eventos de chuva e vazão e, conseqüentemente, a ocorrência das inundações nessas regiões. Para a implementação do sistema de monitoramento foram utilizados como base: o microcontrolador ESP32 LoRa e a plataforma de nuvem IoT (Internet of Things). O microcontrolador ESP32 LoRa atua como meio de comunicação para aquisição e transmissão de dados de longa distância para os sensores meteorológicos, e permite configurar a taxa de envio de dados para a nuvem. Foi implementado uma comunicação multi-hop, a qual possibilita o envio dos dados por meio de dispositivos intermediários até uma estação com acesso à internet, via protocolos Mesh e MQTT. O protocolo MQTT é utilizado para comunicação entre dispositivos em redes IoT, facilitando a troca de mensagens entre dispositivos conectados, de forma eficiente e confiável, mesmo em ambientes com largura de banda limitada ou conexões instáveis. Para o armazenamento dos dados foi selecionado o sistema de gerenciamento de banco de dados MongoDB, devido à sua flexibilidade e escalabilidade (registro de grande número de dados), além de oferecer suporte a consultas complexas, tornando-o adequado para uma variedade de aplicativos, desde pequenos projetos até sistemas de grande escala (registro de dados de vários sensores ao mesmo tempo). Foram desenvolvidas duas interfaces de acesso ao sistema (mobile e web) utilizando os frameworks Django e Flutter, que proporcionam uma visualização intuitiva dos dados, facilitando a interpretação das informações obtidas. Como resultados obteve-se um sistema de monitoramento e alerta que têm como principais requisitos: 1) a coleta e o processamento dados hidrometeorológicos de forma contínua e com precisão; 2) emissão de alertas de eventos extremos, como inundações (com base no aumento do nível dos rios); 3) disposição de um sistema de armazenamento e processamento dos dados em nuvem; 4) possibilidade de realizar atualizações e integrações a aplicativos móveis; e 5) uma interface para visualização de dados através de dashboards intuitivos (dados gráficos), facilitando a análise das medições hidrometeorológicas para diversos fins. Esses resultados mostraram que, o SMA é viável, uma vez que, atendeu satisfatoriamente aos requisitos estabelecidos para o seu funcionamento. Com o sistema proposto foi possível efetuar a coleta de dados através de diversos sensores (por exemplo, de temperatura, vento, umidade, precipitação e de nível de água). Adicionalmente, o SMA pode ser instado em locais de difícil acesso, devido a utilização de microcontrolador ESP32 LoRa, que garante comunicação em longas distâncias. Com relação ao armazenamento e à visualização de dados, o uso de uma ferramenta de código aberto, permite flexibilidade e escalabilidade na manipulação das informações coletadas, facilitando o processo de análise e interpretação dos dados pelos usuários.

Introdução

No mundo inteiro pessoas têm sido afetadas por eventos naturais extremos como, tempestades severas, temperaturas extremas, secas, furacões, ciclones, inundações repentinas, deslizamentos de terra, entre outros. Ao longo do tempo, os fenômenos têm causado perdas de vidas humanas e prejuízos econômicos significativos em diversos países (CRED, 2022). Esses fenômenos ocorrem no mundo todo e com certa frequência, representando um risco para sociedade, aos sistemas naturais e às principais infraestruturas, afetando o desenvolvimento social e econômico dos países (Peng et al., 2021). No entanto, quando acontecem em áreas habitadas pelo homem passam a ser considerados como desastres naturais (Kobiyama et al., 2019; CRED, 2020).



Ao longo dos anos, a frequência de desastres naturais tem aumentado, apesar dos avanços tecnológicos e científicos do século XXI (Kobiyama e Zanandrea, 2023). De acordo CRED (2023) a Emergency Disaster Data Base (EM-DAT) registrou, em 2022, uma média de 387 desastres naturais, ficando um pouco acima da média registada entre o período de 2002 e 2021 (370 eventos). Dos 387 eventos registrados, 120 foram meteorológicos (tempestades), 193 hidrológicos (inundações e movimentos de massa úmida) e 49 climatológicos (temperaturas extremas, secas e incêndios florestais). Esses dados mostram que, em 2022, os desastres hidrológicos predominaram no mundo. Esses desastres de acordo com Kobiyama et al. (2019) são causados por chuvas intensas e/ou acúmulos elevados de chuvas.

No Brasil, assim como no mundo, os desastres hidrológicos são em maior número. Estudos como os realizados pelo Banco Mundial (2012) e de Marques e Baesso (2021) mostraram que, entre 2000 e 2018, as inundações representaram 71% dos desastres naturais ocorridos no país. Nesse período, um dos eventos mais marcantes, ocorreu em janeiro de 2011 na região serrana do Rio de Janeiro. Nesse episódio, o acumulado de 166 mm de chuva em dois dias, causaram inundações nas áreas urbanas e deslizamentos de terra nas encostas dos morros, afetando 7 municípios dessa região, impactando mais de 300 mil pessoas e causando 900 mortes (Marques e Baesso, 2021).

Mais recentemente, entre 2020 e 2023, uma série de eventos extremos de chuva causaram desastres em várias regiões do Brasil. Dentre as quais, o presente trabalho destaca os ocorridos nas regiões sudeste e sul devido à magnitude dos eventos. No Rio de Janeiro, em 15 de fevereiro de 2022, chuvas intensas e concentradas, causaram inundações e vários deslizamentos de terra na cidade de Petrópolis (região serrana), resultando em prejuízos econômicos, danos materiais e, o mais grave, 233 mortes. Em fevereiro de 2023 no município de São Sebastião, litoral norte do Estado de São Paulo, o acumulado de 700 mm de chuva registrado em 72 horas, provocou deslizamentos de terra e fluxo de detritos, causando mais de 50 mortes e uma grande destruição nessa região (Moraes et al., 2023). Também, no Rio Grande do Sul, destacam-se as inundações ocorridas em julho de 2020 e setembro de 2023 na bacia do rio Taquari. De acordo com Moraes et al. (2023), o evento de inundação de 09 julho de 2020 no rio Taquari foi considerado como de magnitude extrema e a maior inundação registrada até o primeiro semestre de 2023, atingindo cinco municípios nessa região. A inundação registrada em 05 de setembro de 2023 nessa região, também causou uma destruição de grandes proporções em vários municípios da região, causando 50 mortes. Na região do Alto Vale do Itajaí em Santa Catarina, segundo Schwarz et al. (2023), em dezembro de 2020 um evento de chuva intensa e concentrada, que durou cerca de 5 dias, desencadeou vários escorregamentos de terra, resultando em inundações bruscas (enxurradas) nas calhas dos rios a jusante, atingindo três municípios nessa região, provocando 21 mortes, deixando 100 pessoas desalojadas e 172 desabrigados, além de danos em infraestruturas públicas e afetando toda a bacia à jusante.

A gravidade dos desastres naturais tem aumentado ao longo dos anos e, pode estar relacionada às mudanças climáticas, que têm causado eventos hidrológicos e climáticos extremos mais frequentes (Hettiarachchi et al., 2018). A intensificação dos extremos de chuva (Lenderink e Van Meijgaard, 2008; Wasko e Sharma, 2015; Wasko et al., 2016) e do aumento do volume (Mishra et al., 2012; Trenberth, 2011) têm sido associados ao aumento da temperatura, que é um fenômeno esperado devido às mudanças climáticas (IPCC, 2023).

Para a região sul do Brasil as projeções climáticas mostram um aumento de chuvas e aumento de frequência de eventos extremos. Esse aumento na magnitude e na frequência das chuvas pode aumentar as áreas de risco de deslizamentos em encostas (Sant Ana et al., 2019; Penereiro e Meschiatti, 2018).

Em ambiente montanhoso, segundo Williamson et al. (2020) e Schneiderbauer et al. (2021), os efeitos das mudanças climáticas são muito preocupantes, não somente para as partes mais altas, mas também para as planícies de inundação, uma vez que estas, dependem dos processos que ocorrem a montante. Estudos têm mostrado que a taxa de aquecimento global aumenta com a altitude, causando mudanças aceleradas nos ecossistemas de montanha e no seu regime hidrológico (Wang et al., 2016; Williamson et al., 2020). Nesses ambientes, como destacam Kobiyama et al. (2020), os eventos de chuvas orográficas são comuns e, com as mudanças climáticas, a concentração espacial e temporal dessas chuvas, pode aumentar a sua intensidade, resultando eventos hidrológicos de média ou alta magnitude.

O extremo sul de Santa Catarina, região em que o sistema de monitoramento hidrológico e de alerta desenvolvido no presente trabalho se baseou, tem parte do seu território em ambiente montanhoso. De acordo com Strieder et al. (2008), essa é uma região propensa à ocorrência de deslizamentos de terra, fluxos de detritos e inundações bruscas. Segundo relatos de Ronsani (1999), nos anos de 1903, 1911, 1974, 1995 e 2007 ocorreram eventos de inundações bruscas de grande magnitude em vários rios da região, causando danos materiais à população do município, inclusive com perda de vida humana.

Em regiões montanhosas, Kobiyama et al. (2018) destacam que, o monitoramento automático de chuva e vazão é uma das ações necessárias para a prevenção de desastres associados as inundações bruscas e fluxo de detritos. Adicionalmente, devido à alta velocidade com que os processos hidrológicos ocorrem o ideal é que os intervalos de medição de chuva e vazão sejam realizados no máximo de 10 em 10 minutos, a fim de obter o registro dos eventos extremos.

Szymanski et al. (2022), realizaram o mapeamento de perigo de inundação nas bacias hidrográficas dos rios Molha Coco e Malacara, localizadas no extremo sul de Santa Catarina, utilizando os modelos HEC-HMS e HEC-RAS e dados de chuva e vazão, medidos de 10 em 10 minutos em estações hidrológicas instaladas na região dessas bacias. Esses autores demonstraram a importância do monitoramento hidrológico detalhado para conhecer e compreender melhor os fenômenos naturais causadores de desastres hidrológicos nas bacias montanhosas dessa região. Para estudos futuros nas bacias dos rios Molha Coco e Malacara, Szymanski et al. (2022) recomendaram aumentar o número das estações de monitoramento de chuva e vazão, de modo a abranger as cabeceiras das bacias e assim, compreender melhor os eventos extremos de chuva e vazão, bem como para calibrar e validar os modelos hidrológicos e hidrodinâmicos, a fim de aumentar a precisão do mapa de perigo de inundação.



Segundo ANA (2024), para o poder público (local e regional), infraestrutura e defesa civil, os dados hidrológicos são necessários não apenas para o mapeamento de áreas de risco de inundação, mas também para a definição e operação de sistemas de alerta e resposta, uma vez que estes, podem orientar as ações de proteção da população e de infraestrutura.

No Brasil, o monitoramento hidrometeorológico é realizado por várias instituições ligadas à defesa civil, geração de energia hidrelétrica, saneamento, meteorologia, entre outras. Essas instituições são responsáveis pela instalação, manutenção e operação de estações (automáticas e convencionais) distribuídas em todo território brasileiro (Araújo et al., 2024; ANA, 2024). Entre os principais órgãos de domínio público que realizam o monitoramento e disponibilizam os dados gratuitamente no país destacam-se: o Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN), a Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA) e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Apesar da rede de estações hidrometeorológica abranger todo território brasileiro, ainda há locais com escassez de monitoramento, como é o caso de pequenas bacias hidrográficas de região montanhosa.

De acordo com Pereira et al. (2022), o monitoramento em campo representa uma atividade desafiadora e onerosa, devido à necessidade de aquisição e instalação dos equipamentos de medição, bem como de treinamento para capacitar as equipes para realizar as operações hidrométricas. Para Stähli et al. (2011), apesar das dificuldades das atividades de monitoramento hidrológico em campo é fundamental obter uma longa série histórica de dados de precipitação e vazão para determinar com precisão o comportamento da água e suas tendências na bacia hidrográfica, uma vez que, podem sofrer alterações em função das mudanças climáticas e do uso do solo. Isso mostra a importância de um monitoramento contínuo, utilizando equipamentos capazes de registrar dados regularmente, em intervalos de tempo adequados para uma análise precisa dos fenômenos hidrometeorológicos em questão.

Na literatura existem diversos trabalhos que tratam de sistemas de monitoramento hidrometeorológicos, como por exemplo, o de Araújo et al. (2024), que desenvolveram uma estação meteorológica automática embarcada, versátil, de baixo custo, baixo consumo de energia e de fácil manutenção, baseada no microcontrolador ESP8266 e na plataforma IoT ThingSpeak. Esses autores tiveram bons resultados, quando comparados com dados obtidos de uma estação do INMET, localizada a 5,2 km de distância. Já Bernardes et al. (2024) desenvolveram um sistema meteorológico automático de baixo custo, a partir de tecnologias comerciais prontas para uso e de plataforma IoT (código aberto), com objetivo de monitorar dados em tempo real, e que podem ser utilizados em modelos hidrológicos aplicados pelo CEMADEN, para prevenção de desastres naturais. De oliveira et al. (2019), visando soluções acessíveis e de baixo custo, para aumentar o monitoramento hidrometeorológico em municípios de pequeno porte, com risco de desastres naturais hidrológicos no Brasil, desenvolveram uma estação pluviométrica composta por sensores de temperatura, umidade e chuva, utilizando uma plataforma ESP8266, com conexão através de uma plataforma IoT e com protocolo MQTT, para a transmissão de dados em tempo real. Por sua vez, Ioannou et al. (2021) apresentam uma revisão detalhada sobre diversas tecnologias utilizadas para o monitoramento hidrometeorológico, onde destacaram a diferença dos métodos de coleta, armazenamento e transmissão de dados, bem como as limitações e as vantagens de cada uma.

Entretanto, os trabalhos citados apresentam restrições quanto à distância das estações meteorológicas em relação ao local monitorado, que deve ser limitada entre 100 a 200 metros. Ainda, mesmo que permitam uma distância maior para as estações, restringem-se a um conjunto básico de sensores, como pluviômetros, anemômetros, sensores de temperatura e umidade.

Neste aspecto, reforça-se a importância de estudos relacionados ao monitoramento hidrometeorológico e à sistemas de alerta, com ênfase em bacias hidrográficas montanhosas para a gestão dos desastres naturais hidrológicos, uma vez que, permitem conhecer a magnitude e a frequência dos eventos extremos de chuva e vazão e, assim, prevenir e mitigar os danos materiais e possíveis perdas de vida humana, em decorrência desses fenômenos. Assim, o presente trabalho teve por objetivo desenvolver um sistema de monitoramento e alerta (SMA) hidrometeorológico, levando em consideração as características das bacias hidrográficas de ambiente montanhoso, localizadas no extremo sul de Santa Catarina, Brasil, onde a resposta hidrológica é rápida, o acesso é difícil e há escassez de estações. O SMA utiliza uma plataforma de nuvem IoT para armazenar, processar e visualizar os dados. Esse sistema foi baseado no microcontrolador ESP32 LoRa, de custo acessível e permite uma comunicação de longo alcance e integração com a plataforma de nuvem IoT. As principais contribuições do sistema proposto incluem a facilidade de implementação, uso de código aberto, componentes acessíveis e eficiência energética. Essas características resultam em uma solução de monitoramento, que permite a adição de novos dispositivos sensores ao longo do tempo, com baixo custo. Além disso, o SMA possibilita atualizações e integração com aplicativos móveis, juntamente com a visualização de dados por meio de dashboards intuitivos (gráficos), simplificando sua utilização e proporcionando uma análise clara e acessível dos dados hidrometeorológicos para diversos fins. Além disso, a plataforma de nuvem tem como objetivo principal viabilizar a coleta de dados de forma dinâmica. Essa função é realizada por meio do cadastro de modelos de dispositivos e dos tipos de dados que serão coletados pelos mesmos em um painel interativo. Dessa forma, sem qualquer alteração de software na plataforma, pesquisadores e outros usuários, podem cadastrar, coletar, visualizar e exportar dados facilmente e com rapidez.

Material e Métodos

Características da área para aplicação do sistema de monitoramento hidrometeorológico e de alerta

O sistema de monitoramento hidrometeorológico e de alerta (SMA) foi desenvolvido com base nas características de ambientes montanhosos e de difícil acesso, como é o caso da sub-bacia do rio Malacara (40,5 km²). Essa é uma sub-bacia da bacia hidrográfica do rio Mampituba (1940,0 km²), que tem parte de sua área localizada no extremo sul de Santa Catarina e outra no nordeste do Rio Grande do Sul, sendo o rio Mampituba o limite entre esses dois estados (Figura 3). As cabeceiras dessas bacias estão localizadas no planalto da Serra Geral a 1000 m de altitude, em áreas de domínio de dois Parques Nacionais,



denominados de Aparados da Serra (PNAS) e Serra Geral (PNSG). As encostas dos morros na bacia do rio Mampituba são bastante íngremes, apresentando grande amplitude altimétrica entre o topo e a planície de inundação (variação de 10 a 1000 m), apresentando vales fortemente encaixados, que se abrem na planície formando depósitos de leques aluviais (Scheibe et al., 2010). As partes mais altas são de difícil acesso, devido ao relevo ser bastante escarpado.

Nas partes mais altas da bacia do rio Mampituba (1000 m) o clima, segundo a classificação de Köppen-Geiger, é do tipo Cfb (temperado mesotérmico úmido), e nas partes mais baixas (40 m), predomina o Cfa (subtropical mesotérmico úmido). A precipitação característica dessa região é do tipo orográfica. Segundo Back e Poletto (2018), a média anual de precipitação varia entre 1500 mm.ano⁻¹ a 1800 mm.ano⁻¹.

De acordo com Pimentel et al. (2023) a frequência de eventos extremos (> 50 mm) difere ao longo dos meses do ano, sendo os maiores volumes de chuva verificados na primavera e verão. Essa tendência das chuvas deve ser considerada ao avaliar o perigo de inundação na região da bacia do rio Mampituba durante esse período.

Szymanski et al. (2022) e Pimentel et al. (2023) estimaram um tempo de concentração de 3 horas para bacia do rio Malacara, por meio da Equação de Dooge (1973) e por método hidrológico, respectivamente, mostrando que a resposta hidrológica da bacia é rápida. Também é importante salientar que, na região da bacia do rio Mampituba há registros de vários eventos catastróficos, sendo os mais devastadores até o momento, segundo relatos de Ronsani (1999), os ocorridos nos anos de 1903, 1911, 1974, 1995 e 2007, causados por chuvas intensas que desencadearam deslizamentos de terra, fluxo de detritos e inundação brusca de grande magnitude. Esses eventos causaram muitos danos à população local, inclusive com perda de vida humana (Szymanski et al., 2022).

Sistema de monitoramento hidrometeorológico e de alerta

Para desenvolver o sistema de monitoramento hidrometeorológico, a metodologia empregada incorporou o uso de tecnologias baseadas nas redes Mesh e Internet of Things-IoT (Internet das Coisas), assim como Wi-Fi. A estratégia incluiu também a criação de um aplicativo móvel, destinado a otimizar a coleta e o gerenciamento dos dados nas microestações. A Internet das Coisas (IoT) marca uma evolução significativa na internet, facilitando a comunicação machine-to-machine (M2M) e a interação com sistemas externos. Esta evolução tecnológica permite que dispositivos baseados em IoT a operar fisicamente, utilizando sensores e atuadores, enquanto se integram ao ambiente virtual através da troca de dados.

A IoT amplia a conectividade à internet e as capacidades computacionais para uma ampla variedade de dispositivos e sensores, estabelecendo-se como um novo paradigma na comunicação sem fio. O conceito de IoT é essencial para a integração de tecnologias emergentes, otimizando a comunicação entre dispositivos e sistemas, desempenhando um papel crucial na formação de ambientes conectados e inteligentes (Khan et al., 2012)

Segundo Abelém et al., (2007), as redes Mesh são caracterizadas por uma topologia dinâmica, capaz adicionar novos dispositivos e permitir um ajuste flexível. Essas redes são formadas por nós que se comunicam entre si, muitas vezes, adotando padrões como IEEE 802.11 (Wi-Fi) e IEEE 802.16 (WiMAX), o que permite um roteamento dinâmico. A natureza adaptável das redes Mesh facilita a reconfiguração frente às mudanças, como mobilidade dos usuários e alteração na disponibilidade dos nós, criando múltiplas rotas de comunicação para manter a eficiência da rede. Tal característica torna as redes Mesh particularmente vantajosas para aplicações de monitoramento hidrometeorológico em locais de difícil acesso, como rios de cabeceiras em regiões montanhosas que são áreas remotas, onde a capacidade de adaptação e cobertura extensiva são críticas para a coleta de dados contínua e confiável.

Para implementar uma rede de sensores eficaz e dedicada ao monitoramento em bacias hidrográficas montanhosas no extremo sul de Santa Catarina estabeleceu-se pré-requisitos essenciais. Desta forma, foi realizada uma seleção criteriosa de microcontroladores, sensores de temperatura e umidade, sensores de nível hidrostático e pluviômetros, além de interfaces dedicadas para o desenvolvimento do sistema de aquisição de dados hidrometeorológico, com alta resolução temporal (menor que 10 min). O objetivo de adotar essa estrutura foi aprimorar a coleta e análise de dados hidrometeorológicos, visando a construção de um sistema de monitoramento e alerta em áreas com histórico de eventos extremos, como inundações e deslizamentos de terra. Foram utilizados sensores de baixo custo para comunicação de longa distância, capazes de efetuar medições e transmissão de dados para nuvem IoT. Isso permite o acompanhamento constante de dados críticos, como chuva e nível de água. Estes dados são fundamentais não apenas para gestores públicos e para a população que mora em regiões de perigo de inundação, mas também para pesquisadores compreenderem o comportamento hidroclimático da região.

Foi desenvolvido um protótipo com base no microcontrolador ESP32 LoRa, incluindo a codificação do firmware. Nesse protótipo, foram configuradas a frequência de envio de dados para a nuvem, implementada a comunicação multi-hop através do protocolo Mesh e estabelecido o envio dos dados através do protocolo MQTT, projetado para comunicações entre dispositivos conectados em redes de baixa largura de banda ou instáveis. Para o armazenamento de dados utilizou-se sistema MongoDB, que é um banco de dados projetado para armazenar e recuperar dados de forma flexível e escalável.

Após a configuração do protótipo, foram desenvolvidas duas interfaces (mobile e web) para a leitura dos dados recebidos. O sistema web foi implementado utilizando os frameworks Django e Flutter. O Django foi empregado como ferramenta para o desenvolvimento de projetos web utilizando a linguagem de programação Python. Por sua vez, o framework Flutter foi utilizado na criação da interface de usuário, proporcionando uma visualização dinâmica e intuitiva dos dados capturados. Esses frameworks desempenham um papel fundamental na implementação de funcionalidades como o cadastro e exclusão de dispositivos e usuários. O principal objetivo das interfaces é apresentar os dados de forma intuitiva e facilitar a leitura das informações obtidas.



A Figura 17 apresenta a sequência dos blocos que define as principais características e o fluxo de informações do sistema de monitoramento e alerta hidrometeorológico.

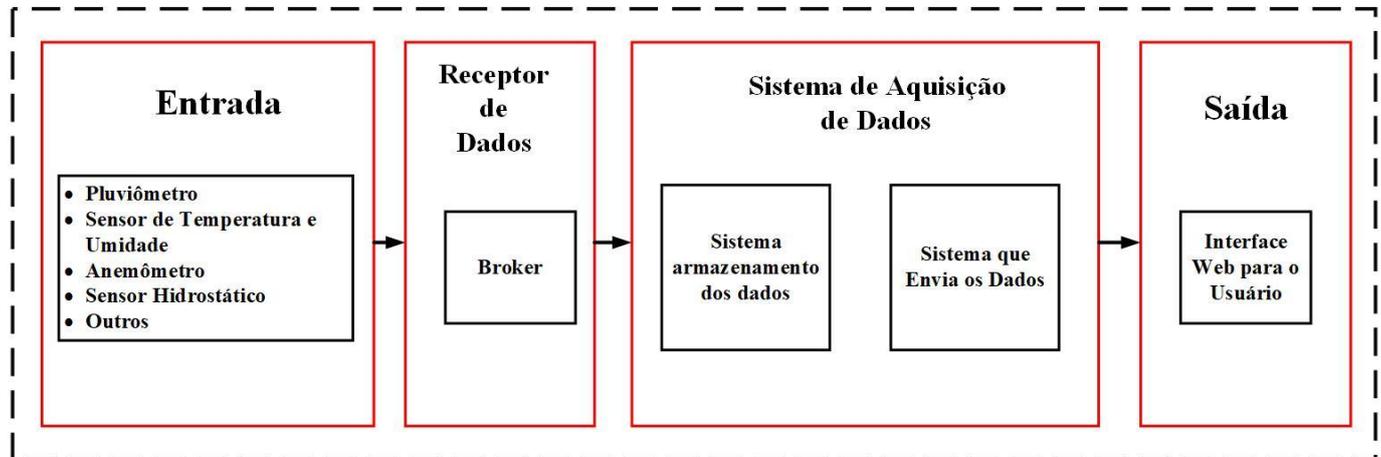


Figura 17: Visão geral do fluxo de informações do sistema de monitoramento hidrometeorológico.

Arquitetura do Sistema de monitoramento e alerta (SMA): comunicação de longa distância (LoRa) entre a estação meteorológica e o gateway

O sistema proposto requer acesso à internet em locais próximos à área monitorada, como por exemplo, sede de uma fazenda, hotéis, pousadas, etc. Além disso, considerou-se a inclusão de um sistema de armazenamento em cartão de memória, com funcionalidade de backup, para resolver possíveis falhas na comunicação. A implementação do Sistema de Monitoramento e Alerta (SMA) utiliza uma conexão Wi-Fi para transmitir os dados recebidos por um microcontrolador ESP32 LoRa para a nuvem IoT. É importante destacar que é possível adaptar a implementação para utilizar tecnologias de comunicação via telefonia celular ou até mesmo via satélite, conforme necessário.

No contexto da computação em nuvem voltada para a Internet das Coisas (IoT), os dados coletados pelo sistema de aquisição são direcionados para um ambiente de computação em nuvem, especialmente projetado para essa finalidade. Esse ambiente na nuvem é otimizado para lidar com grandes volumes de dados provenientes de dispositivos conectados, como sensores e microcontroladores. A escolha da nuvem IoT como plataforma de processamento e armazenamento oferece várias vantagens em termos de acessibilidade, flexibilidade e escalabilidade.

A infraestrutura na nuvem IoT permite o armazenamento remoto dos dados, garantindo fácil acessibilidade a partir de qualquer local e a qualquer momento. Além disso, oferece flexibilidade para o registro e gerenciamento dos dispositivos conectados, possibilitando a adição, remoção ou configuração desses dispositivos de forma remota e centralizada. Essa abordagem simplifica a administração do sistema e facilita sua expansão conforme necessário. Outro benefício significativo é a capacidade de suportar análises e visualizações remotas dos dados, permitindo que os usuários monitorem e analisem o desempenho do sistema em tempo real, mesmo à distância. A implementação do SMA foi estruturada em três componentes principais: sensores, sistema de aquisição de dados e interface de monitoramento e alerta. O diagrama de bloco de comunicação apresentado na Figura , ilustra o fluxo de informações, desde a coleta de dados pelos sensores até o armazenamento na nuvem IoT. Os sensores são responsáveis por capturar os dados relevantes, que são então encaminhados ao sistema de aquisição de dados. Posteriormente, esses dados são transferidos para a nuvem IoT, onde são armazenados e processados para posterior análise e visualização.

A Figura 2 mostra um esquema que descreve a arquitetura de comunicação entre os microcontroladores ESP32 LoRa SX1276 e o broker MQTT hospedado na nuvem IoT. Os microcontroladores, atuando como nós de coleta de dados são responsáveis pela aquisição dos dados a partir de sensores diversos (por exemplo, sensor de temperatura e umidade) e pelo envio desses dados ao broker, utilizando o protocolo MQTT. O broker desempenha um papel importante no gerenciamento das operações de publicação (publish) e inscrição (subscribe) dentro do ecossistema MQTT, funcionando como um intermediário entre os emissores e receptores de dados.

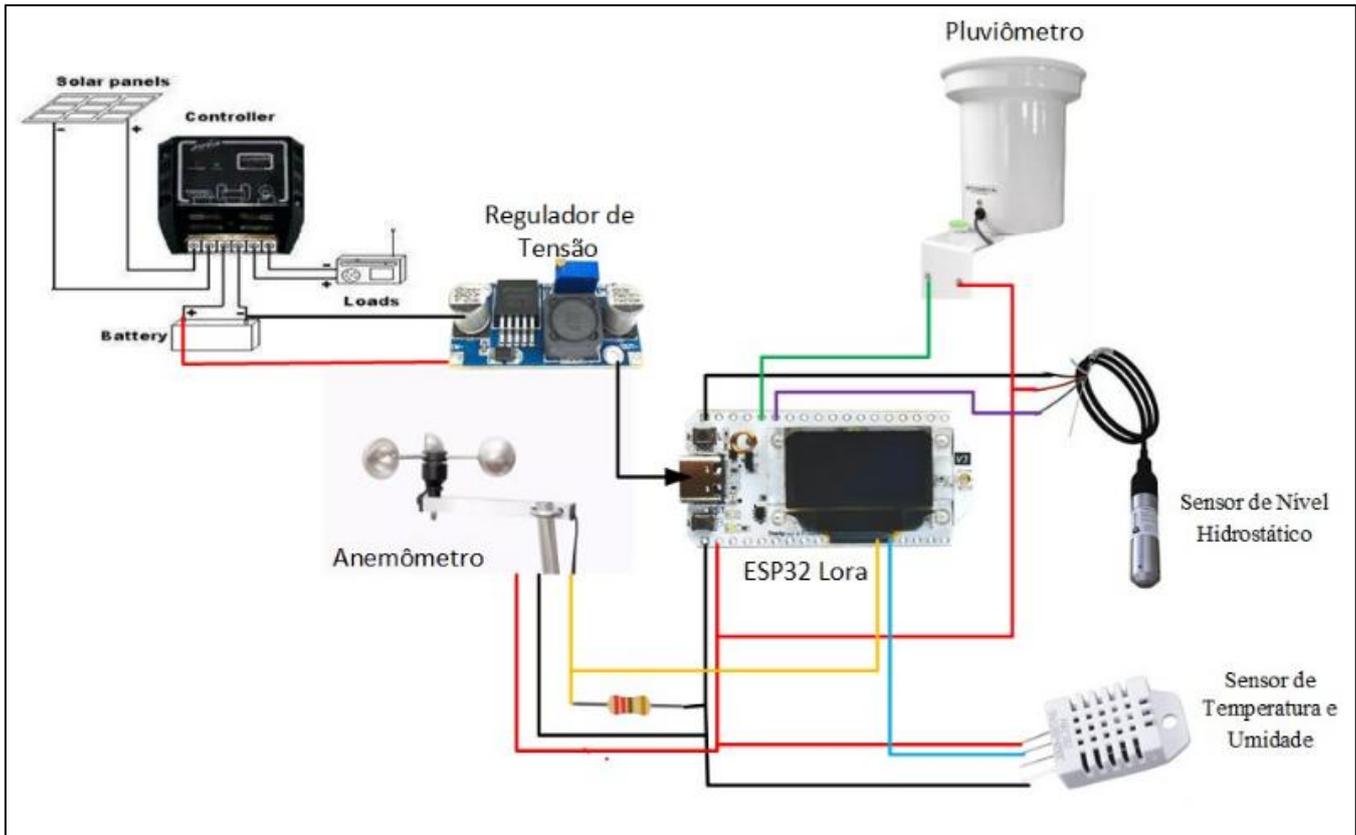


Figura 2: Arquitetura do Sistema de Monitoramento e Alerta.

Especificamente, o broker facilita a distribuição de dados ao receber as publicações de dados sensoriais dos microcontroladores e, subsequentemente, redireciona aos usuários inscritos (subscribers), que são entidades interessadas na recepção dessas informações. Cada usuário inscrito recebe dados, conforme sua subscrição a tópicos específicos, que são categorias definidas pelo broker para organizar as informações recebidas. Essa arquitetura permite uma comunicação eficiente e direcionada, onde, por exemplo, um sensor de temperatura envia suas leituras ao broker, que, por sua vez, encaminha essas informações exclusivamente aos clientes inscritos no tópico correspondente a dados de temperatura.

O sistema de aquisição recebe os dados na nuvem IoT via protocolo MQTT e os registra no MongoDB, juntamente com as informações de cada sensor. Ao receber os dados de um dispositivo específico, como o microcontrolador ESP32 LoRa conectado a um sensor, o sistema gera um registro, seguindo os modelos de dados predefinidos. Esses modelos podem conter dados de temperatura, umidade, precipitação, velocidade do vento ou nível do rio, entre outros. Os dados armazenados são analisados e processados, para então emitir alertas de volume de chuva, nível do rio, velocidade do vento e outros parâmetros relevantes para usuários, como por exemplo, os gestores locais/regionais, defesa civil, comunidade local, entre outros.

Na interface de monitoramento e alerta, o usuário pode cadastrar os sensores a serem utilizados e definir os parâmetros para acionar alertas. Além disso, nesse local podem ser visualizados os gráficos correspondentes a cada sensor ou dispositivo cadastrado no Sistema de Monitoramento e Alerta (SMA). Para a criação dessa interface web, empregou-se a linguagem Python e os frameworks Django e Flutter no desenvolvimento do projeto.

Os sensores da SMA foram selecionados após uma análise minuciosa, com ênfase na qualidade, versatilidade e custo acessível dos dispositivos, bem como nas informações de precisão fornecidas pelos fabricantes. A prioridade foi dada à comunicação digital entre o sensor e o microcontrolador ESP32 LoRa. Essa escolha se justifica pelo fato de que o método de comunicação possibilita um acompanhamento mais detalhado do desempenho do sensor, além de favorecer o uso de software de código aberto. A escolha por um software de código aberto permite uma maior transparência, flexibilidade e colaboração das informações, possibilitando a verificação independente da segurança e eficiência, além de estimular melhorias contínuas e adaptações específicas ao projeto (SMA).

A Tabela 4 apresenta os dispositivos utilizados no sistema SMA desenvolvido. A seleção dos dispositivos baseou-se no objetivo do presente trabalho, que consiste no monitoramento de dados hidrometeorológicos em bacias hidrográficas de região montanhosa, com histórico de eventos extremos de chuva e vazão. Na seleção foram considerados critérios como: precisão na coleta de dados, tipo de comunicação e custo acessível. É importante ressaltar que, o sistema permite a integração de diversos tipos de dispositivos, desde que possam ser alimentados de forma analógica e permitam a comunicação com o microcontrolador ESP32 LoRa, garantindo assim a flexibilidade e atualização do sistema conforme necessário.



Tabela 4. Relação dos Dispositivos Adquiridos

Equipamentos	Precisão	Resolução	Comunicação (Volts)
Pluviômetro de Bâscula (Modelo PL-2)	± 0,2 mm	0,25 mm	Analógico (0 – 5V)
Sensor de Temperatura e Umidade (modelo DHT22)	Temp.: ± 0,1 °C Umid.: 0,1%	Temp.: 0,1°C Umid.: 0,1 %	Analógico (3.3 – 5V)
Anemômetro (Modelo SV10)	± 95%	± 0.25m/s	Analógico (0 – 5V)
Sensor de Nível Hidrostático (Modelo TNH20)	± 0,25% - ± 0,5%	0,5 mH ₂ O	Analógico (24V)

O SMA viabiliza uma comunicação de longa distância, alcançando distâncias de comunicação de 2 a 3 km entre os nós, utilizando o microcontrolador ESP32 LoRa com um protocolo de roteamento para rede Mesh. Essa abordagem possibilita o encaminhamento dos dados até um ponto de acesso com internet. A Figura ilustra um diagrama que exemplifica o funcionamento da rede de sensores utilizando o protocolo Mesh. No contexto da rede Mesh projetada, identificam-se três tipos distintos de nós, representados em cores: (i) destacado em amarelo representa o nó principal, responsável por estabelecer a conexão com a internet, receber os dados enviados pelos outros nós e transmiti-los para a nuvem IoT; (ii) na cor azul, são os nós intermediários, que recebem os dados dos nós folhas (em vermelho) e os encaminham para o nó principal; (iii) os nós folhas, representados em vermelho, coletam dados dos sensores conectados a eles e os transmitem ao nó intermediário. Dessa forma, as informações coletadas por um sensor, como por exemplo de nível, localizado em um rio de cabeceira, podem ser encaminhadas até um roteador com acesso à internet, permitindo o envio desses dados para a nuvem IoT.

Resultados

O Sistema de Monitoramento e Alerta (SMA) foi desenvolvido para ser altamente versátil, aceitando uma ampla gama de dispositivos sensores, como os apresentados na Tabela 1. Adicionalmente esse sistema é aberto à integração de quaisquer outros sensores, desde que sejam compatíveis com a tecnologia de comunicação do microcontrolador ESP32 LoRa.

A Figura 3, mostra o resultado do SMA, onde é possível observar a arquitetura da rede de monitoramento e alerta, destacando a possibilidade de distribuição estratégica de dispositivos sensoriais ao longo de cursos d'água. Essa configuração possibilita a coleta e retransmissão de dados hidrometeorológicos por estações intermediárias equipadas com ESP32 LoRa até uma estação central com conectividade à internet, facilitando assim, a transmissão dos dados coletados para plataformas de nuvem IoT, onde são processados e analisados.

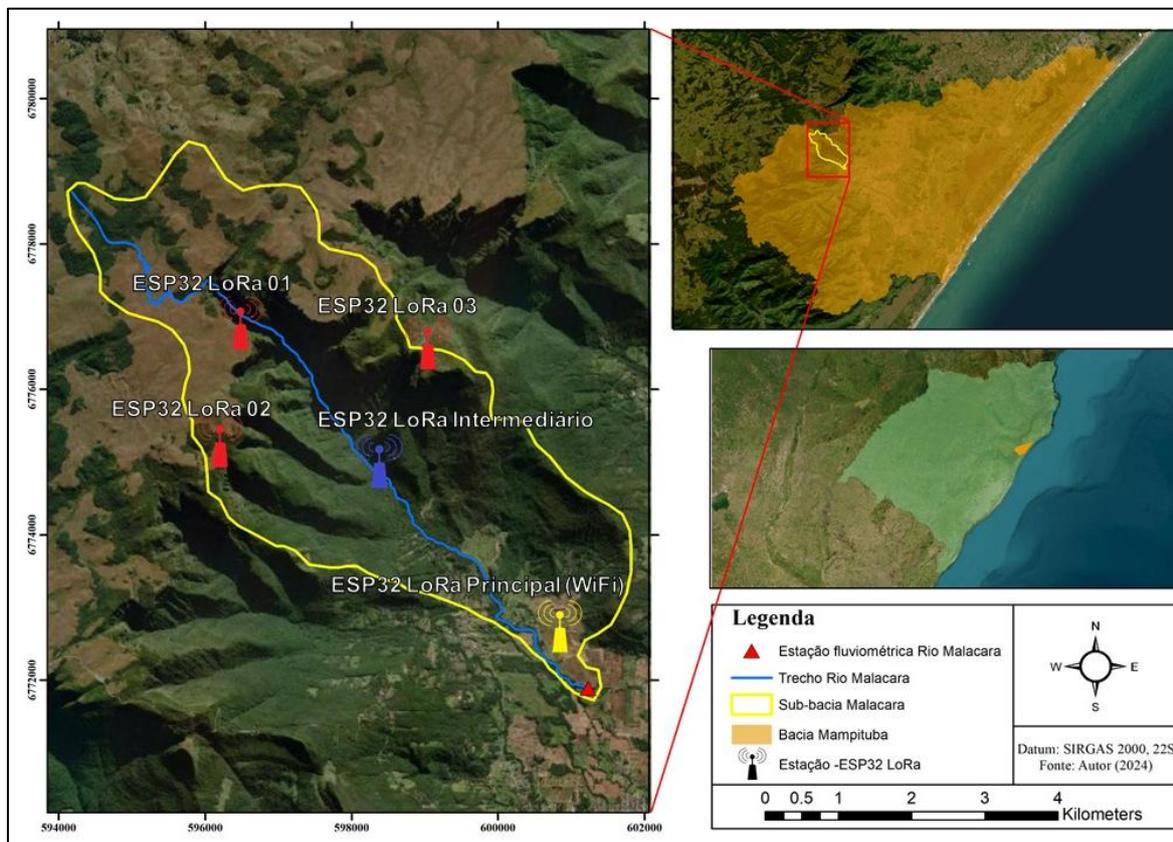


Figura 3. Diagrama da rede de sensores comunicando via ESP32 LoRa em uma rede Mesh proposta para o monitoramento hidrometeorológico na bacia do rio Malacara, extremo sul de SC.



Conforme demonstrado na Figura 4, a interface do sistema de monitoramento e alerta proporciona ao administrador diversas funcionalidades para o gerenciamento eficiente do sistema. Isso inclui o cadastro de novos usuários e dispositivos de sensoriamento, assim como a associação destes a projetos específicos. A interface também facilita o acesso ao banco de dados de registros dos sensores, a configuração de parâmetros hidrometeorológicos para a geração de alertas, bem como para a adição de novos dispositivos ou sensores. Além disso, oferece recursos para a atualização do código dos dispositivos.

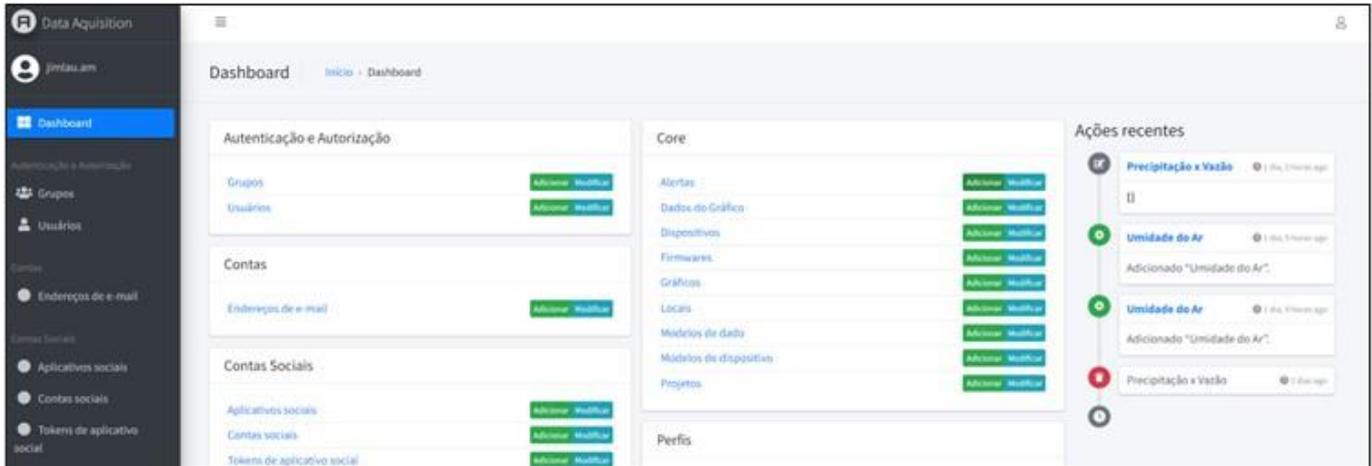


Figura 4: Interface do Sistema de Monitoramento de Alerta.

O SMA desenvolvido no presente trabalho apresenta uma característica importante, que é a capacidade de atualização e expansão dos dispositivos de monitoramento (instalação de outros sensores). Em comparação com sistemas proprietários convencionais, que geralmente limitam a modificação ou adição de novas funcionalidades, o SMA permite que atualizações de software sejam facilmente implementadas, conforme mostra a Figura 5.

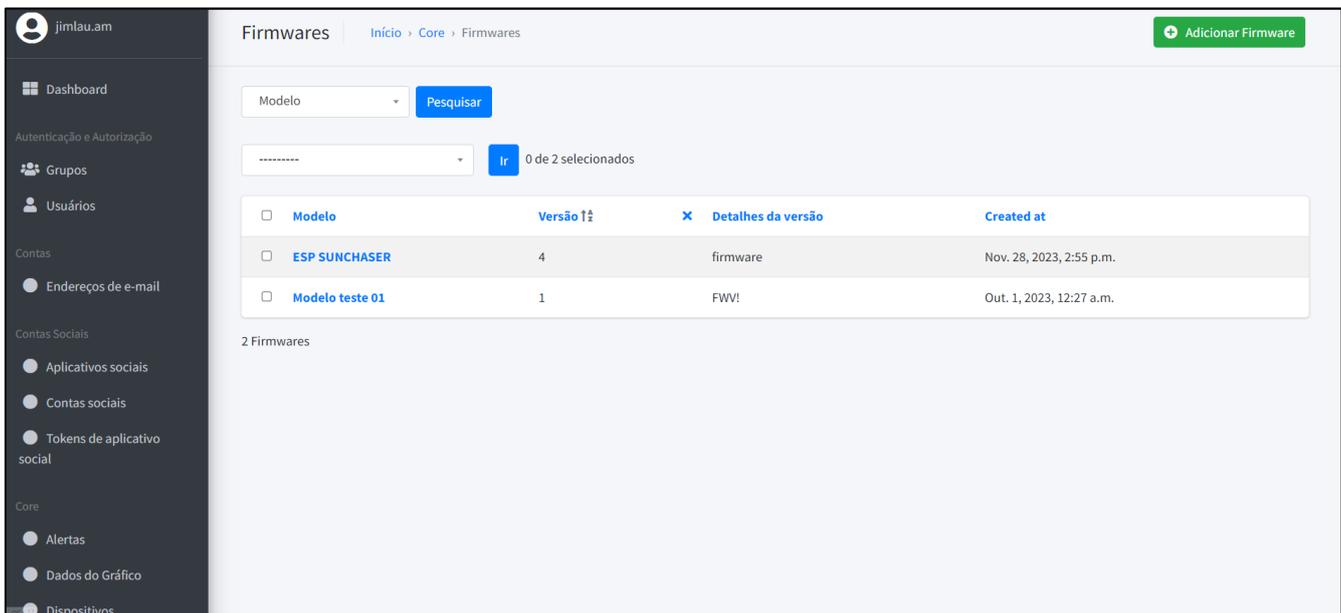


Figura 18. Interface de cadastro e atualização de dispositivos.

Para realizar uma atualização do software, basta carregar a nova versão do código (firmware) na plataforma de nuvem. Os dispositivos, ao detectarem a disponibilidade de uma atualização, iniciam automaticamente o processo de download e aplicação do novo código. Esse procedimento não simplifica apenas a manutenção e expansão do sistema, mas também assegura sua adaptabilidade às evoluções tecnológicas. Assim, não há necessidade de deslocamento até o dispositivo para realizar a atualização da nova versão do código, o que muitas vezes pode ser difícil em áreas de difícil acesso ou distantes.



Ao acessar o portal do SMA, as pessoas têm à disposição um amplo leque de informações, provenientes da rede de sensores, incluindo dados sobre temperatura, umidade do ar, precipitação, vazão, entre outros. Esse sistema oferece a funcionalidade para baixar as séries históricas de dados, permitindo a análise temporal dos parâmetros monitorados. Além disso, a sistema possibilita a visualização de dados em tempo real, selecionando parâmetros específicos registrados no banco de dados, e a possibilidade de gerar gráficos comparativos personalizados, o que melhora a análise dos dados. A Figura 6 apresenta a interface do sistema para seleção e criação de gráficos.

Montar gráficos

Dado

Tipo de gráfico

Início

Fim

Título

Vazão e Precipitação

Início: 2022-01-17 **Fim:** 2022-01-18 **Parâmetros:**
 Teste 0: t1 - vazão e precipitação - 4C:11:AE:03:7C:08 | vaz | Linha
 Teste 0: t1 - vazão e precipitação - 4C:11:AE:03:7C:08 | prec | Barra

Temperatura e Umidade

Início: 2022-01-17 **Fim:** 2022-01-18 **Parâmetros:**
 UFSC Campus Araranguá: t2 - 00:00:00 | temp_out | Linha
 UFSC Campus Araranguá: t2 - 00:00:00 | out_hum | Linha

Figura 19. Interface para geração dos gráficos.

Após o armazenamento dos dados, o usuário pode escolher os parâmetros desejados e gerar gráficos para visualização e análise, com o objetivo de extrair informações sobre as condições hidrometeorológicas monitoradas. Adicionalmente, o sistema permite atualização automática das informações disponibilizadas de hora em hora ou conforme um intervalo específico definido pelo usuário, garantindo acesso contínuo aos dados recentes, como mostra a Figura 7. Além disso, é possível através de uma atualização do código (firmware) alterar o intervalo de tempo de monitoramento dos sensores, como por exemplo, o envio de dados a cada 5 min para o SMA.



Durante a implementação do sistema, com o objetivo de assegurar que o sinal pudesse alcançar longas distâncias (superiores a 1 km) entre os dispositivos, surgiram problemas ao tentar garantir uma distância de transmissão adequada entre os microcontroladores ESP32 LoRa. A solução encontrada foi calibrar a potência do sinal da antena para a transmissão dos dados. Ressalta-se que, para trabalhos futuros, recomenda-se melhorar a usabilidade da interface do usuário, tornando a visualização dos dados mais intuitiva.

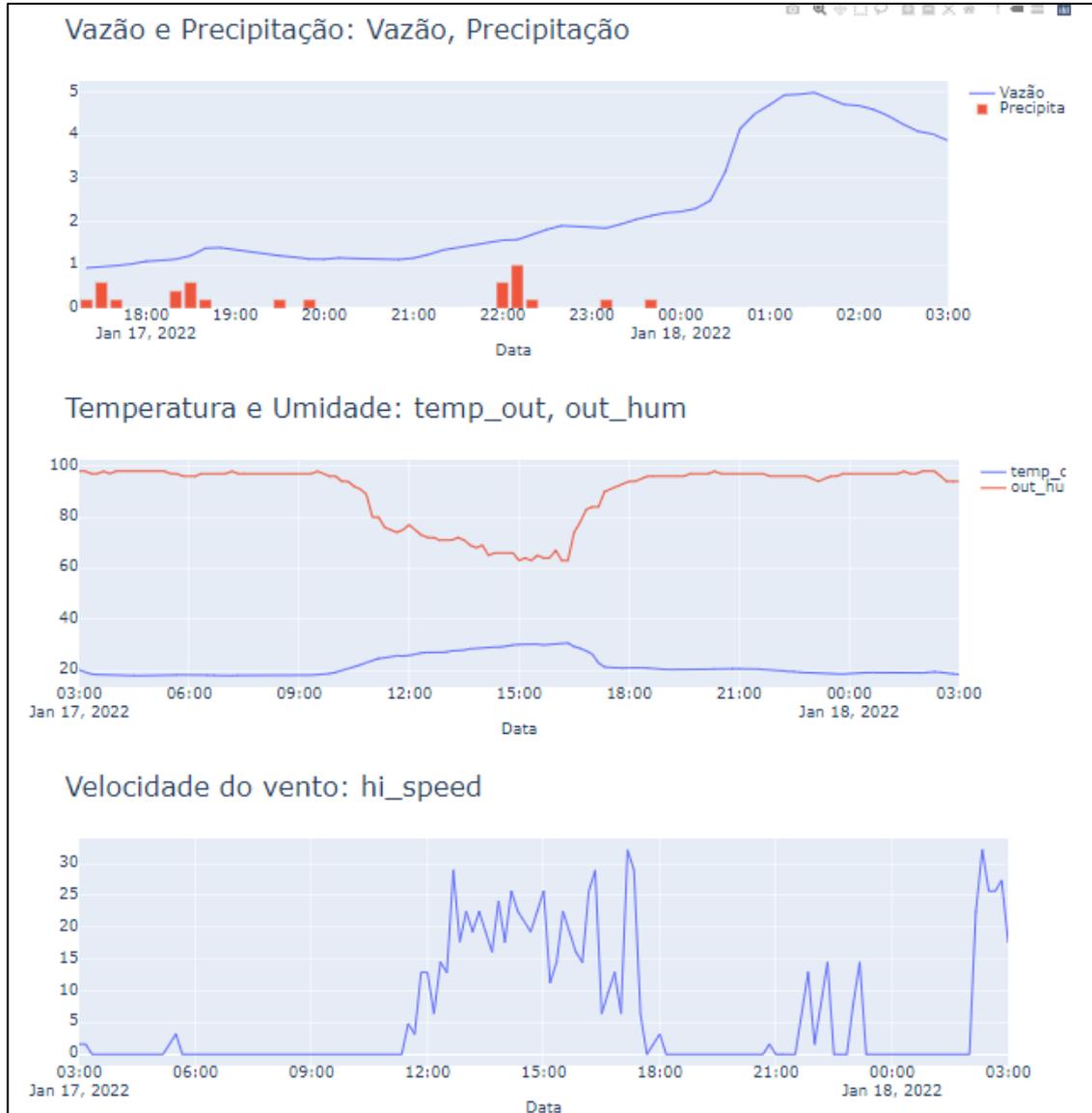


Figura 20 . Visualização dos dados monitorados pelo SMA.

Comentários finais

No presente trabalho foi desenvolvido um Sistema de Monitoramento e Alerta (SMA) para regiões de difícil acesso, remotas e com escassez de estação hidrometeorológica, como é o caso de bacias em ambiente montanhoso.

Os resultados mostraram que a implementação do SMA é viável, uma vez que, atende de maneira satisfatória os requisitos estabelecidos para o sistema, ou seja, é possível coletar e armazenar de dados, utilizando uma nuvem IoT. Adicionalmente, o sistema permite a utilização de diversos sensores, como de temperatura, vento, umidade, precipitação, nível de água, entre outros.

Também verificou se que, o sistema pode ser instalado em locais de difícil acesso utilizando de microcontrolador ESP32 LoRa, que garante comunicação em longas distâncias. Recomenda-se a aplicação do SMA na bacia do rio Malacara, bem como em outras bacias com características hidrológicas, climáticas e de relevo semelhantes, a fim de monitorar dados meteorológicos, eventos de chuva e vazão, bem como a emitir alertas de eventos extremos. Desta forma, o SMA proposto pode auxiliar os gestores e a população na gestão dos desastres naturais, causados por eventos hidrológicos extremos, bem como no planejamento de uso e ocupação de locais de risco, como forma de prevenção.



Referências Bibliográficas

- Abelém, A. J. G. et al. 2007. Redes mesh: Mobilidade, qualidade de serviço e comunicação em grupo. Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC' 07).
- ANA-Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). 2024. Avaliação de custos e benefícios da rede hidrometeorológica nacional – estudos de casos sumário executivo/ Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico; Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Brasília. ANA 41 p.
- Araújo, J.L.P. et al. 2021. Desenvolvimento e implementação de uma estação meteorológica automática embarcada baseada em tecnologia IoT. *Nativa - Pesquisas Agrárias e Ambientais, UFMT- SinoP*, v. 12, n. 1, p. 80-89.
- Back, Á.J; Poletto, C. 2018. Distribuição espacial e temporal da erosividade das chuvas no estado de Santa Catarina, Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 22, p.381-403.
- Banco Mundial. 2012. Avaliação de Perdas e Danos: Inundações e Deslizamentos na Região Serrana do Rio de Janeiro/Janeiro de 2011. Relatório elaborado pelo Banco Mundial com apoio do Governo do Estado do Rio de Janeiro. Novembro de 2012.
- Bernardes, G.F.R.L. et al. 2023. Prototyping low-cost automatic weather stations for natural disaster monitoring. *Digital Communications and Networks* 9, p. 941–956. Journal homepage: www.keaipublishing.com/dcan.
- CRED. 2022 Disasters in numbers. Brussels: CRED; 2023. Disp.:<https://cred.be/sites/default/files/2022_EMDAT_report.pdf> Acesso em: abr. 2024.
- CRED: EM-DAT. 2020 The international disasters database. Disp.:<<https://www.emdat.be/publications>>Acesso em: abr. 2024.
- Hettiarachchi, S., et al. 2018. Increase in flood risk resulting from climate change in a developed urban watershed – the role of storm temporal patterns. *Hydrology and Earth System Sciences*. v. 22, p. 2041–2056.
- De Oliveira, S.B et al. 2019. Pluviômetro Automatizado de Código Aberto e Baixo Custo Utilizando a Plataforma Arduino. *Revista Educar Mais*, v. 3, n. 3, p. 70-76.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change: Sections. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]*. IPCC, Geneva, Switzerland, p. 35-115.
- Ioannou, K. et al. 2021. Low-cost automatic weather stations in the internet of things. *Information*, v. 12, n. 4, p. 146.
- Khan, R. et al. 2012. Future internet: the internet of things architecture, possible applications and key challenges. 2012 10th international conference on frontiers of information technology. IEEE. p.257-260.
- Kobiyama, M. et al. 2018. Abordagem integrada para gerenciamento de desastre em região montanhosa com ênfase no fluxo de detritos. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental. Florianópolis, SC*. v. 7, n. esp p. 31-65.
- Kobiyama, M. et al. 2019. Aplicação de hidrologia na gestão de riscos e de desastres hidrológicos. In: CASTRO, D.D. (org.) *Ciclo das águas na bacia do Rio Tramandaí, Porto Alegre*: Ed. Via Sapiens. p.135 – 140.
- Kobiyama, M.; et al. 2020. Manejo da zona ripária para redução de risco de desastres no ambiente montanhoso. In: Magnoni Jr, L.; Freitas, C.M.; Lopes, E.S.S.; Castro, G.R.B.; Barbosa, H.A.; Londe, L.R.; Magnoni, M.G.M.; Silva, R.S.; Teixeira, T.; Figueredo, W.S. (orgs.) *Redução do risco de desastres e a resiliência no meio rural e urbano*. 2. ed. São Paulo: CPS, p.764-794
- Kobiyama, M.; Zanandrea, F. 2023. Fenômenos Naturais e Desastres Naturais – SC, em dezembro de 2020. In: *Desastres e água eventos históricos no Brasil*. Zanandrea et al 1ed. Porto Alegre, RS. ABRHidro. p. 15-24.
- Lenderink, G. Van Meijgaard, E. 2008. Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. *Nature Geoscience* vol 1 august. www.nature.com/naturegeoscience.
- Marques, C.; Baesso, D.C. 2021. *Desastres e vulnerabilidade na Região Serrana do Rio de Janeiro (RSRJ)*. Ideas, Campinas, SP, v.12, 01-29, e021019.
- Mishra, V. et al. 2012.: Relationship between hourly extreme precipitation and local air temperature in the United States, *Geophys. Res. Lett.*, 39, 1–7p.



- Moraes et al., 2023. Retromodelagem do evento extremo de inundação do rio Taquari no HEC-RAS, ocorrido em 09 de julho de 2020, no município de Lajeado/RS. *Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul*, Porto Alegre, n. 42, p. 104-132.
- Penereiro, J.C.; Meschiatti, M.C. 2018. Tendências em séries anuais de precipitação e temperaturas no Brasil. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.23, n.2, p. 319-331.
- Peng, C. et al. 2021. Scientific challenges of research on natural hazards and disaster risk. *Geography and Sustainability*, 2 p. 216–223.
- Pereira, M.A.F. et al. 2022. Importância do monitoramento e disponibilização de dados hidrológicos para a gestão integrada dos recursos hídricos. *Sociedade & Natureza*, v. 32, p. 292-303.
- Pimentel et al. 2023. Fatores climáticos e hidrológicos na avaliação da trilha piscinas do Malacara, extremo sul de Santa Catarina. XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.
- Ronsani, G. 1999. Praia Grande, Cidade dos Canyons-180 anos de história. Praia Grande: Do autor, 1999. 171p.
- Sant Ana, W. de O.; Back, Á.J. 2019. Tendência do aumento de chuvas e suas implicações na estabilidade de encostas no Sul de Santa Catarina. *Revista Tecnologia e Ambiente*, v. 25, p.95-109.
- Scheibe, L. F.; Buss, M. D.; Furtado, S. M. A. 2010. Atlas ambiental da Bacia do rio Araranguá: Santa Catarina – Brasil – Florianópolis: UFSC: Cidade Futura, 64 p.
- Schneiderbauer, S. et al. 2021. Risk perception of climate change and natural hazards in global mountain regions: A critical review. *Science of the Total Environment* 784. 146957.
- Schwarz, H. et al. 2023. O Desastre de Presidente Getúlio, Ibirama e Rio Do Sul, no alto vale do Itajaí – SC, em dezembro de 2020. In: *Desastres e água eventos históricos no Brasil*. Zanandrea et al led. Porto Alegre, RS. ABRHidro p. 277-297.
- Stähli, M. et al. 2011. One century of hydrological monitoring in two small catchments with different forest coverage. *Environmental monitoring and assessment*, v. 174, p. 91-106.
- Strieder, A.J. et al. 2008. Predicting debris flow susceptible areas through GIS modelling in Aparados da Serra (Brazil). *WIT Transactions on Engineering Sciences*, Vol 60, 2 008 WIT Press. Disponível em: www.witpress.com, ISSN 1743-3533 (on-line); Acesso em mar. 2024.
- Szymanski, F. D. et al. 2022. Avaliação de velocidade de rios em bacias montanhosas, região sul de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Geografia Física* v.15, n.03 p. 1434-1446.
- Trenberth, K.E. 2011. Changes in precipitation with climate change. *Clim. Res.*, 47, p. 123–138.
- Wang, Q.; Fan, X.; Wang, M. 2016. Evidence of high-elevation amplification versus Arctic amplification. *Scientific Reports*. 2016 n. 6.
- Wasko, C., Sharma, A. 2015. Steeper temporal distribution of rain intensity at higher temperatures within Australian storms, *Nat. Geosci*, 8, p. 527–529.
- Wasko, C., et al. 2016. Reduced spatial extent of extreme storms at higher temperatures, *Geophys. Res. Lett.*, 43, p. 4026–4032.
- Williamson, S.N.; et al. 2020. Evidence for Elevation-Dependent Warming in the St. Elias Mountains, Yukon, Canada. *Journal of Climate*. v.33, p. 3253–3269.



ESTRATÉGIAS PARA PROTEÇÃO E RECUPERAÇÃO DE MANANCIAIS DE ABASTECIMENTO EM SÃO PAULO

**1Lupercio Zioldo Antonio, 2Mariana Wyse; 3Pedro Saft; 4Valdineia Rocha; 5Gabriela Vieira;
6Debora Soares; 7Celso Ferrara; 8Maria Aparecida Tonini Amorim**

1DAEE Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo, e-mail: lzantonio@sp.gov.br; 2Vizca Engenharia e Consultoria., e-mail: mariana.wyse@vizca.com.br; 3Consórcio Revitalizar, e-mail: psaft@revitalizar-rv.com.br; 4Consórcio Revitalizar, e-mail: vrocha@revitalizar-rv.com.br; 5Consórcio Revitalizar, e-mail: gabrielaadnv@gmail.com; 6Consórcio Revitalizar, e-mail: dsoares@revitalizar-rv.com.br; 7Sem instituição, e-mail: celsoferrara@gmail.com; 8DAEE Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo, e-mail: mamorim@sp.gov.br

Palavras-chave: mananciais; soluções sistêmicas; sustentabilidade ambiental

Resumo

O Estado de São Paulo, o mais populoso do Brasil, enfrenta desafios significativos relacionados à degradação das águas superficiais e à disponibilidade hídrica. O Relatório de Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo (CETESB, 2020) evidencia a necessidade de investimentos contínuos na ampliação das redes de coleta e tratamento de esgotos, bem como em ações de prevenção e controle da poluição para evitar a degradação dos corpos hídricos. A crise hídrica de 2014-2015 intensificou a preocupação com a disponibilidade de água, levando ao aumento das captações superficiais e à criação do Programa Rios Vivos pelo órgão gestor de recursos hídricos do Estado, voltado para a manutenção da qualidade das águas e a redução de impactos de eventos hidrológicos críticos. Este artigo aborda as ações planejadas e em execução para a proteção e recuperação de nascentes de mananciais de abastecimento no âmbito do Programa Rios Vivos no Estado de São Paulo, com o objetivo de relatar, analisar e sugerir diretrizes futuras com base nos estudos e projetos contratados pelo órgão. Os projetos visam identificar os fatores de degradação, desenvolver ações de educação ambiental, adotar estratégias participativas e estabelecer relações com programas de duração continuada e planos de bacias hidrográficas. Os estudos e projetos contratados contemplam diversas etapas, incluindo diagnóstico, serviços de campo, projetos conceituais e projetos básicos. A metodologia realizada consistiu em revisão bibliográfica, levantamento de dados, análise documental, estudos geoespaciais e vistorias em campo. Os resultados obtidos demonstram a necessidade de intervenções para a recuperação dos mananciais, com destaque para soluções sistêmicas que abordam disciplinas complementares, como estabilização de margens, educação ambiental e pagamentos por serviços ambientais. A análise dos resultados revela demandas de recuperação em todos os municípios e corpos d'água avaliados, reforçando a importância das ações de preservação e recuperação de mananciais para garantir a disponibilidade hídrica e a sustentabilidade ambiental. A colaboração entre o governo estadual, as prefeituras municipais e a sociedade civil é essencial para o sucesso dessas iniciativas. A continuidade do trabalho e a busca por fontes de financiamento são fundamentais para viabilizar a execução das ações propostas e expandir o escopo para outros municípios e corpos d'água. Este estudo contribui não apenas para a sustentabilidade ambiental e socioeconômica do Estado de São Paulo, mas também para o cumprimento dos objetivos de desenvolvimento sustentável estabelecidos pela ONU – Organização das Nações Unidas em sua Agenda 2030.

Introdução

O Estado de São Paulo é o mais populoso do Brasil, contando com 45,1 milhões de habitantes e uma taxa de urbanização de 96,6% constatados pelo SEADE (2022). A evolução da degradação das águas superficiais em diversos cursos d'água do território paulista nos últimos anos é ratificada pelo Relatório de Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo (CETESB, 2020), o qual destaca em sua conclusão a necessidade da continuidade nos investimentos para ampliação de redes de coleta e tratamento de esgotos, soluções mais eficientes para o tratamento de esgoto e ações de prevenção e controle de poluição como ações essenciais para evitar a degradação de corpos hídricos no estado.

Os impactos da crise hídrica de 2014 e 2015 reforçou a preocupação das Administração Pública referente à disponibilidade hídrica no estado de São Paulo. Soma-se a este contexto, o aumento das captações superficiais no estado em 106% entre 2015 e 2022 (DAEE, 2022) para criar um contexto que ensejou à criação, pela – autarquia responsável pela gestão dos recursos hídricos no estado de São Paulo - do Programa Rios Vivos.

O Programa Rios Vivos tem por principal objetivo a manutenção das condições adequadas de disponibilidade e qualidade das águas superficiais no território paulista, visando ainda a promoção de intervenções para redução dos prejuízos decorrentes de eventos hidrológicos críticos, tais como enchentes, inundações e alagamentos relacionados ao assoreamento dos cursos d'água. (DAEE, 2021a; DAEE, 2021b; DAEE 2021c).

As vertentes determinadas pelo órgão para o referido programa passam por ações de (i) elaboração de projetos e execução obras de afastamento e tratamento dos esgotos sanitários domésticos em municípios não operados por concessão; (ii) serviços de limpeza, desobstrução e desassoreamento de corpos d'água paulistas, assim como proteção e regularização de suas margens e (iii) proteção e recuperação de nascentes de mananciais de abastecimento nos municípios do interior e litoral paulista. Este conjunto de ações tem por intenção promover a utilização sustentável dos recursos hídricos e ampliar a disponibilidade hídrica no estado de São Paulo.



Este artigo visa relatar as ações planejadas e em execução na vertente de elaboração de estudos e projetos de proteção e recuperação de nascentes de mananciais de abastecimento do Programa Rios Vivos, tema com grande relevância e impacto na gestão de recursos hídricos. Serão apresentadas as metodologias aplicadas para o desenvolvimento dos referidos estudos e projetos, os resultados das etapas de diagnóstico e a análise de dados que ensejou nas propostas de diretrizes e projetos para este eixo de trabalho, também identificadas e discutidas na seção de resultados.

Objetivos do Trabalho

O objetivo deste artigo é relatar e analisar os esforços realizados nas ações de proteção e recuperação de nascentes de diversos mananciais de abastecimento constantes nos contratos de estudos e projetos no âmbito do Programa Rios Vivos, e sugerir diretrizes subsequentes. As contratações foram orientadas pelas seguintes diretrizes gerais, definidas pela Fundação Florestal para a Elaboração de Projetos de Recuperação Florestal para o FEHIDRO(2009):

- Identificação dos fatores de degradação para definição da estratégia de recuperação mais apropriada ao caso e as possíveis parcerias para a consecução dos objetivos;
- Desenvolvimento de ações de educação ambiental no intuito de informar, sensibilizar e mobilizar a população beneficiada com o projeto;
- Adoção de estratégias participativas para tomada de decisão nas diversas etapas do projeto, com vistas à sustentabilidade socioeconômica e ambiental do projeto;
- Estabelecimento da relação entre o projeto proposto e outros eventuais trabalhos similares desenvolvidos em sua área de abrangência;
- Estabelecimento da relação entre o projeto proposto e os reflexos esperados nos recursos hídricos, considerando os Programas de Duração Continuada e o Plano da Bacia Hidrográfica.

O tratamento holístico que orientou os problemas diagnosticados está vinculado com a determinação dos agrupamentos de projetos separados pelas bacias dos rios selecionados para beneficiamento, de forma a potencializar os resultados das ações propostas, considerando-se as bacias hidrográficas como um todo.

O órgão gestor de recursos hídricos realizou três contratações de Estudos e Projetos, referentes a três distintos eixos de trabalho, os quais correspondem a conjuntos de suas diretorias regionais descentralizadas e Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHs) do Estado de São Paulo, descritos a seguir e ilustrados na Figura 1 “Abrangência de Estudos e Projetos de Proteção e Recuperação de Mananciais”:

- Eixo de Águas Sul e Litoral: Diretorias Regionais: Diretoria da Bacia do Paraíba e Litoral Norte, Diretoria da Bacia do Ribeira de Iguape e Litoral Sul e Diretoria da Bacia do Peixe Paranapanema;
- Eixo Águas do Tietê: Diretoria da Bacia do Turvo Grande, Diretoria da Bacia do Médio Tietê e Diretoria da Bacia do Baixo Tietê;
- Eixo Águas Norte: Diretoria da Bacia do Pardo Grande.

Abrangência de Estudo e Projetos de Proteção e Recuperação de Mananciais

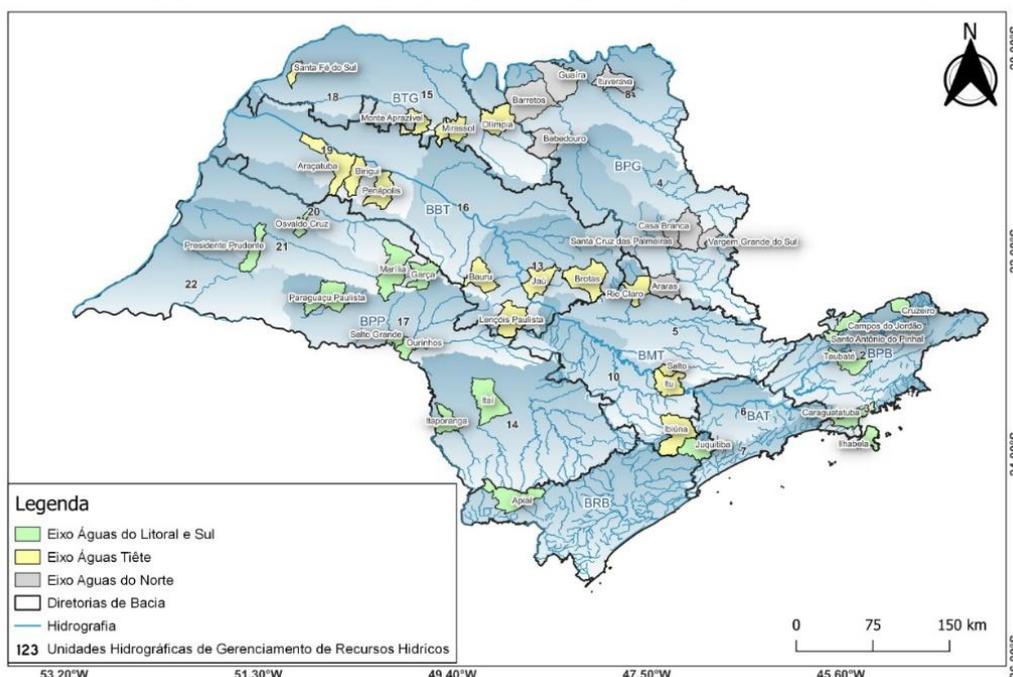


Figura 1: Abrangência de Estudos e Projetos de Proteção e Recuperação de Mananciais. Fonte: Elaboração autores.



Os Estudos e Projetos contratados contaram com a elaboração das seguintes etapas e conjuntos de entregas, cujos resultados serão analisados neste artigo:

- ETAPA 1: Diagnóstico Geral, composta por (i) Plano de Trabalho; (ii) Levantamento de Dados e Análise Documental e (iii) Diagnóstico Geral;
- ETAPA 2: Serviços De Campo, composta por: (i) Avaliação do Meio Físico e Meio Biótico; (ii) Levantamento Topográfico, Sondagens e Serviços Geotécnicos.
- ETAPA 3: Projetos Conceituais, composta por: (i) Proposição de Cenários e Possíveis Soluções; (ii) Seleção de Soluções a serem detalhadas e (iii) Elaboração de Projetos Conceituais.
- ETAPA 4: Projetos Básicos, composta por: (i) Elaboração de Projetos Básicos; (ii) Diretrizes para Detalhamento de Soluções; (iii) Orçamento Estimativo; (iv) Estudos para Licenciamento Ambiental e (v) Relatório Síntese.

Materiais e Métodos

O trabalho aqui apresentado é de pesquisa exploratória, aplicada à análise dos resultados obtidos a partir dos estudos e projetos contratados por agentes da Administração Pública direta, que resultou na elaboração de um conjunto de diretrizes futuras para concretização dos objetivos decorrentes dos referidos estudos e projetos de proteção e recuperação de nascentes de mananciais de abastecimento no Programa Rios Vivos..

A metodologia utilizada para a realização dos estudos e projetos passou pela revisão bibliográfica e levantamento de documentação sobre os temas relacionados ao desenvolvimento do projeto, sendo eles: Reflorestamento e conservação da vegetação nativa; Geotecnia (contenção de erosão e margens); Conservação do solo; Drenagem urbana; Educação ambiental e Saneamento básico (abastecimento, esgotamento sanitário, manejo de águas pluviais e de resíduos sólidos), em todos os municípios e mananciais objeto de análise. Entre os documentos analisados, destacam-se: Planos de bacia, Planos de saneamento, drenagem e resíduos sólidos, Planos de zoneamento, Leis municipais, estaduais e federais aplicáveis, Planos Diretores e Zoneamento Ecológico do Estado de São Paulo.

Além disto, foram realizados levantamentos de dados secundários geoespaciais e vistorias em campo para complementação dos documentos avaliados, para contextualização da área de abrangência dos estudos, caracterização atualizada da bacia hidrográfica, mapas de uso de ocupação do solo e áreas de proteção permanente (APP), a fim de identificar-se as principais áreas degradadas. Foi também realizado o levantamento da estrutura fundiária das áreas dos mananciais, utilizando-se o SICAR (Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural) dos municípios avaliados, e para caracterização do meio físico, foram utilizados diferentes referenciais de avaliação, representados na Tabela 1, Documentos de Referência para Análise do Meio Físico, a seguir:

Tabela 1: Documentos de Referência para Análise do Meio Físico

TEMA DE CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FÍSICO	DOCUMENTOS E REFERENCIAIS UTILIZADOS
Geologia	base de dados do Serviço Geológico Brasileiro (CPRM, 2006), contendo informações de afloramento, litoestratigrafia e ocorrência mineral
Geomorfologia	Mapa de unidades básicas de compartimentação (UBC) do meio físico (Instituto Geológico, 2014) para obtenção de dados das unidades morfoestruturais do Cinturão Orogênico do Atlântico, Bacia Sedimentar do Paraná e Bacias Sedimentares Cenozóicas.
Pedologia	Mapa Pedológico do Estado de São Paulo (Instituto Florestal, 2017), com fotointerpretação de imagens ortorretificadas, auxiliada por mapas de declividade e hipsometria, além de tabelas de atributos com categorização dos diferentes tipos de solo quanto à fertilidade, textura, profundidade, e sua ocorrência no relevo.
Declividade	Modelo Digital de Elevação do Estado de São Paulo, gerado a partir das curvas de nível extraídas das cartas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Instituto Geográfico Geológico (IGG) e Departamento de Serviços Geográficos do Exército, na escala 1:50.000 e com resolução horizontal de 30 metros.
Uso do solo	Mapas do Projeto MapBiomias (MAPBIOMAS, 2021), com mapeamento da cobertura e uso do solo, contemplando os dados mais recentes de uso e cobertura da terra
Diversos	SIGAM GEO: consulta, manipulação, visualização e análise de dados especialmente referenciados por um sistema de coordenadas, vinculado banco de dados da Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística (SEMIL) e ao Sistema Integrado de Gestão Ambiental (SIGAM).

Resultados Obtidos

Por demanda do órgão contratante, os resultados dos estudos e projetos buscaram a elaboração de soluções sistêmicas, que contemplassem disciplinas complementares na proposição de cenários para recuperação e proteção de mananciais, tais como: diretrizes de estabilização de margens e contenção do assoreamento, projetos de estabilização de margens, diretrizes de orientação para usos múltiplos da água, projetos de pagamentos por serviços ambientais (PSA), diretrizes de PSA lastreadas em crédito de carbono e programas de educação ambiental.



Em relação aos programas de Educação Ambiental, buscou-se referenciar os conceitos definidos pela então Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente, a qual destaca a Educação Ambiental como mecanismo para o desenvolvimento de capacidades de controle social e apropriação dos recursos ambientais – entre eles a água - pelos cidadãos, como forma de exercício do direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado.

Assim, as ações de Educação Ambiental compõem as propostas de diretrizes e projetos para a promoção do engajamento e empoderamento dos beneficiários e usuários das regiões abordadas nas funções de mantenedores dos benefícios ambientais gerados pelas ações que serão realizadas.

Outro destaque são as propostas para diretrizes de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), buscando-se atingir a harmonia entre a produção agropecuária e a conservação ambiental por meio do uso adequado do solo, proporcionando benefícios ambientais econômicos e sociais.

A previsão de atendimento para cada um dos eixos, retratadas nos Editais de Contratação dos projetos, contemplavam a realização dos seguintes benefícios, retratados na Tabela 2: “UGRHIs, Municípios, cursos d’água e população beneficiada pelas ações de Estudos e Projetos de Proteção e Recuperação de Mananciais do Programa Rios Vivos”.

Tabela 2: UGRHIs, Municípios, cursos d’água e população beneficiada pelas ações de Estudos e Projetos de Proteção e Recuperação de Mananciais do Programa Rios Vivos

Eixo	UGRHI:	Municípios Beneficiados	Cursos D'água	População Beneficiada	Área de Reflorestamento prevista (ha)	
EIXO ÁGUAS SUL E LITORAL	1 - Serra da Mantiqueira	Campos do Jordão	Ribeirão do Fojo	52.088	11,31	
		Santo Antônio dos Pinhais	Rio da Prata	6.811	15,72	
	2 - Paraíba do Sul	Cruzeiro	Rio Batedor	55.099	1,8	
		Taubaté	Rio Una	314.924	38,39	
	3 - Litoral Norte	Caraguatatuba	Rio Claro	66.843	0	
		Ilhabela	Ribeirão das Tocas / Água Branca	18.996	9,48	
	11 - Ribeira do Iguape e Litoral Sul	Apiáí	Rio Morro do Ouro e Cór. Água Grande	24.374	0	
		Juquitiba	Ribeirão do Godinho	31.444	11,34	
	14 - Alto-Paranapanema	Itaí	Ribeirão Vermelho	18.161	3,369	
		Itaporanga	Ribeirão Vermelho	14.688	37,917	
	17 - Médio Paranapanema	Ourinhos	Rio Pardo	96.591	17,958	
		Paraguaçu Paulista	Ribeirão do Alegre	43.996	4,164	
Salto Grande		Ribeirão Azul	4.572	10,14		
20 - Peixe	Marília	Rio do Peixe	134.197	5,31		
	Osvaldo Cruz	Córrego do Negruinho	31.236	13,701		
21 - Aguapeí	Garça	Córrego do Barreiro (Microbacia)	44.390	21,849		
22 - Pontal do Paranapanema	Presidente Prudente	Ribeirão Santo Anastácio	83.044	6,711		
EIXO ÁGUAS DO TIETÊ	13 - Tietê/Jacaré	Brotas	Córrego Gouveia	22.217	6,714	
		Lençóis Paulista	Rio Lençóis	40.181	13,767	
		Jaú	Ribeirão Pouso Alegre	53.998	12,867	
	16 - Tietê/Batalha	Bauru	Rio Batalha	153.634	15,441	
		Araçatuba	Ribeirão Baguaçu	155.533	35,586	
	19 - Baixo Tietê	Birigui	Córrego do Baixote	57.666	37,896	
		Penápolis	Ribeirão Lajeado	60.568	13,095	
	10 - Sorocaba e Médio Tietê	Ibiúna	Rio Sorocabuçu	75.908	16,782	
	10 - Sorocaba e Médio Tietê	Itu	Ribeirão Pirapitingui	109.582	28,218	
	5 - Piracicaba / Capivari / Jundiáí	Rio Claro	Ribeirão Claro	103.212	26,448	
	5 - Piracicaba / Capivari / Jundiáí	Salto	Ribeirão Pirai	72.065	18,351	
	15 - Turvo/Grande	Olímpia	Córrego Olhos D'água	8.106	11,319	
S. J. do Rio Preto		Rio Preto	262.582	16,047		
18 - São José dos Dourados	Mirassol	Rio São José dos Dourados	16.751	2,292		
	Monte Aprazível	Córrego da Água Limpa	25.087	14,172		
	Santa Fé do Sul	Córrego Cabeceira Comprida	30.706	18,048		
EIXO ÁGUAS NORTE	12 - Pardo e Grande	Barretos	Ribeirão das Pitangueiras	122.100	76,2	
		Bebedouro	Córrego Consulta	77.500	53,1	
	4 - Pardo	Casa Branca	Córrego Retiro	77.500	30,6	
		Vargem Grande do Sul	Ribeirão da Congonhas	20.544	0,453	
	8 - Bacia do Sapucaí Mirim / Grande	Guaíra	Rio Verde	40.048	27,327	
		Ituverava	Ribeirão Jardim	40.800	7,341	
	9 - Mogi Guaçu	Ituverava	Rio do Carmo	40.246	43,311	
		Araras	Ribeirão das Araras	131.057	20,001	
		Santa Cruz das Palmeiras	Ribeirão das Furnas	131.057	20,676	
			Córrego do Pessegueiro	33.729	29,232	
		20 UGRHIS atendidas	41 Municípios Beneficiados	43 Cursos D'água	2.795.274 pax	804,45 ha



A partir das informações coletadas e esforços de desenvolvimento de soluções pelas projetistas a partir da caracterização de cada uma das localidades beneficiadas, foram produzidos conjuntos de diretrizes e soluções de projeto tendo como objetivo a revitalização não somente do curso d'água cuja nascente foi objeto de estudo, como também de toda a área de entorno na bacia dentro dos raios pré-determinados de intervenção que exercesse influência no processo de depreciação e/ou possam contribuir para a revitalização dos referidos corpos hídricos.

As soluções apresentadas foram apresentadas em sessões com representantes das prefeituras municipais e validadas por estes entes, fortalecendo assim o compromisso conjunto na realização de ações derivadas das soluções propostas, como o encaminhamento de projetos de educação ambiental, manutenção e zeladoria, pagamento por serviços ambientais, entre outros.

Cada bacia e cada corpo hídrico apresentaram diferentes graus de comprometimento, e tiveram suas soluções detalhadas em especificidade, porém, para a finalidade de apresentação do resultado geral da contratação de estudos e projetos em análise, é apresentado abaixo, na Tabela 3, a síntese das soluções definidas pelas projetistas e validadas pela contratante e municípios.

Tabela 3: Síntese do resultado das soluções propostas para o escopo dos contratos de estudos e projetos de proteção e recuperação de mananciais do Programa Rios Vivos

Manancial	Diretrizes e/ou Projetos de Estabilização de Margens e Contenção do Assoreamento	Diretrizes de Orientação para Usos Múltiplos da Água	Municípios com Projetos de Pgto. por Serviços Ambientais	Municípios com Programas de Educação Ambiental	Projetos de Reflorestamento		
					Área total de recomposição (ha)	Nº de mudas a serem plantadas	Cerca (m)
Córrego Gouveia	2	3	Brotas		24,22	7301	26315
Rio Lençóis	2	3	Lençóis Paulista, Agudos		13,64	0	0
Ribeirão Pouso Alegre	2	3	Jaú		32,93	10902	0
Rio Batalha	2	3	Bauru, Agudos		35,02	7585	1382
Ribeirão Bagaçu	2	3	Araçatuba, Coroados		29,97	17253	1929
Córrego do Baixote	2	3	Birigui, Coroados		9,67	1450	447
Ribeirão Lajeado	2	3	Penápolis		25,64	18937	3102
Ribeirão Pirapitingui	3	3	Itu		13,07	5868	1097
Ribeirão Claro	3	3	Corumbataí, Rio Claro		23,23	4551	1015
Ribeirão Piraiá	2	3	Salto, Agudos	Cabreúva, Salto	9,53	5418	273
Rio Preto	2	3	São José do Rio Preto,		39,2	0	2206
Rio São José dos Dourados	2	3	Mirassol		44,36	22188	3189
Córrego Cabeceira Comprida	2	3	Santa Fé do Sul, Três Fronteiras		24,77	450	3428
Rio da Prata	2	3	Santo Antônio do Pinhal		0,18	0	0
Rio Batedor	2	3	Cruzeiro		Área preservada	Área preservada	-
Rio Una	2	3	Taubaté		27,87	28.156	7.590
Rio Claro	1	3	Caraguatatuba, São Sebastião	Caraguatatuba	Área preservada	Área preservada	-
Ribeirão das Tocas	2	3	Ilhabela		Área preservada	Área preservada	-
Ribeirão Vermelho	2	3	Itapeva, Itai		9,05	3.718	189
Ribeirão Vermelho	2	3	Itararé, Itaporanga	Itararé, Itaporanga, Riversul	116,77	189.271	16.558
Rio Pardo	2	3	Pardinho, Ourinhos		30,86	32.023	1.950
Ribeirão Alegre	2	3	Paraguaçu Paulista		13,77	1.648	310
Ribeirão Azul	2	3	Ibirarema, Ourinhos	Ibirarema, Salto Grande	30,09	183	4
Rio do Peixe	3	3	Garça, Marília	Garça, Marília, Ocaçu	25,21	13.319	1.623
Córrego do Negrinho	2	3	Oswaldo Cruz, Parapuã Parapuã, Oswaldo Cruz		16,91	5.068	1.825
Córrego do Barreiro	2	3	Garça		15,56	3.367	1.064
Ribeirão Godinho	2	3	Juquitiba		7,33	0	230
Ribeirão das Pitangueiras	2	3	Barretos		19,09	700	0
Córrego Consulta	2	3	Bebedouro		19,31	5301	225
Córrego Retiro	2	3			24,51	8.385	369
Rio Verde	2	3	Vargem Grande do Sul		28,16	39124	8736
Ribeirão Jardim	2	3	Guaiúba		3,52	2.167	0
Ribeirão das Araras	3	3	Araras		29,79	22.354	0
Ribeirão das Furnas	2	3			18,8	150	91
Córrego do Pessegueiro	3	3	Santa Cruz das Palmeiras		13,88	5768	46
Totais	73	111	43	44	775,91	462.605,00	85.193,00

Os projetos tem prazo previsto de conclusão em julho de 2024, e as entregas pendentes relacionadas, na maior parte dos casos (com exceções de mananciais ou municípios específicos que apresentaram restrições ao desenvolvimento do trabalho, que encontram-se ainda em etapas de desenvolvimento das soluções), ao detalhamento das soluções de projeto, desenvolvimento de orçamentos para subsidiar a contratação da etapa de execução das ações, e, por fim, análises de linhas de financiamento com



afinidade ao escopo do trabalho que possam ser exploradas para a consecução dos benefícios das soluções de preservação e recuperação dos mananciais.

Análise dos resultados

Os resultados em geral apresentaram demandas de recuperação na totalidade dos municípios e corpos d'água vistoriados, o que corrobora a relevância da abordagem das temáticas de recuperação e preservação de cursos d'água enquanto escopo de trabalho de gestão de recursos hídricos, especialmente pela correlação da situação destes recursos à manutenção de condições de qualidade e disponibilidade hídrica e sustentabilidade ambiental.

Esta agenda é compatível aos compromissos apresentados na versão vigente do Plano Plurianual da Comissão Estadual de Objetivos do Desenvolvimento Sustentável do Estado de São Paulo, que tem por destaque a preocupação com a disponibilidade hídrica para consumo humano, cidades sustentáveis e vida terrestre e na água (também presentes na Agenda 2030 da ONU, detalhada em seus 17 ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável).

Além disso, o conjunto de ações propostas estabelece um ponto de partida para uma postura que vai além da reversão dos efeitos diagnosticados a partir dos eventos de crise hídrica e escassez de água, mas explicita o posicionamento do Governo do Estado de São Paulo no sentido de preservação dos recursos naturais associados ao abastecimento hídrico, além de prevenir os efeitos negativos de impactos ambientais decorrentes dos modelos atuais de todas as etapas relacionadas aos serviços de saneamento prestados pelo Estado e seus entes.

A abordagem sistêmica e multidisciplinar das soluções propostas tem como ponto de atenção a necessidade de engajamento e negociações políticas entre os agentes sociais e econômicos envolvidos, que, em analogia aos processos de estruturação dos Planos de Bacia, devem ter a solução dos seus problemas sensível aos conflitos sociais, econômicos e políticos existentes, de forma a garantir sua eficácia e imparcialidade (Goldenstein, 2002), caso não sejam resultados de negociações políticas, tendo como proposições a solução dos problemas de forma desvinculada dos conflitos sociais, econômicos e políticos existentes, terão sua eficácia rapidamente comprometida pela parcialidade do enfoque gerado.

Neste sentido, o envolvimento das prefeituras municipais dos cursos d'água analisados contribui para uma ação colaborativa que favorece a efetiva realização das soluções previstas, que poderão ser expandidas ou multiplicadas através das competências específicas destes órgãos administrativos, com maior permeabilidade, propriedade e proximidade às temáticas específicas de sua população e cursos d'água.

Conclusões

A atuação do Governo do Estado de São Paulo, através de seus órgãos de administração direta, assim como das Prefeituras Municipais no engajamento e demanda por ações visando a sustentabilidade dos recursos hídricos do Estado mostra-se pertinente frente aos resultados dos estudos e projetos analisados, que demonstram de fato a necessidade de intervenções para a proteção e recuperação de mananciais. Soma-se a isto a moção pela colaboração entre estes entes e a sociedade civil – beneficiária, mas também agente ativa na preservação dos referidos recursos – essencial para a eficácia dos efeitos almejados, e que deve ser continuamente estimulada.

Além disso forma, como considerações acerca dos resultados apresentados, seja pela observação do diagnóstico realizado, seja pela observação dos resultados dos contratos de estudos e projetos, entende-se como primordial a continuidade do trabalho, ou seja, a viabilização da execução das ações de preservação e recuperação de mananciais.

Assim, percebe-se como muito relevante o seguimento do trabalho de análise das fontes de financiamento ou mesmo da concorrência das ações de execução das intervenções para proteção e recuperação de mananciais por recursos estaduais para a realização de obras de infraestrutura.

Além disso, o trabalho apresenta um recorte dos municípios e corpos hídricos selecionados pela contratante, e o mesmo escopo de diagnóstico e elaboração de soluções poderia ser expandido para outros, não avaliados neste primeiro momento. De toda forma, apesar de parcial, entende-se como relevante e pertinente o olhar específico sobre estas tratativas, presentes nas agendas não apenas do estado de São Paulo para a sustentabilidade ambiental e socioeconômica, mas também em agendas internacionais, como a da ONU em seus 17 objetivos de desenvolvimento sustentável.

Referências Bibliográficas

BIOTA/FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo. Delimitação das áreas prioritárias para criação e/ou ampliação de Unidades de Conservação de Proteção Integral. Escala: 1:50.000, BIOTA/FAPES, 2008.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo**. 2021.

CETESB, São Paulo, 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2021/09/Relatorio-Qualidade-das-Aguas-Interiores-no-Estado-de-Sao-Paulo-2020.pdf>. Acesso em: Fev/2024.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo**. 2022. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2023/09/Relatorio-de-Qualidade-das-Aguas-Interiores-no-Estado-de-Sao-Paulo-2022.pdf>.



Aguas-Interiores-no-Estado-de-Sao-Paulo-2022.pdf

CPLA - Coordenadoria de Planejamento Ambiental. Modelo Digital de Elevação (MDE) do Estado de São Paulo (Escala 1:50.000). Coordenadoria de Planejamento Ambiental, Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2013.

CPRM - Serviço Geológico Brasileiro. Geologia do Estado de São Paulo. Escala 1:750.000. CPRM, 2006

DAEE Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo. Concorrência Nº 006/DAEE/2021/DLC, Processo DAEE-PRC-2021/00389, [Execução do Reservatório de Contenção de Cheias EU-09, a ser implantado no Ribeirão Eusébio, no município de Franco da Rocha, Estado de São Paulo]. São Paulo. Julho 2021a.

DAEE Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo. Concorrência Nº 007/DAEE/2021/DLC, Processo DAEE-PRC-2021/00311 [Execução da obra de complementação do “Pôlder” do Juquery, com a canalização do Rio Juquery no trecho compreendido entre a travessia de acesso do Hospital do Juquery até a foz do Ribeirão Eusébio, numa extensão de aproximadamente 400m, no município de Franco da Rocha, Estado de São Paulo.] São Paulo. Julho 2021b.

DAEE Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo. Concorrência Nº 008/DAEE/2021/DLC, Processo DAEE-PRC-2021/00310 [Execução da obra de implantação de Galeria de Reforço desvio na foz do Ribeirão Água Vermelha no Ribeirão Eusébio, a ser implantada na Rua Dr. Hamilton Prado, no trecho compreendido entre as ruas Dr. Osório César e Coronel Rondon, até a estrutura existente que desemboca no Ribeirão Eusébio, numa extensão aproximada de 230 m, no Município de Franco da Rocha, Estado de São Paulo] São Paulo. Julho 2021c.

DAEE- Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo. Hidrologia – Bando de Dados Hidrológicos. 2022. Disponível em: <http://www.hidrologia.dae.sp.gov.br/>. Acesso em: Fev/2024.

FEHIDRO – Fundo Estadual de Recursos Hídricos. Roteiro para Elaboração de Projetos de Recuperação Florestal para o Fundo Estadual de Recursos Hídricos – FEHIDRO. 2009. Disponível em: https://sigam.ambiente.sp.gov.br/sigam3/repositorio/222/documentos/Roteiro_Elaboracao_Projetos_Recuperacao_Florestal_FEHIDRO.pdf. Acesso em: Fev/2024

GOLDENSTEIN, S. Os Planos de bacia como base para o desenvolvimento regional. In: THAME, A.C.M. Comitês de bacias hidrográficas: uma revolução conceitual. São Paulo: IQUAL Editora, 2002.

IF - Instituto Florestal. Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado. ORG: ROSSI, M. São Paulo: Instituto Florestal, 2017.

IG - Instituto Geológico. Unidades Básicas de Compartimentação do Meio Físico (UBC) do Estado de São Paulo.

IG/Coordenadoria de Planejamento Ambiental/Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2014.

IPA - Instituto de Pesquisas Ambientais. Atlas de Suscetibilidades dos Solos do Estado de São Paulo. ORG: ROSSI, M.;

NALON, M. A.; KANASHIRO, M. M. São Paulo: SIMA/IPA, 2022.

IPA - Instituto de Pesquisas Ambientais. Mapeamento da cobertura vegetal nativa do Estado de São Paulo, Inventário Florestal de 2020. São Paulo: IPA, 2020.

Mapbiomas. Projeto mapbiomas – Coleção [7] da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil. Disponível em: <https://mapbiomas.org/>. Acesso em: nov.2022.

OLIVEIRA, J. B. de; CAMARGO, M.N.de; ROSSI, M. & CALDERANO FILHO, B. 1999. Mapa pedológico do Estado de São Paulo. Campinas: Instituto Agrônomo/EMBRAPA Solos, 1999. V. 1. 64 p.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo, DGFFLCH-USP, IPT, FAPESP, 1997. SEADE – Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados. IMP – Informações dos Municípios Paulistas. Dashboard. Disponível em: <https://populacao.seade.gov.br/>. Acesso em: 04 de agosto de 2023.



SICAR - Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural. Disponível em: <https://www.car.gov.br/publico/imoveis/index>. Acesso em: Dez/2022.

SIGAM – Sistema de Informações Gerenciais do FEHIDRO. Disponível em: <https://sigam.ambiente.sp.gov.br/>. Acesso em: Dez/2022

SIGEF - Sistema de Gestão Fundiária. Disponível em: https://certificacao.incra.gov.br/csv_shp/export_shp.py. Acesso em: Dez/2022.

PMVA – Programa Município VerdeAzul. Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística: VerdeAzul Digital. Disponível em: <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/verdeazuldigital/ugrhi/>. Acesso em: Dez/2022.

Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística | CONSEMA. Licenciamento ambiental municipal. Disponível em: <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/consema/licenciamento-ambiental-municipal/>. Acesso em: Dez/2022.



IMPACTOS DA APLICAÇÃO DO BUSINESS INTELLIGENCE NO SETOR DE SANEAMENTO DA SUPERINTENDÊNCIA NORTE NA COMPANHIA DE SANEAMENTO DO MARANHÃO NO ANO DE 2023

1Railson Silva Ribeiro, 2Fabiana Ribeiro Caldas, 3José Miguel Serra Neto, 4Nathalia Cunha Almeida Pinheiro
1 CAEMA, e-mail: eng.railsonribeiro@gmail.com; 2 UFMA, e-mail: engenharia.fabianacaldas@gmail.com;
3 CAEMA, e-mail: eng.serraneto@gmail.com; 4 CAEMA, prof.nathaliapinheiro@gmail.com

Palavras-chave: Power-BI; Tomada de decisões; Eficiência.

Resumo

Os serviços de abastecimento de água potável e esgotamento são serviços essenciais para a vida humana, além de auxiliar no desenvolvimento de uma nação. A universalização do saneamento é uma das metas estabelecidas pela Organização das Nações Unidas e para alcançar tal meta o poder público estabeleceu a lei do Novo Marco do Saneamento. O uso da tecnologia no setor do saneamento tem a função de alavancar o setor, torná-lo sustentável, eficiente e ajudar no processo de tomada de decisões. A Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão-CAEMA é a responsável pelos serviços de abastecimento de água potável e esgotamento no estado do Maranhão, o setor escolhido para o estudo de caso foi a Superintendência Norte, a qual é responsável pelos serviços em 32 municípios do estado. O trabalho realizado proporciona discussões sobre a importância da aplicação da ferramenta Power BI no setor público e principalmente no setor do saneamento básico para otimização de tempo em processo de tomada de decisões e decisões mais precisas.

Introdução

O saneamento básico é um serviço fundamental para o bem-estar da população, ele compreende coleta e tratamento de esgoto, abastecimento de água, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos e drenagem e manejo das águas pluviais urbanas (Brasil, 2020). Para o autor (Nozaki, 2007) os serviços de saneamento básico fazem parte dos chamados serviços de infraestrutura, possui provisão pública ou mesmo regulação pública com a intervenção na alocação de recursos, a fim de se atender as necessidades públicas com uma produção dos bens.

A definição de saneamento básico é muito ampla ao longo do tempo, houve a necessidade de mudar o entendimento de saneamento básico para saneamento ambiental com o objetivo de incluir meio ambiente e educação ambiental, visando também atender os serviços já inclusos como resíduos sólidos, drenagem, esgoto e água (Nozaki, 2007), primordialmente para o desenvolvimento socioeconômico de uma região.

O saneamento é uma questão de preocupação mundial. Como resultado das crescentes discussões internacionais, foi estabelecida a agenda 2020 para o Desenvolvimento Sustentável por meio dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e metas fixadas (Leite; Moita; Bezerra, 2022). Os 17 ODS possuem metas estabelecidas pela Organização das Nações Unidas (ONU) que devem ser alcançadas até 2030 (Junior; Bentes; Santos; Dutra; Sobral, 2021).

Para atender às metas da ONU referente à universalização do acesso ao saneamento básico no Brasil foi estabelecida a Lei nº 14.026 de 15 de julho de 2020 que trata do Novo Marco Legal do Saneamento Básico. A lei prioriza o acesso à universalização dos serviços de fornecimento de saneamento básico (Gadelha, 2021), tendo como principais metas aumentar a cobertura de pessoas com acesso a coleta de esgoto e elevar o índice de cidadãos com água tratada, para se obter tais objetivos é necessário uma série de ações como o uso da tecnologia em favor da ampliação do saneamento básico.

No início da década de 60, os serviços referentes ao abastecimento de água da cidade São Luís eram de responsabilidade do Departamento de Água e Esgotamento Sanitário (DAES), tendo a necessidade de mudança no cenário do saneamento, foi criada uma empresa para administrar o serviço de água, esta foi chamada de Companhia de Saneamento de São Luís (SANEL). Com o surgimento do Plano Nacional de Saneamento Básico em 1971, houve a necessidade de ampliar os municípios atendidos pelos serviços de abastecimento de água, para tal foi necessário a criação de uma empresa que tivesse o objetivo de atender mais municípios do interior do estado do Maranhão, logo foi instituído a lei nº2.653, de 6 junho de 1966 que criou a Companhia de Saneamento do Maranhão (CAEMA).

No final da década de 60, existiam duas empresas de saneamento no estado, uma responsável pela cidade de São Luís a SANEL e a CAEMA responsável pelo interior. Na década de 70 ocorreu a incorporação da SANEL à CAEMA, que tinha a função de gerir os serviços de saneamento em todo o estado. O objetivo primordial do órgão público é planejar, coordenar, implantar, ampliar, construir e explorar serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário do Estado do Maranhão.

A CAEMA está presente em 138 dos 217 municípios que compõem o estado do Maranhão, para conseguir atender as demandas da companhia criou duas superintendências, a Norte responsável pela cidade de São Luís e das unidades de negócio de Pinheiro que corresponde a 19 cidades e gerência de negócio de Barreirinhas com 12 municípios abrangendo um total de 32 cidades, é realizado gestão dos serviços de abastecimento de água, coleta, tratamento e esgotamento sanitário pela Superintendência Norte (OCN) atendendo uma população de mais de 1.000.000 de pessoas, a Sul é responsável por Imperatriz e 7 unidades de negócios compondo 106 municípios. A companhia faz a gestão de muitos sistemas de abastecimento de água e coleta e tratamento de efluentes, para isso é necessária uma gestão eficiente e ágil para atender os anseios da população.



O autor (Meirelles, 1966) em seu trabalho Direito administrativo brasileiro cita que a administração pública consiste na gestão dos bens e interesses qualificados de uma comunidade, tanto em âmbito federal, estadual ou municipal, seguindo os preceitos do direito e da moral, com o fim de realizar o bem comum. Partindo desse pressuposto observa-se que a administração pública necessita cada vez mais de transparência, com um controle mais efetivo de seus processos (Calixto; Velasquez apud Filho, 2008), visando a proteção do patrimônio e um sistema de controle interno com indicadores relevantes para uma melhor execução das demandas.

No âmbito da CAEMA são necessárias informações e análises para nortear o processo de tomada de decisão visto que o saneamento é um serviço essencial e fundamental para o desenvolvimento da região, além de evitar problemas à saúde pública.

O processo de tomada de decisões pode ser estruturado em três etapas, de acordo com (Maccali, 2015) às etapas são: a identificação, desenvolvimento e seleção, ou seja ocorre a localização do problema e as oportunidades, com o diagnóstico da situação, a segunda etapa consiste em encontrar soluções para elaborar uma estratégia ideal, a última etapa ocorre o processo de avaliação das alternativas, além de avaliar as consequências de cada uma delas e a autorização para execução da estratégia selecionada

O advento da indústria 4.0, trouxe muitos avanços tecnológicos, pois nele foi exigido mudanças socioeconômicas e o alto padrão de competitividade que tem impactado o gerenciamento das organizações. No setor de saneamento básico a indústria 4.0 tem a função de trazer mais eficiência operacional dos sistemas de água e esgoto reduzindo custos e desperdício, além da manutenção preventiva com a identificação dos problemas de forma precoce, tendo um controle na qualidade da água, ademais a isso com o benefício da sustentabilidade com uma gestão mais eficiente de seus recursos e uma tomada de decisão informada com o acesso de dados em tempo real.

Os gestores de instituições precisam cada vez mais tomar decisões de forma mais rápida e eficaz, para isso é necessário o uso de ferramentas que os auxiliem na resolução das problemáticas (Ramos; Rezende, 2004). As informações obtidas através do banco de dados têm um papel fundamental no processo de tomada de decisões (Souza; Borges, 1999) citam que, se dispor de informações correntes e atualizadas, capazes de reduzir incertezas, auxiliam na tomada de decisão. A tomada de decisão voltada para o setor de saneamento básico é importante, pois visa obter um melhor resultado em um menor tempo e com baixo custo.

Business Intelligence (BI) de acordo com (Quinto, 2020) significa inteligência de negócios ou perceptibilidade empresarial, corresponde ao andamento de coleta, arrumação, análise e compartilhamento de informações. Logo a mesma pode ser a base para um gestor dar o seu parecer acerca de um problema, desenhar metas, delimitar estratégias ou alguma outra ação que envolva uma organização.

O *Business Intelligence (BI)* é uma ferramenta alimentada com as informações de um sistema empresarial e, conseqüentemente, são organizadas e disponibilizadas de acordo com a necessidade de cada gestor, para auxiliar em suas tomadas de decisões (Silva; Santos; Santos, 2021). No contexto atual, o acesso a dados precisos é um ativo muito importante para o processo decisório, as organizações estão fazendo uso de diversas ferramentas para analisar informações e com base em dados obtidos auxiliar no processo de tomada de decisões segundo (Silva; Terra, 2015).

A aplicação do *Business Intelligence* em órgãos públicos além da função de auxiliar no processo de tomadas de decisões, pode servir de base para a estruturação de um planejamento estratégico, além de ser importante para a transparência, visto que uma administração transparente é fundamental e à regido pela Constituição Federal, no âmbito de companhias é importante para fazer acompanhamento de indicadores.

Os profissionais do saneamento têm a necessidade de ter informações que possam auxiliá-los no processo de tomada de decisão, sempre tendo a perspectiva de desenvolver o setor, que carece de maior maturidade na sua gestão (Ruas, 2015). A aplicação de ferramentas para a análise de dados referentes ao saneamento pode ajudar na aceleração do setor, por consequência contribui para o desenvolvimento do Estado.

Neste sentido, o presente trabalho tem como finalidade de analisar a importância da ferramenta Power BI na tomada de decisões da Superintendência Norte da Companhia de Saneamento do Maranhão (CAEMA), tendo em vista a necessidade da tomada de decisões, para tal é necessário ter dados precisos sobre os sistemas, partindo dessa necessidade de melhorias nos serviços e regularidade na prestação das atividades, empregou-se a ferramenta Power BI para análise e apontamentos de problemáticas no sistema.

Material e Métodos

A metodologia utilizada neste trabalho fora realizada pesquisas quantitativa e qualitativa com a elaboração de questionário via Google Forms e análise de dados referentes a Superintendência Norte. Para a implementação da ferramenta de Power BI na OCN, inicialmente foi necessário a contratação de pessoas com conhecimento da ferramenta, para a mesma foram selecionados dois estagiários, onde os mesmos seriam responsáveis pelo tratamento dos dados, a aquisição de um computador, aquisição de uma licença do Power BI 2.12.



Figura 1: Mapa das cidades atendidas pela Superintendência Norte.

Os dados coletados na área de gestão de pessoas, gestão financeira, gestão operacional incluindo produção por sistema, serviços executados, etc., são fornecidos pelos gerentes mensalmente para a superintendência por meio de planilhas, compilados e apresentados em reuniões mensais com os gerentes, coordenadores e outros convidados.

Visando buscar alternativas para melhorias contínuas nos serviços de saneamento, a Superintendência Norte adotou algumas metas estabelecidas nas ODS. Nessa vertente as metas que foram determinadas pela ONU devem ser alcançadas para a universalização de serviços essenciais básicos, juntamente com o Novo Marco do Saneamento, visando a universalização dos serviços de saneamento para desenvolvimento sustentável, tendo como objetivo a elevação do índice de cobertura do abastecimento de água e esgotamento sanitário.

A fim de analisar os impactos nos setores foi elaborado um questionário no Google *Forms* com as seguintes perguntas:

- Você já teve conhecimento ou contato com o Power BI antes das apresentações?
- Você acredita que a ferramenta ajudou na tomada de decisões?
- Você consegue analisar de forma clara e objetiva os dados?
- Quais as mudanças na sua rotina o uso da ferramenta pode proporcionar?
- A aplicação da ferramenta correspondeu às suas expectativas?
- Você conseguiu identificar de forma clara os gargalos do seu setor?

A fim de analisar os feedbacks das apresentações acerca das informações obtidas durante o último semestre, foi conduzida uma pesquisa por meio do Google *Forms*, foi disponibilizado para as gerências que compõem a Superintendência Norte, Gerência de Produção de Água do Sistema Italuís (OCNI), Gerência de Produção de Água do Sistema Metropolitano (OCNA), Gerência de Operação de Estação Elevatória de Esgoto da Região Metropolitana (OCNE), Gerência de Planejamento Gestão e Manutenção Metropolitana (OCNM), Gerência de Operação do Sistema Distribuidor Metropolitano (OCND), Gerência de Operação do Sistema Coletor Metropolitano (OCNC), Gerência de Serviços e Negócios de Pinheiro (OCNP) e Gerência de Serviços e Negócios de Barreirinhas (OCNB), os participantes responderam seu ponto de vista sobre as reuniões e os dados apresentados.

Resultados e Discussão

A fim de avaliar os impactos das apresentações nos setores da superintendência norte. A primeira pergunta foi “Você já teve conhecimento ou contato com o Power BI antes das apresentações?”



Você já teve conhecimento ou contato com o Power BI antes das apresentações?

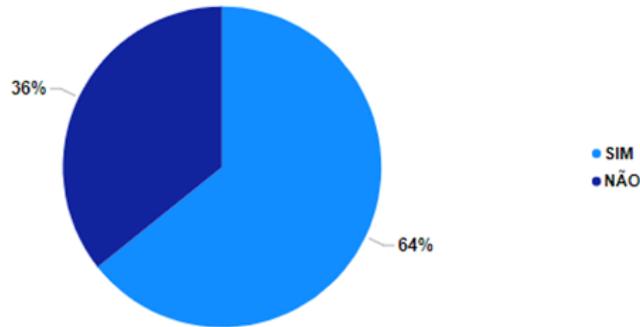


Figura 2: Porcentagens de resposta da primeira pergunta.

A maioria dos funcionários afirmou que já teve contato ou conhecia a ferramenta, o que representa 64% dos entrevistados.

A segunda pergunta foi “Você acredita que a ferramenta ajudou na tomada de decisões?”, todos os entrevistados responderam que “SIM”, tal fato pode ser explicado pela apresentação dos pontos fortes por gerência, pontos a melhorar e melhorias já alcançadas.

Na terceira pergunta foi “Você consegue analisar de forma clara e objetiva os dados?”

Você consegue analisar de forma clara e objetiva os dados?

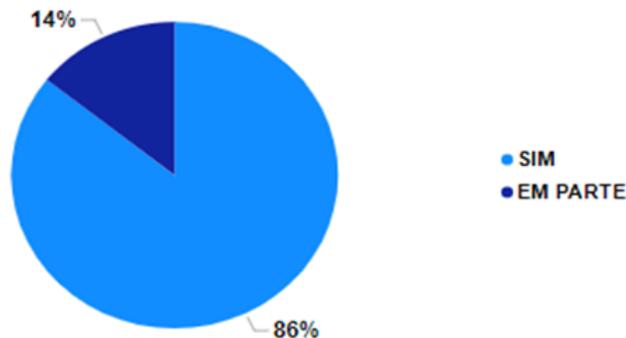


Figura 3- Porcentagens de resposta da terceira pergunta.

De acordo com a pesquisa, foi observado que os setores conseguiram observar de forma clara os gargalos, com uma representação de cerca de 86% dos entrevistados e 14% em parte.

A quarta pergunta foi “Quais as mudanças na sua rotina o uso da ferramenta pode proporcionar?”. A maior parte dos entrevistados citou a organização das informações de forma mais coesa e ágil com o aproveitamento de dados e seus relacionamentos para facilitar informações do caminhar das ações desenvolvidas e tomadas, tais respostas mostram a importância de se ter dados precisos e de fácil organização.

A quinta pergunta foi “A aplicação da ferramenta correspondeu às suas expectativas?”. Todos os entrevistados responderam “SIM” e opinaram sobre possíveis dados a serem abordados no ano de 2024, citando a realização de treinamentos, a utilização da ferramenta em outros setores da companhia e mostrar fotos e vídeos das atividades, mostrando o interesse pelas apresentações.

A sexta pergunta foi “Você conseguiu identificar de forma clara os gargalos do seu setor?”, 65% responderam 5 o grau mais alto, 26% responderam 4 e 10% responderam 3. Os resultados são satisfatórios e mostram que a maior parte dos setores conseguiram identificar seus problemas e buscaram alternativas para solucionar tais problemas.



Você conseguiu identificar de forma clara os gargalos do seu setor? (1 Para Pouco e 5 Para Muito)

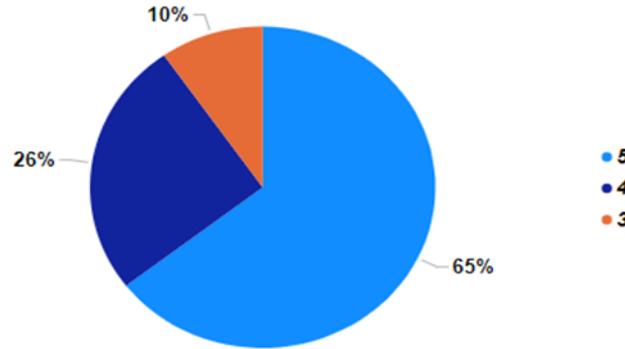


Figura 4- Porcentagens de resposta da terceira pergunta.

Foi deixado um espaço para sugestões e comentários, as respostas mais comuns são agilidade na tomada de decisões, maior transparência, controle de dados, organização, visão da superintendência como todo, maior interatividade. Tais respostas são indicadores que a implementação do Power BI foi bem-sucedida e foi aceita pelos setores. Os dados obtidos pela pesquisa via *Forms* mostram que os setores necessitam de informações e análises precisas.

O autor (Ruas, 2015) em seu trabalho destacou a importância dos envolvidos em serviços de saneamento terem dados e análises precisas, a OCN conseguiu implementar análises precisas e foram bem aceitas pelos gestores e funcionários, essa medida trouxe melhorias nos serviços prestados otimizando a redução de custos e reafirma o compromisso com os 17 ODS.

A partir da análise foi criado um panorama do sistema de abastecimento de água da cidade de São Luís, sendo possível estimar o volume produzido médio mensal no ano de 2023 para abastecer a cidade de São Luís foi 10.663.231,63 m³, distribuído de acordo com a Figura (5).

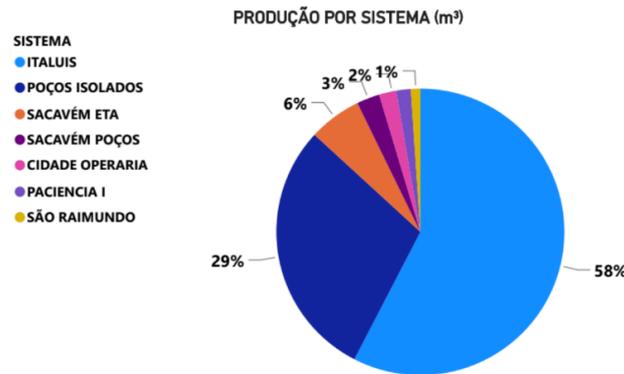


Figura 5 - Produção de água por sistema.

O sistema de abastecimento da cidade de São Luís é composto por 7 sistemas produtores de água, sendo que dois destes são de captação superficial e cinco de captação subterrânea, fazendo o diagnóstico da produção do primeiro trimestre de 2023 com o primeiro trimestre de 2024, identificou-se que os Sistemas Italuís, Eta Sacavém e Paciência I aumentaram sua produção em paralelo os Sistemas Poços Isolados, Sacavém Poços, Cidade Operária e São Raimundo reduziram sua produção conforme a Figura (6).

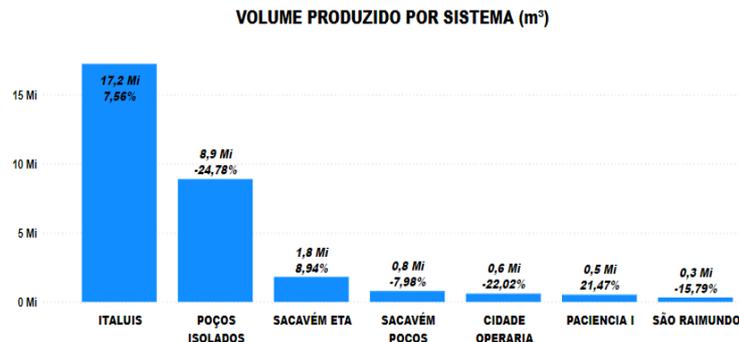


Figura 6 - Produção por Sistema de Abastecimento.



Analisando os dados referentes ao Sistema Italuís encontrou-se a razão média entre produto químicos e volume de água tratada da seguinte forma, 1 Kg de cloro pode tratar 256 m³ de água, 1 Kg de cal pode tratar 157 m³ e 1 Kg de Polissal pode tratar 28 m³, tais relações ajudam no controle de estoque e na redução dos desperdícios, por consequência custos. No sistema Sacavém a relação encontrada foi de 1 Kg de cloro para tratar 664 m³ e 1 Kg de Polissal para tratar 318 m³. A diferença obtida entre as razões do cloro e do Polissal dos sistemas é causada por aspectos físico-químicos da água bruta de cada sistema.

A partir dos dados de produção do sistema Italuís observou-se que o consumo médio do sistema Italuís é de 105.823,5m³ no primeiro trimestre de 2024, nesses dados houve a investigação quanto o consumo o que levou a uma redução de aproximadamente 66,87% no consumo da ETA em lavagem de filtros, uma diminuição de cerca de 7,71% na descarga de fundo do decantador. Essa melhoria foi possível graças às análises feitas no Power BI, que detectaram causas que contribuíram para alto consumo para manutenção. A partir dessas análises, debates e investigações foram realizados com todos os membros da equipe para resolver essa problemática. A Figura (7) mostra a distribuição do consumo do Italuís.

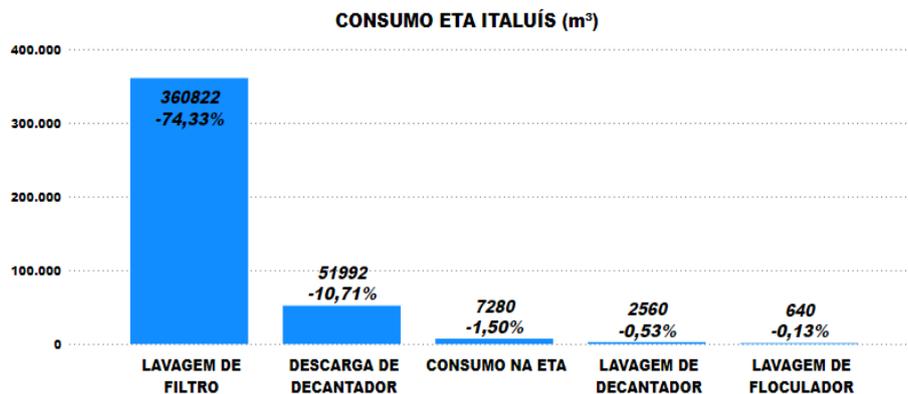


Figura 7 - Consumo de água no sistema Italuís.

Considerando-se as informações apontadas em relação a perda no sistema de produção do Italuís, foram encontradas no primeiro trimestre de 2023 uma perda média mensal de 262.569,27 m³, já no primeiro trimestre de 2024 a perda média mensal foi de 36.695,02 m³, uma redução de aproximadamente 14% de perda.

De acordo com o Marco do Saneamento de 2020 que visa assegurar o cumprimento dos critérios de universalização do saneamento básico, O Art. 7º parágrafo VIII - redução e controle das perdas de água, inclusive na distribuição de água tratada, estímulo à racionalização de seu consumo pelos usuários e fomento à eficiência energética, ao reuso de efluentes sanitários e ao aproveitamento de águas de chuva, por conseguinte podemos observar que a utilização do recurso Power Bi pode auxiliar na redução e controle de perda e como resultado também uma melhor eficiência energética sem o desperdício de recurso que consta no Novo Marco do Saneamento de 2020.

Considerações Finais

A implementação do Power BI na OCN para auxiliar na tomada de decisões está em conformidade com os 17 ODS e com o Novo Marco do Saneamento de 2020. Com as análises realizadas a partir de dados gerados e compilados na ferramenta foi possível identificar problemas e solucioná-los em tempo hábil. É nítido os avanços que se obteve com a utilização das informações obtidas através da análise, tendo como objetivo a resolução das problemáticas.

Observa-se que houve impactos positivos como a redução de perdas no principal sistema de abastecimento, por consequência se reduziu custos no tratamento de água. O volume que seria descartado foi destinado ao consumo da população, a redução de perdas tem impactos positivos no meio ambiente, no abastecimento de água, na gestão de finanças da companhia.

Os impactos positivos foram notados no sistema de abastecimento de água e no tratamento de esgoto, de modo geral a OCN otimizou sua eficiência a partir disso os funcionários entenderam a importância da ferramenta, comprovado através das respostas do *Forms*, indicando, inclusive a importância da ampliação do uso da ferramenta em outros setores da companhia e visa aumentar a eficiência da própria Companhia como um todo.

Nota-se que os impactos da aplicação do *Business Intelligence* atendem o Novo Marco do Saneamento, pois garante uma análise mais eficiente e eficaz de dados referentes aos serviços prestados pela companhia, onde se observa os seguintes princípios: a regularidade, continuidade, eficiência, segurança, generalidade, cortesia, modicidade tarifária, uso racional dos recursos hídricos e universalização do mesmo.

Tais apontamentos impactam positivamente os serviços de abastecimento de água, onde se conseguiu reduzir drasticamente as perdas no sistema produtor de água do Italuís, assim foi possível ter uma redução na utilização de produtos químicos sem afetar a qualidade da água tratada, logo uma economia financeira. Importante destacar que houve uma redução de 17% no custo dos produtos químicos no primeiro trimestre de 2024 comparado ao ano anterior.

Com o uso da ferramenta no âmbito da OCN, percebe-se uma melhoria da qualidade dos serviços de saneamento prestado à população, uma gestão mais participativa, compartilhada e transparente, e como consequência redução de custos com



a operação, aumento da receita e possivelmente, uma empresa projetada para o futuro. O trabalho desenvolvido conseguiu bons resultados e pode ser usado como projeto piloto para a aplicação em outros setores da CAEMA e até mesmo outros órgãos do governo do estado.

Referências Bibliográficas

- BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020 Novo Marco Legal do Saneamento Básico. Brasil, 2020. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/L14026.htm> Acesso em: 17 mai. 2024.
- CALIXTO, Giniglei Eudes; VELÁZQUES, Maria Dolores Pohmann, Sistema de Controle Interno na Administração Pública Federal apud FILHO, Antônio José. A importância do controle interno na administração pública. Diversa, 2008. Ano I –no 1. P. 85-99.
- GADELHA, Hugo Sarmento et al. O novo marco regulatório do saneamento básico e o direito ao acesso à água. Research, Society and Development, v. 10, n. 11, p. e569101118843-e569101118843, 2021.
- JUNIOR, E. M. V.; BENTES, L. V.; SANTOS, S. S.; DUTRA, M. T. D.; SOBRAL, M. C. M. A Incorporação da Esfera Municipal e da Qualidade de Água Para o Alcance do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6, Água e Saneamento. 2021. Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- LEITE, Carlos Henrique Pereira; MOITA, José Machado; BEZERRA, Ana Keuly Luz. Novo marco legal do saneamento básico: alterações e perspectivas. Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 27, n. 5, p. 1041-1047, 2022.
- MACCALI, N. Influências de valores pessoais de gestores estratégicos no processo decisório organizacional. 2015. 249 f. Tese (Doutorado em Administração) – Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2015.
- MADEIRA, Rodrigo Ferreira. O setor de saneamento básico no Brasil e as implicações do marco regulatório para universalização do acesso. 2010.
- MEIRELLES, Hely Lopes et al. Direito administrativo brasileiro. Revista dos Tribunais, 1966.
- NOZAKI, Victor Toyoji de. Análise do setor de saneamento básico no Brasil. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- ONU. Conheça os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. 2015. Disponível em: <https://estrategiaods.org.br/conheca-os-ods/>. Acesso em: 10 mar. 2024.
- QUINTO, Adeson Marcelino. **O uso da ferramenta Power BI para estruturação de dados e apoio a tomada de decisão de uma instituição de ensino do estado do Ceará.** 2020. Tese de Doutorado.
- RAMOS, Luiz Claudio Silveira; REZENDE, Denis Alcides. A aplicabilidade do business intelligence na gestão pública. XXIV Encontro Nac. de Eng. de, 2004.
- RUAS, Wilimar Junio. Ambiente e comportamento informacional em decisões do saneamento básico: um estudo de caso na companhia de saneamento de Minas Gerais Copasa. 2015.
- SILVA, David Rafael Ferreira da; SANTOS, Matheus Viana Dos; SANTOS, Walyson Martins dos. O uso de uma ferramenta de BI (business intelligence) aplicada ao processo de gerenciamento de risco em uma organização do setor público. 2021.
- SILVA, V. C. L.; TERRA, L. A. A. Business intelligence como fator decisiva na competitividade empresarial: uma análise a partir de multicase. Revista Inteligência Competitiva, v. 5, n. 1, p. 1-13, 2015.
- SOUZA, Terezinha de F. C. de; BORGES, Mônica E. N. Fontes de informação financeira no Brasil. Ciência da Informação, Brasília, v. 28, n. 1, jan./abr. 1999.



INVERSE PROBLEM SOLUTION FOR MICROPLASTIC EMISSION SOURCE AREA ESTIMATION IN MOHID: THE SEPETIBA BAY CASE STUDY

1Nikolas Gomes Silveira de Souza, 2Jader Lugon Jr., 3Alexandre Macedo Fernandes,
4Ramiro Joaquim De Jesus Neves, 5Antônio José da Silva Neto

1 Instituto Federal Fluminense, e-mail: nichsouz@msn.com; 2 Instituto Federal Fluminense, e-mail: jlugonjr@gmail.com;

3 Universidade do Estado do Rio de Janeiro, e-mail: alxmfr@gmail.com; 4 Instituto Superior Técnico de Lisboa -
Universidade de Lisboa, e-mail: ramiro.neves@tecnico.ulisboa.pt; 5 Instituto Politécnico,

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, e-mail: ajsneto@iprj.uerj.br

Keywords: MOHID, Inverse Problem, Contaminant

Abstract

Occasionally, contaminants are found on beaches (oil, plastic, etc.), and determining their origin can be complex. However, the adaptation of computational tools with the capability of mathematical modelling of the motion of lagrangian tracers can offer a practical and objective solution. In this study, it is presented a solution for the reverse motion of a contaminant problem, with focus on microplastic. For that matter, the computational platform MOHID was used to simulate the movement of lagrangian tracers along the estuary connecting Sepetiba and Ilha Grande in Rio de Janeiro/Brazil. Two methods for tracing the origin of the particle were used, *backtracking*, and a *mapping* method, both based on box and instantaneous emissions. The outputs were analysed and both methods yielded promising results, though additional criteria-based decision was found to be significantly relevant. In addition, it was observed the complex hydrodynamic ruling the particle motion, with significant longitude and latitude sensitivity for a microplastic search. The *mapping* method observed advantage to reduce the time dependence of the model, while *backtracking* showed faster results. At last, the time and detail of each model output showed important differences, reinforcing the necessity for a criteria-based decision over the use of the model. This work contributes as a support tool for microplastic mitigation and cleansing related activities and can be extrapolated to address other types of litter.

Introduction

Frequently, litter is found in beach regions across the world[1,2]. Locating the origin of this litter is essential to apply the legislation and, most importantly, mitigate the pollution. Litter, for this matter, can be considered any type of contaminant and may happen as liquid (e.g. oil) or solid (e.g. microplastic), for example[3–5]. The use of computational models has been effectively used around the world to trace the forward motion of many types of particles[5,6]. The translation of environmental physics into computational language has been used to anticipate risks and recreate scenarios.

A strategy to move backwards in the models is the *backtracking*. This strategy typically reverses the signal of the thorough displacement vector and adapts the timestep to move backwards[6–8]. Its use is widely acceptable by publications[7,9]. It is of relevant use as it does not lose the considered phenomena of the forward model, though weathering and dissolution processes can be limited[7,8,10]. One limitation is that it ignites from the area where litter was supposedly found, and litter can be displaced by many phenomena not anticipated in the model[3,8].

Lagrangian tracers are useful for several areas of science to simulate local processes with significant gradients. The movement of these tracers is influenced by the phenomena of hydrodynamic (water velocity), the atmosphere (wind velocity), the natural spreading characteristics (e.g. dispersion), and finally the random process (random walk)[11].

Iterative seeding is also highlighted as a potential solution in publications[7,12,13]. The iterative seeding is an optimization algorithm that finds the best-fitting inputs of an inverse problem.

An inverse problem is a type of solution where you are given the output of a system and need to determine the input that produced the outputs. With attention to the challenges of non-uniqueness and ill-posedness. The first indicates that there may be multiple possible inputs that can result in the same output, while the second shows potential sensitivity to small changes in the data. These situations happen in the environment and criteria must be used for the decision.

Finally, potential candidate pair of coordinates are imposed as lagrangian emission parameters. The rationale is that one predicted parameter will provide the source likelihood[14]. This is a simple, though computationally expensive method to be processed, however, publications are actively discussing about this solution[5,8,10,15].

The objective of this work is to explore solutions provided by *backtracking* and *mapping strategy* in the MOHID (MOdelagem HIDrodinâmica) platform [11]. This platform is an ANSI FORTRAN-95 algorithm that allows the user to simulate particle motion over pre-computed hydrodynamic basis with several publications and validations. In addition to the *backtracking* code implemented in MOHID, an additional study will be performed producing a space-time mapping of simulated solutions evaluating the statistical distribution. By estimating a hypothetical region where the pollutant was found, the use of backtracking method and a space-time mapping of the simulation was carried out. This work aims to answer the following questions: (a) Are the methods similar in efficiency? (b) are they fast?, (c) what are their limitations?

This study aims to contribute by addressing the gap in source location search of litter, especially for microplastic particles which poses a potential threat to modern society.



Hydrodynamic in MOHID

The MOHID Water platform uses primitive equations in a three-dimension Cartesian coordinates for flows which are incompressible, thus assuming the hydrostatic equilibrium and the Boussinesq approximation[11,16]. The ruling equations Eq. (1, 2, and 3), represent mass conservation, momentum conservation and gradient operator are core part of the MOHID platform[16].

$$\frac{\partial}{\partial t} (\int dV) = \oint \vec{F}_{water} \cdot d\vec{n} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\int \vec{v} dV) = \oint \vec{v} (\vec{v} + v\nabla v) \cdot d\vec{n} - \nabla \eta \int dV - \frac{1}{\rho} (\eta + z) (\nabla \cdot (\eta \int \rho dz)) \cdot \int dV \quad (2)$$

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right) \quad (3)$$

where V is the water volume, \vec{F}_{water} is the water flux vector, n is the free surface elevation, v is the velocity vector, z is the water depth, (x, y) are the dimensions.

Computation points are distributed according to the Arakawa C scheme, a widely adopted method in numerical weather prediction and ocean modelling[11]. Time discretization is achieved through the Alternating Direction Implicit (ADI) method, enhancing stability and efficiency in the simulation process[11,16].

Spatial discretization for baroclinic pressure adheres to a Cartesian referential (or z-level referential), ensuring accurate representation of pressure variations across different depths[16]. The horizontal advection of momentum employs a hybrid method, combining upwind and central differences[11,16]. Similarly, the vertical advection and diffusion of momentum utilize hybrid schemes, ensuring accuracy in capturing complex flow patterns[4,5,11]. The diffusion of momentum is computed using central differences, contributing to the overall precision of hydrodynamic simulations within the MOHID system[16].

Lagrangian in MOHID

In environmental computational modelling, the use of Lagrangian tracers is an important strategy to understand the motion of particles or water volumes over ocean complexities[17–19]. The concept based on the Lagrangian method of description retrieves velocity $u_p = \frac{dx}{dt}$ and $v_p = \frac{dy}{dt}$ and position (x, y, z) determined by the time[11]. The individual particles are subject to the forces of the water layer, each one at its each (initial) position during a timestep[16]. In MOHID Water platform, the Lagrangian code is dependent on hydrodynamic outputs.

The primary source of velocity information is obtained from the associated Eulerian model from hydrodynamic output - horizontal (u, v) and vertical (w) velocities[11]. These velocities are the background flow in which the lagrangian particles shall move. The model uncertainties (such as unexpectable environmental phenomena) are calculated by the random walk process[16,20]. In MOHID, a Sullivan and Allen approach is used, whereas the variance and mixing length are decisive for the average velocity provided the turbulence model adopted in the platform as provided by Spagnol et al.(2002) [11,21].

The vertical movement is provided as a constant turbulence or parametrisation based on the shear velocity from the Eulerian model[20]. The displacement in MOHID is calculated in sequence and is added to the other velocity components (e.g. wind, current, stokes drift) to determine the next step of the particle[11].

MODEL SETUP

A simple hydrodynamic model was designed to be the background of the lagrangian model. The hydrodynamic model was implemented as a tidal simulation in shallow waters. For a comprehensive representation of tidal effects, the FES 2014 (Finite Element Solution) was used to capture tidal elevations and currents at the boundaries[22]. Implicit calculations in MOHID Water were carried out to provide the internal dynamics driven by the tide-generating forces using the method provided by Kantha and Clayson[23]. The Coriolis acceleration force was calculated using the Eq (4):

$$Coriolis_Aceleration = F_{uv} * VU_{Average} \quad (4)$$

where F_{uv} is the interpolation of Coriolis frequency and $VU_{Average}$ is the average velocity component.

The study site was Sepetiba and Angra dos Reis Bay in Rio de Janeiro/Brazil region. Six discharges were considered using COPPE/UFRJ research group measurements for the period of summer. A bidimensional regular grid with approximately 300 metres was created. The bathymetry was interpolated from the data available at GEBCO[24]. To simplify the simulation and reduce computational cost, the interpolation of bathymetry happened to a 800-metre grid and the output was re-interpolated into the 300 metre-grid. The atmosphere forces were implemented using the 0.25° Global Forecasting System (GFS) resolution from NCEP Central Operations database[25].

The forward solution started with 100 particles being emitted from a box at the central canal between Sepetiba bay and Ilha Grande bay (Fig. 1). Providing 100 particles was useful to reduce bias in the result and amplify the source area likelihood.



Hence, the last output of the forward solution should provide the locations where particles would deposit or float. The reconstruction of the problem (*backtracking*) provides that the last position of the particles is known, the period of travelling is known, but the origin is not known. The backtracking method is then used in the region of observance of the particles to identify their origin.

The backtracking simulation used the same parameters as the forward simulation, except for the emission cell parameter, that should account the known location for particles last timestep pair of coordinates. The backtracking is an implied operation in the MOHID Water platform. It allows the user to identify possible source for a fate. The backtracking process in MOHID follows a standard of the modification of the forward equations, tailored to the reverse particle motion, and reconstruct their past trajectories while accounting the physical processes. It can be found in the MOHID Water platform codes for backtracking in the Lagrangian Module and Hydrodynamic accessible on the website path for the modular Fortran code file: <https://github.com/Mohid-Water-Modelling-System/Mohid/blob/master/Software/MOHIDWater/ModuleLagrangianGlobal.F90> and <https://github.com/Mohid-Water-Modelling-System/Mohid/blob/master/Software/MOHIDWater/ModuleHydrodynamic.F90> as can be seen in the following simplified codes:

```

if (BackTracking) then
    UWind = - UWind
    VWind = - Vwind
endif
    
```

Provided a hypothetical emission occurring at a region of the bay (Fig. 1), particles would travel for 90 days and reach the target to be backtracked. A box was developed for both forward and inverse problem solution to account the emission area and the target area. The inverse problem solution box is created based on preliminary experimentations in forward simulations, that accounted a group of particles beaching on the shoreline of the top edge of the polygon. For that matter, it is possible to conclude that some particles from the emission box will reach the target box window.

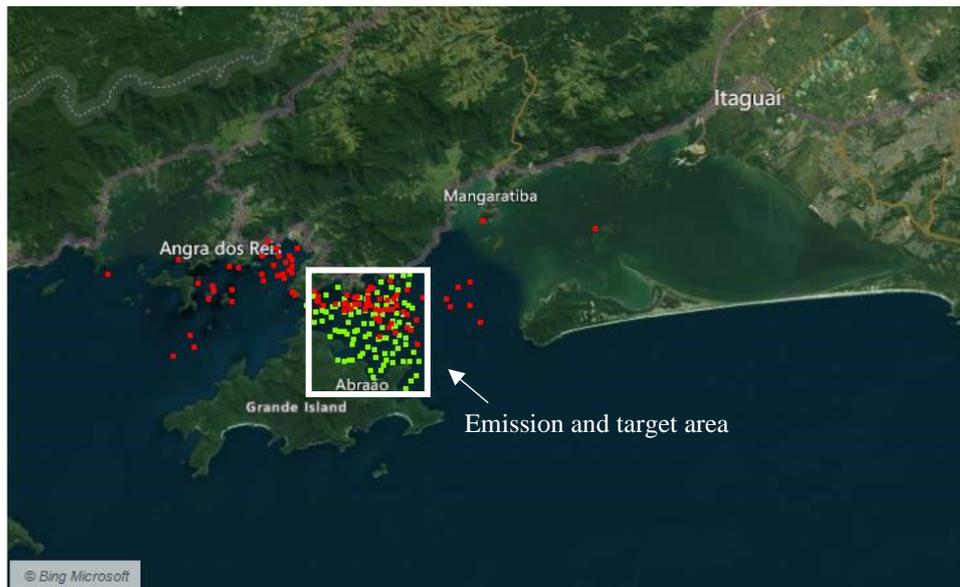


Figure 1: Representation of emissions and targets. In white is the emission and target area, with red dots denoting the final timeframe of the forward problem, and green dots indicating the initial timeframe of the forward problem and the final timeframe of the backward problem.

SPACE-TIME MAPPING DESIGN

As the forward solution is widely validated and accepted in publications[3,16,26], it is reasonable that searching the reverse problem in a series of forward emissions would reach reliable results[5,7,14]. For this work, a number of 19,750 particles was seeded (Fig. 2). The forward problem was designed to be the hydrodynamic and lagrangian model themselves. The goal was to find the parameters (pair of coordinates) that approximates the source.

In this design, the parametrisation was performed by considering that hydrodynamic is appropriate and no motion reversion was provided as backtracking, the positions and velocities retrieved by the lagrangian module will act as a proxy for the model parameters. Individual particles seeded in the whole domain are moved due to the hydrodynamic model, exploring the solution space. Threshold was considered within the limits of Fig. 1 box representation.

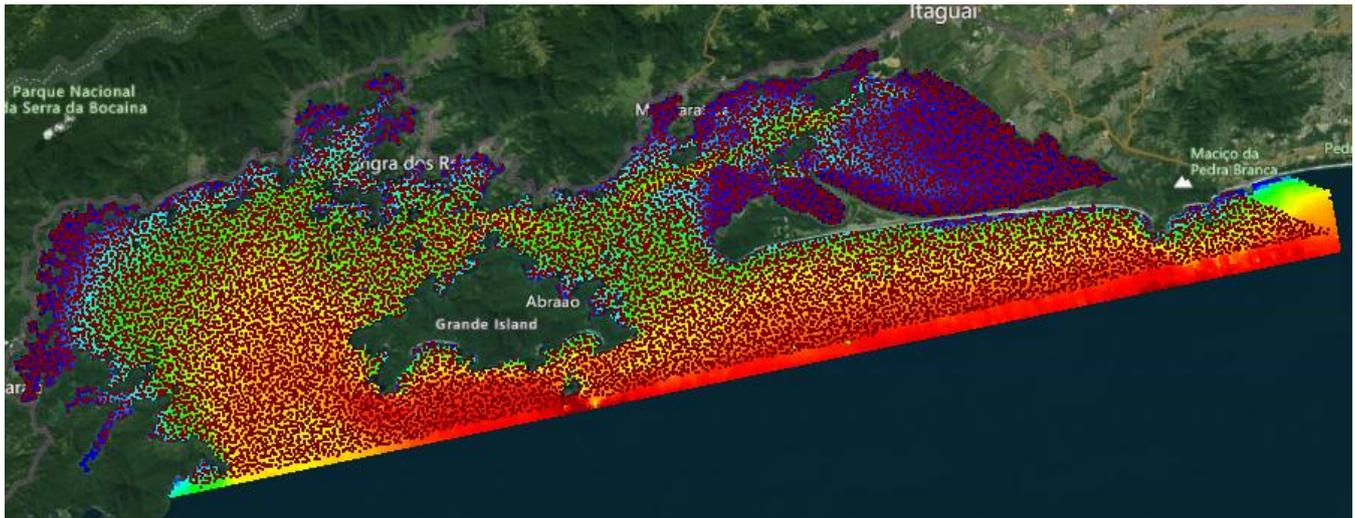


Figure 2: Emission region with 19750 lagrangian tracers seeded at initial conditions overlaying the bathymetric layer background.

Results and Discussion

In regard to time, the backtracking resource duration was two hours and mapping, five. It lasted reasonably the same time as the forward simulation. The first timeframe of the model estimates that the particles must have originated from the sources in green (Fig 3A) while the last timeframe reunites the particle as defined by the model construction (Fig 3B).

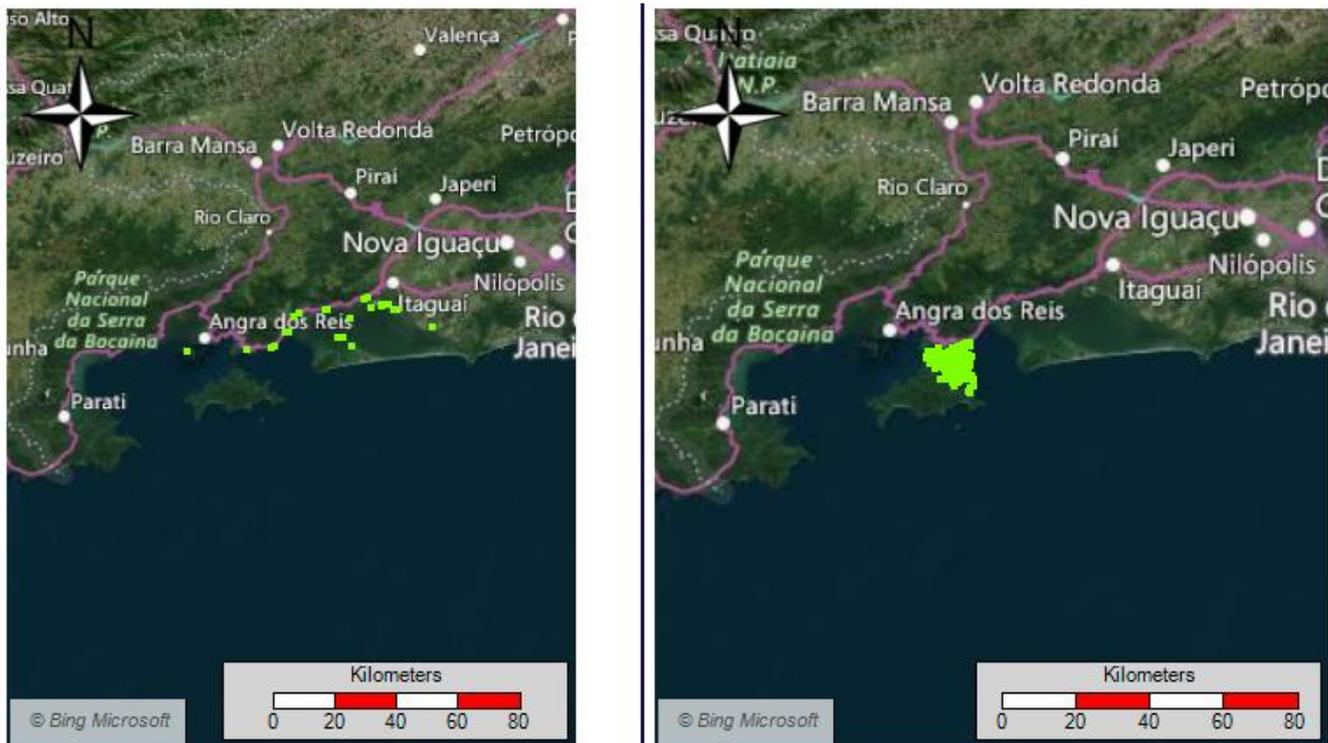


Figure 3: (A) Backtracking solution: possible regions of source and (B) backtracking particles appearance and actual forward emission.

The backtracking system provides a fast and reasonable solution, however, minor imprecisions in model design may lead into significant imprecision[7].

The space-time mapping strategy was designed to cover the entire region of study and simulate an iterative seeding output of several pair of coordinates at once[12,14], with limitations to a reasonable emission area.

A number of 8992 tracers were still present in the domain at the last timeframe (Fig 4A). From which 2090 were found within the polygon (Fig. 4B). Particles in the MOHID Water can be traced by a numerical identification that is attributed to tracers during the entire simulation, regardless its eventual boundary surpassing or beaching. Thus, identifying the tracers allow the operator to move back to the first timeframe and obtain the tracer’s original coordinates.

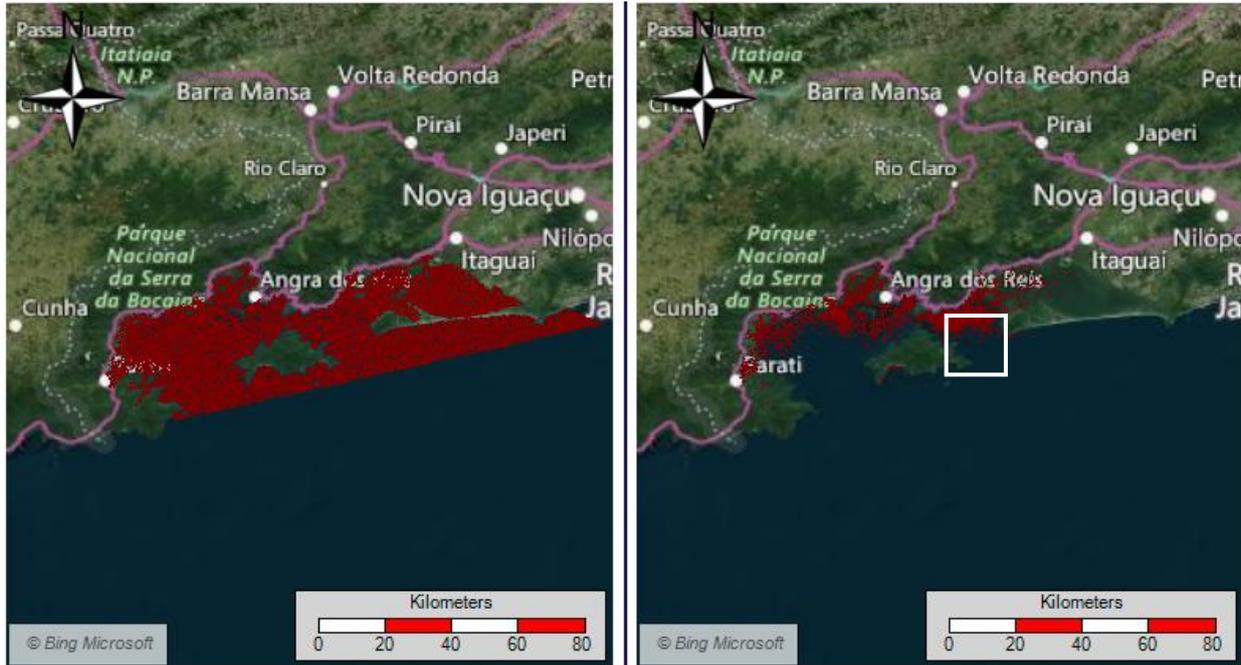


Figure 4: (A) Initial conditions (B) Last timeframe of emissions and region of synthetic emission.

In Fig. 5 the initial timestep is reconstructed exclusively with the particles that reaches the target in Fig. 4B in the initial condition. The particles were counted in each polygon as seen in Table 1.

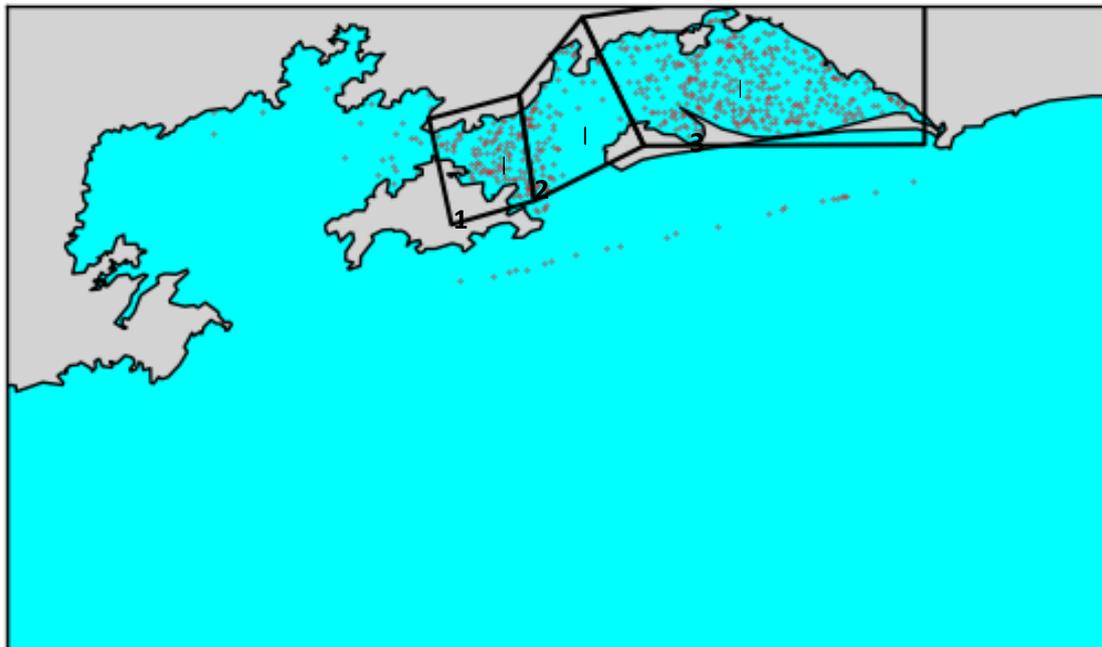


Figure 5: Representation of the initial timestep with particles that reach the target area. P1 = polygon 1, P2 = polygon 2 and P3 = polygon 3.

Table 1: Number of particles emitted from the polygons 1, 2, and 3 in the initial timestep that enter the search area of the last timestep of the direct problem

<i>Polygon ID:</i>	<i>Particle Counts</i>
<i>Polygon 1</i>	106
<i>Polygon 2</i>	76
<i>Polygon 3</i>	357
<i>Outer area</i>	52



Both predictors were effective as they reached the hypothetical source within their probable solutions. Nevertheless, as the simulation time increases, there might be observed significant numerical dispersion in the process. It should be highlighted that finding the likely source of an emission is too complex for a deterministic solution[27]. The backtracking model in the MOHID platform was primarily prepared to work with oil, in which advection and diffusive processes are calculatable, though weathering processes of the lagrangian tracers are not reversible[11]. For items such as microplastic, the non-weathering feature does not present an actual limitation[2,17,18], as it is observed that microplastic particles take a significant time to weather and a group of plastic composition is based on buoyant plastic[1,2,28]. This is of special importance to consider this method as a feasible operation.

For immediate needs, the authors acknowledge that the backtracking solution is an effective solution. The reason for this consideration takes into account time, computational cost, and complexity. A simple coverage of the target area would provide possible sources. This reduces the initial search area and potentially reduces the complexity of identifying the pollutant likely source, which is an interest for inverse problems[27].

The mapping strategy, however, provides a more detailed way to locate the origin and a promising solution using heuristics. For both cases, the proper calibration of the hydrodynamic is thus essential as lagrangian tracers will move along the water and atmospheric influence.

Another important remark is that the mapping strategy does not bypasses risk of sensitivity, as well as backtracking. This explains the reason why mapping (Fig. 3 and Fig. 5) could not provide one only source region.

The mapping strategy is an inverse problem method, in which several inputs – coordinates - are proposed to obtain the best output - the one that best matches the observation[13,27]. Strategies to decide the best match include a cost function concept. This concept aims to quantify how well the particle-based model matches the observations, followed by the optimisation process. In this context, the number of particles within the target box due hydrodynamic model can be considered product of iterative seeding that seeks to minimise the cost function. A heuristic approach of moving particles to areas where they better match observations is the output of optimisation. However, other techniques are used in publications such as general annealing simulations or genetic algorithms[12,29]. The key to this study was to seed multiple particles at once and optimising them simultaneously in windows rather than sorted seeding[12–14].

Other methods can be used in order to evaluate the inverse problem solution, such as Euclidean distance (Eq. 5) used in platforms such as GRIPP[12–14]. The implementation simplicity and readily differentiability are highlights while sensitiveness to outliers due to hydrodynamic complexity can be a limitation.

$$Cost = \sum || observed_position(t) - particle_position(t) ||^2 \quad (5)$$

In Fig. 6 the differences along the longitude and latitude modification are explored, indicating potential sensitivity between neighbour grid cells. To provide this simulation, eight tracers were seeded in the model in two groups: (i) keeping the longitude and modifying the latitude and (ii) keeping the latitude and modifying the longitude. Their distance is respecting approximately 300 metres (0.003°) distant.

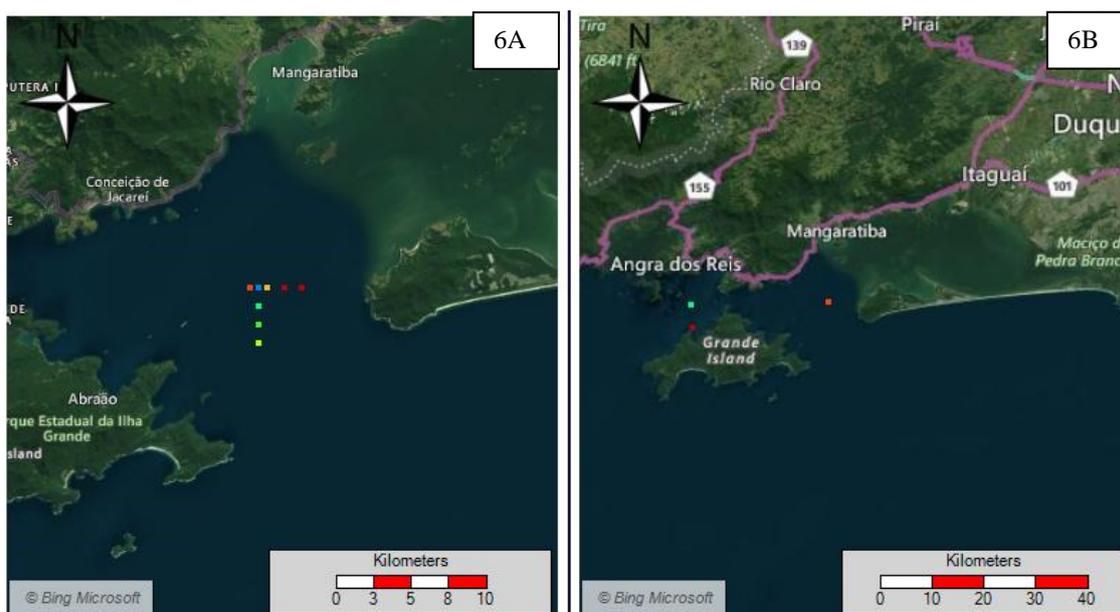


Figure 6: (A) Source of sensitivity analysis (B) Last timeframe of sensitivity analysis.

Although the mapping strategy (Fig 5) offered more detailed results when compared to backtracking (Fig 1), the particles



in the East were more numerous compared to the actual emission site. This complexity can be explained by the hydrodynamic and atmosphere interplay added to the stochasticity, as represented in Fig. 6.

As previously discussed, this mapping strategy considers that the emission area is not known, thus a large hypothetical area (the entire domain) was considered a likely solution for emission. Determining searching criteria or reducing the target window will be effective to reduce the area of search.

Another problematic that is common is the duration of the simulation[2,30,31]. It is not possible to anticipate the duration of the event on the water surface. In backtracking, this data is crucial to obtain outputs, while in the mapping strategy the result may be interpreted as a solution in a partial time. Provided that the event actually started on December 20th, for example, but particles only entered the domain on January 1st, this strategy would be effective to find the partial trajectory with high efficiency (as seen in Fig 5 – the lower edge particles), while backtracking is limited in this operation. Applying these methods to real-world microplastic pollution scenarios is crucial to validate their effectiveness and identify practical challenges.

Conclusion

The conclusion of this work reinforces that there is no global solution. The methods provided results which contained the approximated solution of the hypothetical problem. However, additional search criteria were observed as crucial to offer better solution in both cases.

The efficiency could be confirmed in both cases, though mapping might request additional criteria to provide more accuracy. The backtracking suggested several probable places of search, though the search area was not computed, instead, punctual locations. On the other hand, the mapping showed a detailed area of emission. The backtracking model showed a higher velocity of output than the mapping, which is expected since a simplified solution is being performed. The decision of the dates for the simulation is a challenge in modelling the inverse problem and the mapping strategy may be of important solution to address this gap.

This study did not provide any additional criteria for the mapping strategy or backtracking as it understands that each area of study is of particular property and criteria. The establishment of criteria can be effective to locate origin of persistent tracers such as microplastic, oil slick, and other contaminants.

Revealing the contaminants source may provide a significant contribution to the society. More studies on strategies and criteria should be developed to ensure contamination mitigation and cleanse capabilities.

Acknowledge

The authors acknowledge the financial support provided by FAPERJ-Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, CNPQ-Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico and CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Finance Code 001 and program CAPES/FCT, Process Number 88881.467784/2019-01.

References

- [1] Galgani F, Brien AS, Weis J, Ioakeimidis C, Schuyler Q, Makarenko I, et al. Are litter, plastic and microplastic quantities increasing in the ocean? *Microplastics and Nanoplastics* 2021;1:2. <https://doi.org/10.1186/s43591-020-00002-8>.
- [2] Tang L, Feng J-C, Li C, Liang J, Zhang S, Yang Z. Global occurrence, drivers, and environmental risks of microplastics in marine environments. *Journal of Environmental Management* 2023;329:116961. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116961>.
- [3] Lugon Jr J, Kalas F de A, Rodrigues PPGW, Jevaux JL, Neto HG, Juliano MM, et al. Lagrangian Trajectory Simulation of Floating Objects in the State of São Paulo Coastal Region. *DDF* 2019;396:42–9. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.396.42>.
- [4] Souza NGS de, Lugon Junior J, Yamasaki E, Kyriakides I, da Silva Neto AJ. Parameter sensitivity study and water property influence: An evaluation of the determining factors on oil drifting effect. *Revista Cereus* 2021;13:1595–604. <https://doi.org/10.18605/2175-7275/cereus.v13n1p186-198>.
- [5] Souza NGS de, Lugon Jr. J, Yamasaki EN, Kyriakides I, Neto AJS. An assessment of relative potential impacts to Cyprus' shoreline due to oil spills in the Eastern Mediterranean Sea. *RGCI* 2023;23:29–42. <https://doi.org/10.5894/rgci-n499>.
- [6] Dagestad K-F, Röhrs J, Breivik Ø, Ådlandsvik B. OpenDrift v1.0: a generic framework for trajectory modelling. *Geoscientific Model Development* 2018;11:1405–20. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1405-2018>.
- [7] Breivik Ø, Bekkvik TC, Wettre C, Ommundsen A. BAKTRAK: backtracking drifting objects using an iterative algorithm with a forward trajectory model. *Ocean Dynamics* 2012;62:239–52. <https://doi.org/10.1007/s10236-011-0496-2>.



- [8] Suneel V, Ciappa A, Vethamony P. Backtrack modeling to locate the origin of tar balls depositing along the west coast of India. *Science of The Total Environment* 2016;569–570:31–9. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.101>.
- [9] Abascal AJ, Castanedo S, Fernandez V, Ferrer MI, Medina R. Oil spill trajectory forecasting and backtracking using surface currents from high-frequency (HF) radar technology. *OCEANS 2011 IEEE - Spain, IEEE*; 2011, p. 1–8. <https://doi.org/10.1109/Oceans-Spain.2011.6003575>.
- [10] Lammoglia T, Souza Filho CR de. Chronology and backtracking of oil slick trajectory to source in offshore environments using ultraspectral to multispectral remotely sensed data. *C* 2015;39:113–9. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.03.007>.
- [11] Rodrigues PPGW. MOHID Description / MARETEC. Campos Dos Goytacazes, RJ, Brazil: Essentia Editora; 2012.
- [12] Barros YT de, Lugon Jr J, Kalas FA, Rodrigues PPGW, Silva Neto A da. Identificação de Trajetórias com Uso das Plataformas MoHid e GRIPP para Aplicações Ambientais, 2021. <https://doi.org/10.5540/03.2021.008.01.0423>.
- [13] Lugon Jr J, Silva Neto AJ da. gripp: General Inverse Problem Platform 2019.
- [14] Souza NGS de, Lugon Jr J, Yamasaki E, Kyriakides I, Silva Neto AJ da. OTIMIZAÇÃO DO RASTREAMENTO DE DERRAMAMENTO DE ÓLEO E REDUÇÃO SISTEMÁTICA DA ÁREA DA REGIÃO DE PESQUISA: A PLATAFORMA GRIPP. In: Universidade do Estado do Rio de Janeiro, editor. X Congresso sobre Planejamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro; 2021.
- [15] Kitsios V, Frederiksen JS, Zidikheri MJ. *Ocean Modelling*. vol. 68. 2013.
- [16] Mateus M, Neves R. Ocean modelling for coastal management–Case Studies with MOHID. IST Press [Http://www.Mohid.Com/Books/2013OceanModellingMOHIDPd2013](http://www.Mohid.Com/Books/2013OceanModellingMOHIDPd2013).
- [17] Ballent A, Pando S, Purser A, Juliano MF, Thomsen L. Modelled transport of benthic marine microplastic pollution in the Nazaré Canyon. *Biogeosciences* 2013;10:7957–70. <https://doi.org/10.5194/bg-10-7957-2013>.
- [18] Booth AM, Kubowicz S, Beegle-Krause CJ, Skancke J, Nordam T, Landsem E, et al. Microplastic in global and Norwegian marine environments: Distributions, degradation mechanisms and transport Author(s) 2017.
- [19] Cloux S, Allen-Perkins S, de Pablo H, Garaboa-Paz D, Montero P, Pérez Muñozuri V. Validation of a Lagrangian model for large-scale macroplastic tracer transport using mussel-peg in NW Spain (Ría de Arousa). *Science of The Total Environment* 2022;822:153338. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153338>.
- [20] Souza NGSD, Lugon Jr J, Silva Neto AJD. Vertical mixing strategies in the Opendrift platform: analytical solution and Random Walk scheme. *Sci Plena* 2023;19. <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2023.119904>.
- [21] Spagnol S, Wolanski E, Deleersnijder E, Brinkman R, McAllister F, Cushman-Roisin B, et al. An error frequently made in the evaluation of advective transport in two-dimensional Lagrangian models of advection-diffusion in coral reef waters. *Mar Ecol Prog Ser* 2002;235:299–302. <https://doi.org/10.3354/meps235299>.
- [22] Lyard FH, Allain DJ, Cancet M, Carrère L, Picot N. FES2014 global ocean tide atlas: design and performance. *Ocean Science* 2021;17:615–49. <https://doi.org/10.5194/os-17-615-2021>.
- [23] Kantha LH, Clayson CA. *Numerical Models of Oceans and Oceanic Processes*. 1st ed. Academic Press; 2000.
- [24] Oceans GBC of the. GEBCO_2023 Grid. GEBCO 2023. https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/GEBCO_2023/ (accessed August 19, 2023).
- [25] National Centers For Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA. NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive 2015:109.074 TB. <https://doi.org/10.5065/D65D8PWK>.
- [26] Pablo H, Sobrinho J, Garcia M, Campuzano F, Juliano M, Neves R. Validation of the 3D-MOHID Hydrodynamic Model for the Tagus Coastal Area. *Water* 2019;11:1713. <https://doi.org/10.3390/w11081713>.



- [27] Richter M. *Inverse Problems*. Cham: Springer International Publishing; 2020. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-59317-9>.
- [28] El-Sherif DM, Eloffy MG, Elmesery A, Abouzid M, Gad M, El-Seedi HR, et al. Environmental risk, toxicity, and biodegradation of polyethylene: a review. *Environmental Science and Pollution Research* 2022;29:81166–82. <https://doi.org/10.1007/S11356-022-23382-1/TABLES/6>.
- [29] Mansour N, El-Fakih K. Simulated Annealing and Genetic Algorithms for Optimal Regression Testing. *Journal of Software Maintenance: Research and Practice* 1999;11:19–34. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-908X\(199901/02\)11:1<19::AID-SMR182>3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-908X(199901/02)11:1<19::AID-SMR182>3.0.CO;2-M).
- [30] Chubarenko I, Bagaev A, Zobkov M, Esiukova E. On some physical and dynamical properties of microplastic particles in marine environment. *Marine Pollution Bulletin* 2016;108:105–12. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.04.048>.
- [31] Atiwesh G, Mikhael A, Parrish CC, Banoub J, Le T-AT. Environmental impact of bioplastic use: A review. *Heliyon* 2021;7:e07918. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07918>.



MONITORAMENTO DA VAZÃO EM UM CURSO D'ÁGUA URBANO PELOS MÉTODOS DO FLUTUADOR E ACÚSTICO

1Maria Eduarda Zaupa de Pádua, 2Yuri Ogera Cazari, 3Paulo Fernando Soares, 4Cláudia Telles Benatti

1 Universidade Estadual de Maringá, pg404729@uem.br; 2 Universidade Estadual de Maringá, ra118892@uem.br,

3 Universidade Estadual de Maringá, pfsoares@uem.br, 4 Universidade Estadual de Maringá, ctbenatti@uem.br

Palavras-chave: Medição; Flutuador; *FlowTracker*;

Resumo

A urbanização é um fenômeno global que tem alterado as paisagens e as dinâmicas dos ambientes urbanos em todo o mundo. Dentre os impactos da urbanização nos corpos hídricos urbanos pode-se citar o aumento da vazão máxima dos rios devido a impermeabilização do solo, decorrente da construção de estradas, edifícios e outras superfícies urbanas que impedem a infiltração adequada da água no solo. Isso leva a um maior escoamento superficial, aumentando o risco de enchentes e erosão nos leitos dos rios. No entanto, dados de monitoramento de vazões, principalmente em bacias urbanas, muitas vezes são escassos ou inexistentes. Sendo assim, o objetivo geral do trabalho é o monitoramento da vazão do Ribeirão Morangueiro, localizado no município de Maringá, PR, por meio do emprego dos métodos flutuador e acústico para a determinação da velocidade do fluxo. Foram realizados, ainda, o levantamento de dados referentes ao local de estudo e o levantamento e análise de séries históricas de precipitação da bacia. Para o monitoramento da vazão foram selecionados quatro pontos ao longo do corpo hídrico, no entanto, destes, apenas um apresentou características adequadas para o emprego dos dois métodos de medição. Comparando-se os resultados obtidos a partir do emprego dos dois métodos, observou-se diferenças relativas entre 4,5 e 41,2% nos valores médios obtidos de vazão durante o período monitorado. As principais dificuldades encontradas em campo foram devido ao fundo pedregoso do curso d'água, o que pode gerar interferências na leitura pelo *Flowtracker* utilizado para medição no método acústico, e devido aos cuidados exigidos durante a coleta de dados por meio da ponderação das leituras.

Introdução

Na perspectiva da gestão sustentável dos corpos d'água em meio urbano e do planejamento das cidades, o monitoramento do escoamento dos corpos hídricos desempenha um papel fundamental. O monitoramento da vazão destes corpos hídricos é essencial para uma série de aplicações em alternativas e cenários que possibilite a gestão adequada do ambiente em que se está inserido, bem como o controle do recurso frente a eventos extremos e alterações no uso e ocupação do solo dentro de sua bacia hidrográfica (SILVA, 2023).

Direcionando-se aos recursos hídricos frente a eventos hidrometeorológicos extremos e mudanças climáticas, com a supressão de cobertura vegetal, a impermeabilização do solo, e a expansão urbana desordenada em sua bacia hidrográfica, é perceptível o elevado aumento dos impactos no saneamento local, que muitas vezes tem como destino os córregos das cidades. Nesta situação, os ciclos naturais passam a se alterar já que antes a água era infiltrada no solo se torna quase por completa escoamento superficial, causando consequências no ciclo hidrológico e contribuindo para o aumento do aporte de poluentes para o corpo hídrico (SANTOS et al, 2017; ALVES, 2017).

Com a grande carga de escoamento superficial sendo ainda diretamente transportada para os corpos d'água pelos sistemas de drenagem urbana convencionais que, segundo Cardoso Neto (2009), referem-se às técnicas que apresentam como função o transporte da água da chuva que não foi infiltrada para fora da zona de malha urbana. Com projetos elaborados conforme princípios hidráulicos e apresentando como exultório os corpos hídricos da região, muitas vezes quando não dimensionados corretamente, sem mecanismos de dissipação de energia ou amortecimento de drenagem, e sem considerar os aspectos hidrológicos e climatológicos, podem levar à ocorrência de impactos negativos no corpo d'água, principalmente, o aumento na vazão do rio, desencadeando diversas alterações físicas, químicas e ecossistêmicas a jusante do mesmo.

Neste sentido, aspectos quantitativos e qualitativos do escoamento superficial de áreas urbanas e seus impactos nos corpos receptores tem despertado cada vez mais atenção de estudiosos, que possuem como desafio o monitoramento extensivo e custoso da qualidade das águas e do escoamento dos sistemas hidráulicos urbanos. Estes ainda apresentam características dinâmicas, em constante alteração com a evolução dos ambientes urbanos (NIEMCZYNOWICZ, 1999).

Parte da maioria dos rios do mundo, bem como seus trechos e afluentes, não são monitorados ou mal monitorados principalmente com relação à vazão e outras variáveis de interesse. Bacias que não são monitoradas não têm dados em quantidade e com qualidade para que possam ser calculados variáveis de interesse (SIVAPALAN et al., 2003; PESSOA, 2017). A carência de dados de vazão frequentemente se deve à falta de estações de medição fluviométrica no local desejado, ou se tiver locais de medição na região, estes nem sempre possuem dados confiáveis ou não tem a quantidade de dados necessários para uma boa representatividade (TUCCI, 2002).

Sendo a vazão, aqui compreendida como a quantidade volumétrica de um fluido, que, nesse caso, passa por um canal (BRASIL, 1977). Existem diferentes métodos para a medição da vazão. Um deles é o do flutuador, um dos métodos mais simples de ser utilizado e muito empregado, devido a sua praticidade (SANTOS et al, 2019). Outro método, o acústico, utiliza o *FlowTacker* como medidor de vazão ADV® (*Acoustic Doppler Velocimeter*), que quando combinado com a haste de medição,



mensura velocidades na faixa de 0,001 a 4,5 m/s. O equipamento realiza o cálculo automático de vazão, utilizando uma variedade de métodos analíticos internacionais, incluindo as normas ISO (*International Organization for Standardization*) e USGS (*U.S. Geological Survey*) (COELHO et al, 2013).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho de pesquisa, foi monitorar a vazão do corpo d'água Ribeirão Morangueiro, no município de Maringá, PR, com medições mensais, para que possa ser avaliada as características da vazão em períodos de chuva e estiagem, além de avaliar a aplicação dos métodos de medição de vazão por meio de flutuador e do método acústico. O Ribeirão Morangueiro é um corpo hídrico com nascente na região urbana de Maringá que recebe o efluente da Estação de Tratamento de Esgotos (ETE – Alvorada). Portanto, a caracterização da vazão é importante para uma compreensão mais abrangente do impacto do lançamento desses efluentes, assim como para modelagem do escoamento na bacia.

Metodologia

Localização e caracterização da área em estudo

A área de estudo é o Ribeirão Morangueiro está localizado no município de Maringá, no Norte Central do estado do Paraná, nas coordenadas 23° 24'S e 51° 55'W, conforme apresentado na Figura 1. A bacia hidrográfica do Ribeirão Morangueiro possui uma área de 41,9 km². O corpo d'água tem uma extensão de 12,5 km, com a sua nascente no Parque Alfredo Werner Nyffeler e desagua no Ribeirão Sarandi. Tem sua nascente localizada, portanto, em uma área urbana e a sua média-baixa vertente em uma área rural até seu exultório. O projeto do Parque foi criado pela Secretaria de Serviços Urbanos do município em 1986 e teve o final da obra em 1988, com o objetivo de preservar a nascente, já que a mesma estava em processo de erosão (BOVO, 2009). O local serve também como uma bacia de detenção, com a função de controle do escoamento pluvial por meio de armazenamento de água e restrição na saída, diminuindo a vazão liberada no corpo d'água (VALIM *et al.*, 2019).

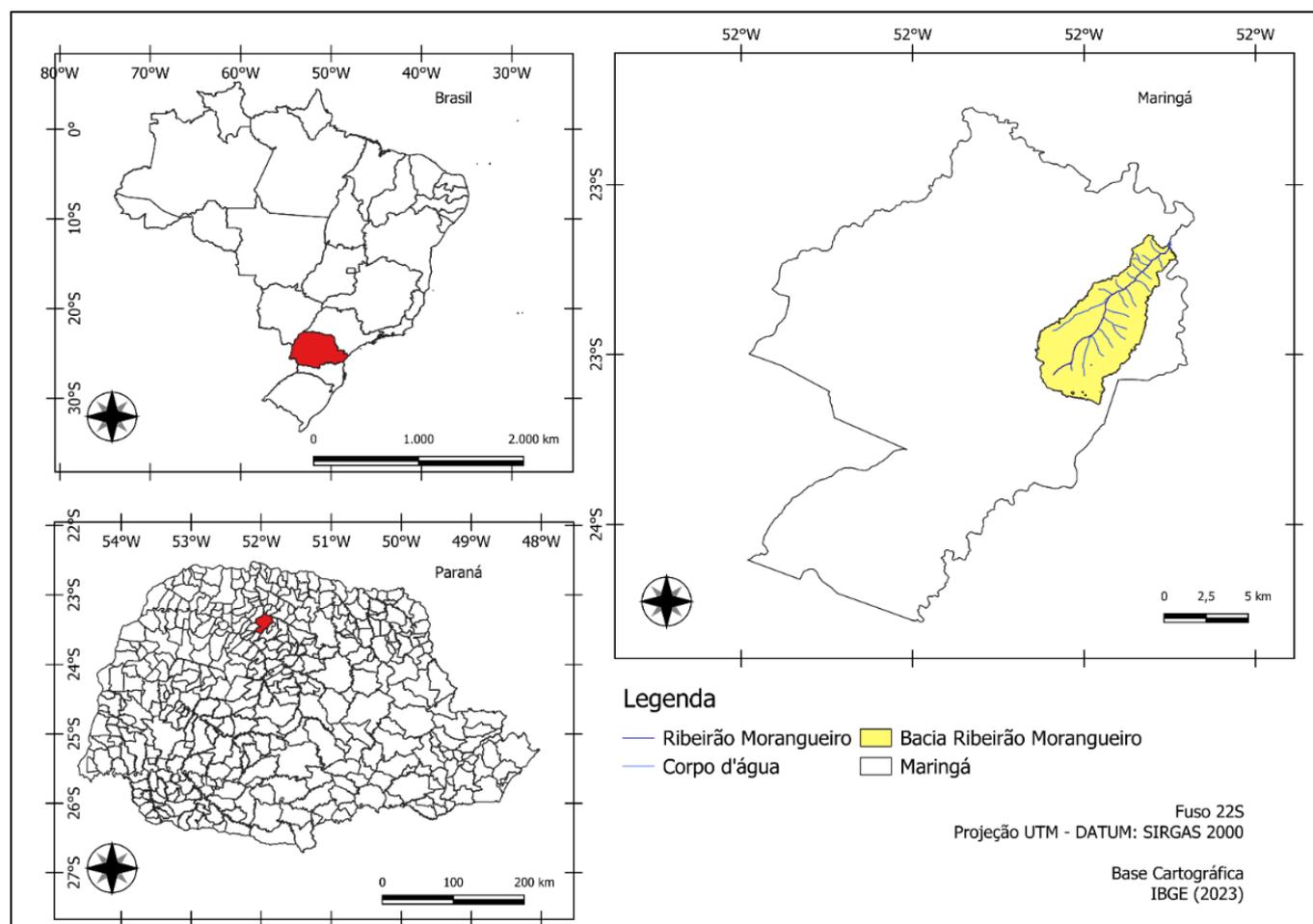


Figura 1 – Mapa de localização da bacia hidrográfica na cidade de Maringá.

A bacia hidrográfica do Ribeirão Morangueiro é composta por zona residencial, zona industrial, zona especial de interesse social (ZEIS), zona de urbanização específica (ZUE) e zona rural (ZRU), apresentando assim um uso e ocupação diversificado, como mostra a Figura 2.

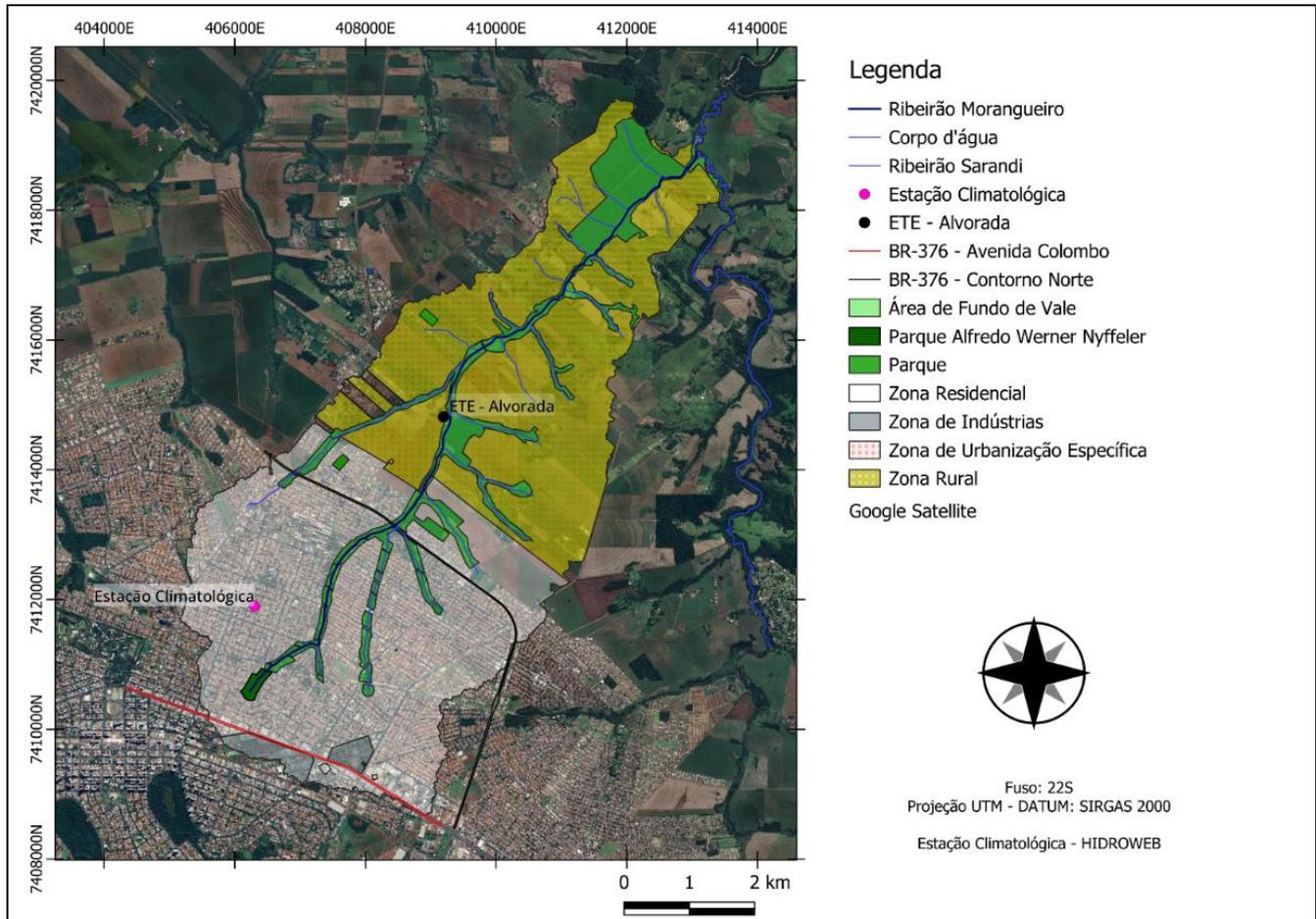


Figura 2 – Mapa de uso e ocupação do solo.

A bacia do Ribeirão Morangueiro apresenta características de Formação Serra Geral, com predominância de rochas basálticas, formadas durante o período de Cretáceo devido ao derrame de lava (REIS et al., 2013). O clima característico na região da área de estudo segundo a classificação de Köppen (1948) é o tipo Cfa, sendo um clima subtropical, com verão quente, com temperaturas acima de 22°C no verão e nos meses mais secos com chuvas com mais de 30 mm.

Para análise de séries histórica e monitoramento foram selecionadas duas estações meteorológicas, a estação 83767 – Climatológica, onde os dados obtidos são disponibilizados pelo INMET e a estação 64541000 – Fluviométrica, de responsabilidade da ANA e os dados são fornecidos pelo site HidroWeb. Para analisar os eventos hidrometeorológicos foram selecionados os dados fornecidos pelo SIMEPAR e pelo Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná – IDR a respeito do período de coleta de dados (verão sazonal).

Medição de vazão

Os pontos de coleta de dados foram definidos levando em consideração o acesso ao local (trilha, estradas, pontes, etc.), se o trecho do rio era retilíneo. Foram selecionados quatro pontos na bacia do Ribeirão Morangueiro para a coleta de dados de vazão, os quais estão apresentados na Tabela 1 e Figuras 3 e 4. A Tabela 1 ainda relaciona os pontos de coleta de dados com o método empregado para a determinação da vazão.

Tabela 1 - Localização dos pontos de amostragem

Ponto	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Uso do solo	Método
01	7411314.96m S	407231.65m E	481	Área Urbana	Flutuador
02	7411954.46m S	407393.40m E	479	Área Urbana	Flutuador
03	7412986.82m S	408053.66m E	460	Área Urbana	Flutuador/ <i>FlowTracker</i>
04	7415875.79 m S	409790.70 m E	432	Área Rural	Flutuador

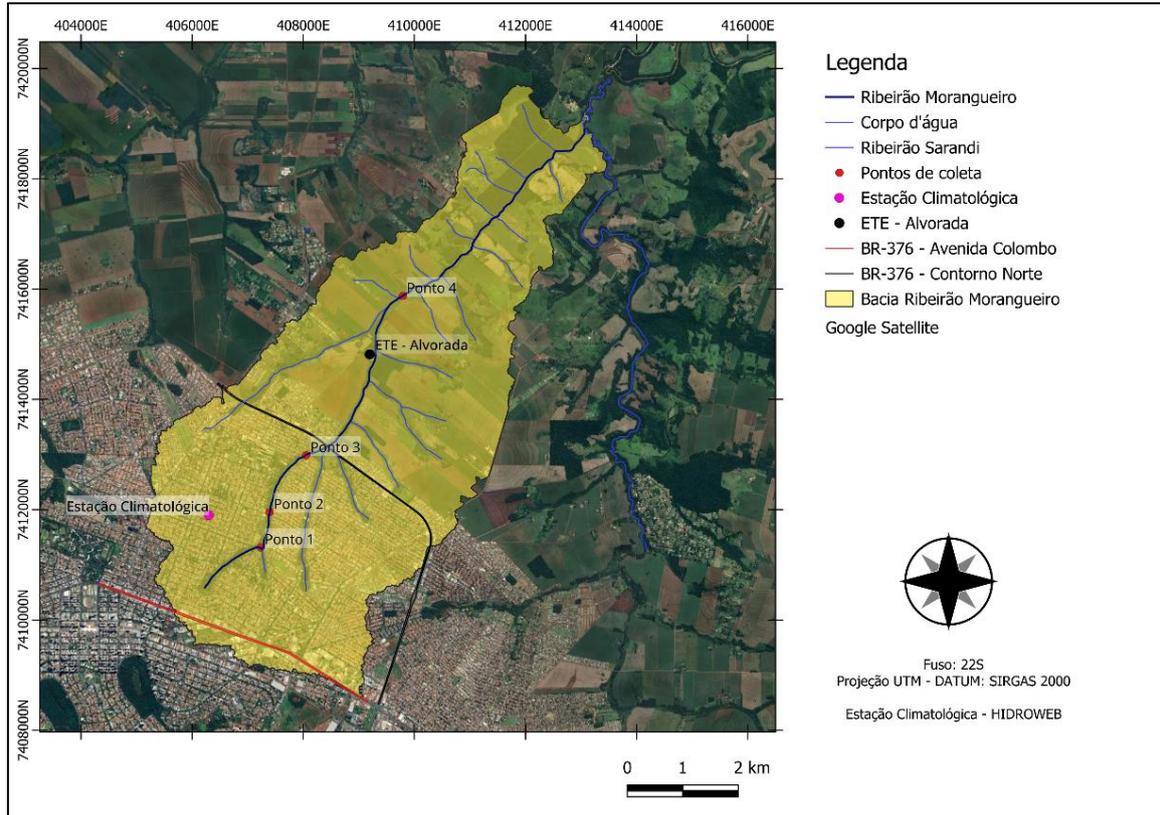


Figura 3 - Mapa de localização dos pontos de coleta de dados de vazão.



Figura 4 – Pontos de coleta de dados de vazão: (a) Ponto 01; (b) Ponto 02; (c) Ponto 03; (d) Ponto 04.

Neste trabalho, as medições de vazão foram realizadas uma vez ao mês durante os meses de dezembro de 2023 a maio de 2024. Foram escolhidos dois métodos de medição de vazão, o método convencional, que utiliza flutuadores, e o método acústico, que utiliza o *FlowTracker*. Dentre os pontos selecionados para realizar as medições, em somente um ponto (ponto 03)



foi usado o aparelho *FlowTracker* da marca *Sontek*, que se baseia no efeito Doppler. Para o uso do *FlowTracker*, o transmissor acústico deve enviar um sinal a 10cm de distância para que os receptores possam captar o sinal emitido. O fundo do ponto de medição deve estar livre de obstáculos, tais como vegetação, pedras, galhos, entre outros (SONTEK, 2007). Conforme os procedimentos técnicos da EMBRAPA (2007), considerou-se para o emprego do método do flutuador uma altura máxima de lâmina d'água de 1,60 metros.

Para as medições de vazão foi utilizado o método descrito por Palhares et al. (2007), no qual são traçadas duas cordas as margens do rio com uma distância mínima de 5 metros, onde são feitas marcações a cada 0,5 metros, para obter a batimetria e seção transversal do rio, como mostra a Figura 5.

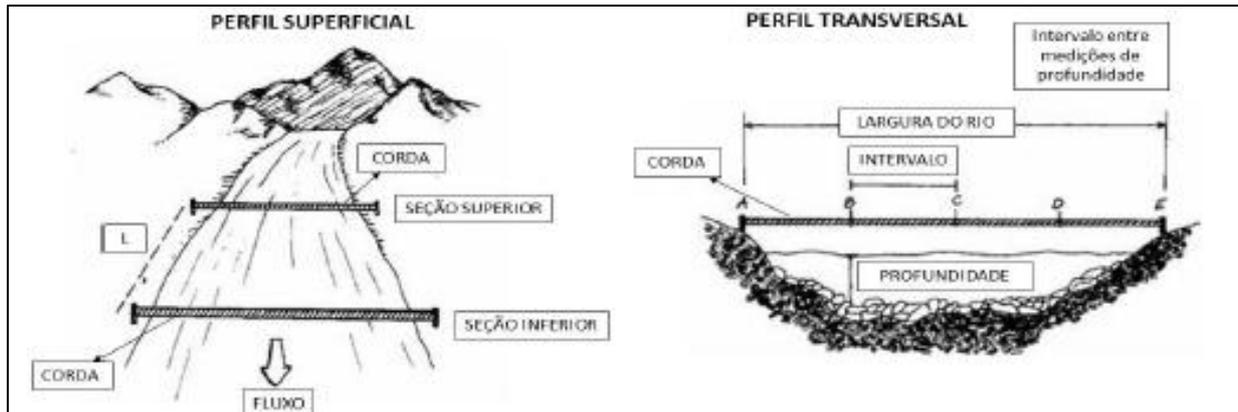


Figura 5 - Perfil superficial e transversal.

Fonte: Palhares et al, 2007

Para a medição da vazão foram utilizados flutuadores de EPS (poliestireno expandido). Todas as medições foram realizadas com, no mínimo, 3 tomadas de tempo para garantir resultados mais precisos. O tempo utilizado para calcular a velocidade do escoamento foi a média entre as amostras coletadas. A distância mínima percorrida pelo flutuador foi de 5 metros. Para calcular a vazão na seção foi utilizada a Equação (1) a seguir:

$$Q_{flut} = \frac{A \cdot L \cdot C}{t} \quad (1)$$

Em que, A é a área molhada obtida a partir da seção transversal (m²); L é a distância que o flutuador percorreu entre as seções de medição (m); t é o tempo correspondente para o flutuador chegar à seção inferior (s); e C é o coeficiente de correção, que assume o valor de 0,8 para fundo do rio pedregoso, e valor de 0,9 para fundo barrento. O coeficiente permite a correção devido ao fato de a água se deslocar mais rápido na superfície do que na porção do fundo do rio (PALHARES et al, 2007).

Na medição da vazão pelo método acústico, seguiu-se o procedimento apresentado no manual elaborado pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM. Para garantir resultados mais coerentes, posicionou-se o equipamento de forma perpendicular ao fluxo do canal. Neste manual, são propostas duas formas de posicionamento da haste do equipamento para medir a vazão, sendo elas: método 60% para lâmina d'água inferior a 60cm, e o método 20%/80% para valores superiores a 60cm. Neste caso, foi utilizado o método de 60%, pois a lâmina d'água medida foi inferior a 60cm. Para o posicionamento do equipamento na seção transversal do curso d'água, fez-se uso das mesmas marcações utilizadas para a determinação da área média da seção.

Resultados e Discussão

Os valores de vazão obtidos ao longo do monitoramento a partir do emprego do método do flutuador estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Vazão mensal nos pontos de coleta, determinada pelos métodos do flutuador e acústico

Vazão – m ³ /s	Dezembro/2023	Janeiro/2024	Fevereiro/2024	Março/2024
Método dos flutuadores				
Ponto 01	0,083	0,078	0,071	0,077
Ponto 02	0,21	0,33	0,13	0,11
Ponto 03	0,22	0,17	0,45	0,192
Ponto 04	0,91	2,38	0,91	1,26
Método acústico				
Ponto 03	0,21	0,10	0,197	0,193



No ponto 01 as únicas contribuições que o rio recebe é do lençol freático e da drenagem urbana, com e sem dissipador, já os pontos 02 e 03 tem também a contribuição de um tributário, que deságua logo após a coleta do ponto 01, e o ponto 04 recebe quase todos os tributários presentes na bacia e por fim recebe o lançamento do efluente da ETE. Sendo assim é possível observar, a partir dos dados apresentados, o aumento da vazão ao longo do curso do corpo hídrico.

Na tabela 2 é possível verificar uma inconsistência nos dados dos pontos 02 e 03. Esse resultado pode ser atribuído a diversos fatores, a saber: cuidados na tomada de tempo da distância percorrida pelo flutuador e na determinação da área da seção transversal, ocorrência de precipitação no momento da coleta de dados do ponto 02 (ver Tabela 3).

Comparando os resultados obtidos no ponto 3 pelos dois métodos (Tabela 2), no último mês se obteve resultados semelhantes e nos primeiros dois meses se obteve diferenças relativas em torno de 4,5% a 41,2%. Já no mês de fevereiro/2024 se nota que a vazão obtida pelo uso do *FlowTracker* foi quase a metade da vazão medida pelo método dos flutuadores. No entanto é necessário um conjunto maior de dados para uma melhor comparação dos resultados obtidos pelos dois métodos.

Os dados de precipitação no período monitorado, obtidos pelo site do HidroWeb, estão apresentados na Tabela 3, com destaque para os dias em que foram realizadas as coletas de dados em campo. Pode-se observar que ao longo do mês de dezembro choveu 9 dias, com dia chegando a 57,7mm de precipitação. Em janeiro choveu 11 dias com a máxima precipitação de 51,8mm. Fevereiro foi o mês mais chuvoso, cerca de 18 dias de precipitação, com duas semanas quase ininterruptas de chuvas e com o máximo de precipitação de 19,8mm. No mês de março choveu apenas 5 dias, com a máxima de 17,4mm de precipitação.

Tabela 3 - Precipitação diária

Dezembro	Precipitação	Janeiro	Precipitação	Fevereiro	Precipitação	Março	Precipitação
01/12/2023	0	01/01/2024	0	01/02/2024	1,7	01/03/2024	9,4
02/12/2023	0	02/01/2024	0	02/02/2024	5,9	02/03/2024	0
03/12/2023	0	03/01/2024	0	03/02/2024	0	03/03/2024	0
04/12/2023	0	04/01/2024	0	04/02/2024	0	04/03/2024	0
05/12/2023	0,7	05/01/2024	0	05/02/2024	15	05/03/2024	0
06/12/2023	0	06/01/2024	11	06/02/2024	3,1	06/03/2024	0
07/12/2023	0	07/01/2024	0	07/02/2024	0	07/03/2024	0
08/12/2023	23,2	08/01/2024	0	08/02/2024	0,5	08/03/2024	3
09/12/2023	0	09/01/2024	0	09/02/2024	0	09/03/2024	1,2
10/12/2023	0,6	10/01/2024	0	10/02/2024	7,5	10/03/2024	1
39							
11/12/2023	(pontos 02 a 04)	11/01/2024	0	11/02/2024	0	11/03/2024	0
12/12/2023	0	12/01/2024	2,3	12/02/2024	0	12/03/2024	0
13/12/2023	0	13/01/2024	21,6	13/02/2024	0	13/03/2024	0
14/12/2023	0	14/01/2024	0	14/02/2024	0	14/03/2024	0
15/12/2023	0	15/01/2024	0	15/02/2024	6,3	15/03/2024	0
0							
16/12/2023	(ponto 1)	16/01/2024	0	16/02/2024	1,7	16/03/2024	0
17/12/2023	0	17/01/2024	0	17/02/2024	9,6	17/03/2024	0
18/12/2023	24,8	18/01/2024	0	18/02/2024	0	18/03/2024	17,4
			15,7				
19/12/2023	48,4	19/01/2024	(pontos 02 a 04)	19/02/2024	0,8	19/03/2024	0
20/12/2023	0	20/01/2024	0,4	20/02/2024	17,7	20/03/2024	0
						0	
21/12/2023	0	21/01/2024	51,8	21/02/2024	5,3	21/03/2024	(pontos 01 a 04)
				0			
22/12/2023	0	22/01/2024	0	22/02/2024	(pontos 02 a 04)	22/03/2024	5,4
			38,2		0		
23/12/2023	0	23/01/2024	(ponto 1)	23/02/2024	(pontos 1)	23/03/2024	0
24/12/2023	57,7	24/01/2024	0,2	24/02/2024	1,9	24/03/2024	0
25/12/2023	0	25/01/2024	0,2	25/02/2024	3,7	25/03/2024	0
26/12/2023	18,3	26/01/2024	11,9	26/02/2024	7,5	26/03/2024	0
27/12/2023	0	27/01/2024	0	27/02/2024	1,6	27/03/2024	0
28/12/2023	0	28/01/2024	0	28/02/2024	2	28/03/2024	0
29/12/2023	0	29/01/2024	1	29/02/2024	19,8	29/03/2024	0
30/12/2023	0,3	30/01/2024	0			30/03/2024	0
31/12/2023	0	31/01/2024	0			31/03/2024	0

Nos meses de coleta as precipitações acumuladas foram de 213mm, 154,3mm, 111,6mm e de 37,4mm, conforme



apresentado na Figura 6. Pode-se observar nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro precipitações acima de 100mm, já no mês de março a precipitação está abaixo de 50mm, podendo indicar o início de um período de seca. Segundo o SIMEPAR (2024), os meses subsequentes abril, maio e junho apresentaram um menor volume de chuva com relação ao verão. De acordo com o IDR os meses de dezembro, janeiro e março tiveram a precipitação bem abaixo da média histórica na região Norte do estado do Paraná. No mês de fevereiro a precipitação na região Norte do Estado foi próxima da média histórica de 160,6mm, chegando a 134,1mm.

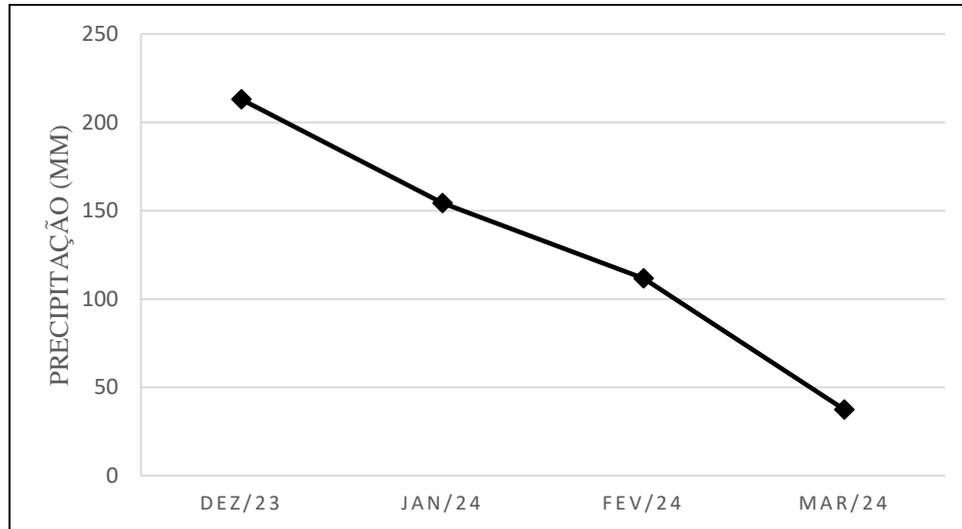


Figura 6 - Precipitação pluviométrica acumulada.

Analisando as seções transversais no ponto 03 de coleta de dados (Tabela 4), e tendo como base os dados de precipitação apresentados na Tabela 3, verifica-se que no mês de fevereiro a lâmina d'água aumentou 10cm, considerando o ponto mais baixo da seção transversal, em comparação com o mês de janeiro, como resultado das chuvas que ocorreram durante o intervalo entre as medições, totalizando um total acumulado em fevereiro nos dias que antecederam a medição de 75,1mm.

Tabela 4 - Seção transversal do Ponto 03

Ponto 03	
	Lâmina d'água varia entre 5cm a 30cm
	Lâmina d'água varia entre 2cm a 27cm
	Lâmina d'água varia entre 2cm a 37cm
	Lâmina d'água varia entre 9cm a 25cm

Comentários finais

O estudo apresentou os resultados obtidos de vazão em um curso d'água a partir do emprego de métodos diferentes de vazão. O método do flutuador apresentou como principal vantagem a sua simplicidade de uso, no entanto foram observadas dificuldades relacionadas a medição do tempo do percurso devido às características do escoamento, presença de obstáculos no curso d'água e imprecisões inerentes ao método. O método acústico a partir do emprego do *FlowTracker* é indicado como um método mais preciso, fornece de imediato o resultado da velocidade medida e realiza o cálculo da vazão, no entanto em rios com muito sedimento e com o fundo rochoso ele pode apresentar leituras equivocadas da velocidade, assim gerando imprecisões na medição. Recomenda-se a continuidade das medições para completar um ano hidrológico e assim ter uma comparação mais ampla dos dois métodos de medição.

Ressalta-se que é fundamental que os órgãos públicos implementem mais estações fluviométricas para o monitoramento contínuo de vazões em cursos d'água de bacias urbanas e rurais, de forma a construir séries históricas que permitam a utilização



de ferramentas de previsões e tomadas de decisão.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências Bibliográficas

- BOVO, M. C. 2009. Áreas Verdes Urbanas, Imagem e Uso: um estudo geográfico sobre a cidade de Maringá (PR). Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente, p. 1 - 324.
- BRASIL. 1977. Dep. Nacional de Águas e Energia Elétrica. Manual para serviços de hidrometria. DNAEE, Brasília, p. 95.
- CARDOSO NETO, A. 2009. Sistemas urbanos de drenagem.
- COELHO, L. S. et al. 2013. Análise comparativa dos medidores descarga convencional (molinete) e medidores acústicos flowtracker – adv (velocímetro acústico doppler) em medições a vau, nas sub-bacias 35 e 36 no estado do ceará. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Bento Gonçalves, p. 1 – 8.
- MOTTA, B. A. (s.d.). Tutorial básico – FlowTracker. Serviço Geológico do Brasil – CPRM, p. 1 – 30.
- NEVES, E. T. 1989. Curso de Hidráulica. Porto Alegre: Globo. ed. 9.
- NIEMCZYNOWICZ, J. 1999. Urban hydrology and water management - present and future challenges. Urban Water, v.1, p. 1-14.
- PALHARES, J. C. P. et al. 2007. Medição da vazão em rios pelo método do flutuador. Comunicado técnico. 455 – EMBRAPA. Concórdia. SC, p. 1 – 4. ISSN 0100-8862.
- PESSOA, M. M. E. P. 2017. Obtenção de vazões em locais sem monitoramento através de um modelo hidrológico com assimilação de dados. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 1 – 153.
- REIS, G. S. et al. 2014. A formação Serra Geral (cretáceo, bacia do Paraná)-como análogo para os reservatórios ígneo-básicos da margem continental brasileira. Pesquisas em Geociências, v.41 n.2, p. 155- 168.
- RIBEIRO, M. J. et al. 2017. Comparação de medições com molinete e FlowTracker em rios de fundo rochoso: estudo de caso, bacia do rio Piabanha. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, p. 1 – 8.
- RIOS, F. P. et al. 2009. Estudo comparativo entre métodos de medição de vazão em cursos d’água. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, p. 1-12.
- SANTOS, C. O. et al. 2019. Método do flutuador como ferramenta para monitoramento do comportamento hidrológico de córrego urbano. Holos Environment, 19 (4), p. 614-639, 2019.
- SANTOS, K. A. et al. 2017. Impactos da ocupação urbana na permeabilidade do solo: o caso de uma área de urbanização consolidada em Campina Grande – PB. Eng Sanit Ambient. v.22 n.5. ISSN 1809-4457.
- SCHUGERL, R. et al. 2019. Comparison of the discharge and flow velocity values determined by ADV device and indicator method. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing. p. 1 - 11.
- SILVA, M. V. 2023. Experiências na Gestão de Recursos Hídricos na Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC). Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife.
- SIVAPALAN, M. et al. 2003. IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003-2012: Shaping an exciting future for de hydrological sciences. Hydrological Sciences Journal. 48(6), p. 857-880.
- SONTEK 2007. FlowTracker Technical Firmware Version 3.3. San Diego: SonTek/YSI. 126p.
- TUCCI, C. E. M. 2002. Regionalização de Vazões. UFRGS Porto Alegre - RS, 256p
- VALIM, F. A. et al. 2019. Diagnosis and proposal of erosion control downstream of the Park Alfredo Werner Nyffeler, in Maringá-Paraná. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v. 23, e.4, p. 1-10.



VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS DO RIO GRANDE DO SUL: APLICAÇÃO DO MÉTODO GOD UTILIZANDO GEOPROCESSAMENTO

1Larissa da Silva Soares, 2Nathalya Dala Zen Pires, 3Tiago de Vargas, 4Maurício Andrades Paixão, 5Marco Antonio Jacomazzi

Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - Prof. Água Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1 e-mail: larissa.aguaesolo@gmail.com; 2 e-mail: nathalya.zen@gmail.com; 3 e-mail: tiago.devargas@ufrgs.br, 4 e-mail: mauricio.paixao@iph.ufrgs.br 5 e-mail: marcoantonio@rasa.eng.br

Palavras-chave: vulnerabilidade de aquíferos, geoprocessamento, método GOD.

Resumo

O aumento da demanda por águas subterrâneas ressalta a urgência de estudos voltados à proteção dos aquíferos diante das atividades humanas e econômicas. Nesse contexto, a avaliação da vulnerabilidade desses recursos hídricos por meio de ferramentas de mapeamento torna-se crucial para orientar políticas públicas e práticas de gestão territorial. A vulnerabilidade dos aquíferos, definida como sua suscetibilidade à contaminação por atividades poluidoras, é influenciada por uma série de fatores físicos, químicos e biológicos. Compreender esses fatores é essencial para identificar áreas de risco e priorizar ações de proteção ambiental. Este estudo propõe a avaliação das dificuldades e as possibilidades de emprego das ferramentas de geoprocessamento em nível de gestão territorial da vulnerabilidade de aquíferos com aplicação da metodologia GOD (*Groundwater Occurrence, Overall aquifer class, Depth to groundwater table*) no estado do Rio Grande do Sul. Esta abordagem considera três fatores na análise da vulnerabilidade, permitindo uma avaliação abrangente e prática, uma vez que os dados necessários são geralmente obtidos durante o cadastramento de poços em campo. A utilização de dados do Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS) e ferramentas de geoprocessamento possibilita uma análise detalhada da distribuição espacial dos poços e das variáveis hidrogeológicas relevantes. No entanto, o estudo identifica algumas limitações relacionadas à disponibilidade e qualidade dos dados no SIAGAS, principalmente dados incompletos e sem informação, o que pode afetar a precisão das análises e recomendações resultantes. Apesar dessas limitações, destaca-se a importância do geoprocessamento na identificação de áreas prioritárias para medidas de proteção dos aquíferos, auxiliando na formulação de políticas públicas e no direcionamento de recursos para áreas mais vulneráveis. Enfatiza-se, ainda, a necessidade de avaliações adicionais para aprimorar a metodologia GOD e garantir sua aplicabilidade à realidade específica do estado do Rio Grande do Sul. Esta pesquisa sublinha a importância de abordagens integradas e tecnologias avançadas na gestão sustentável dos recursos hídricos, visando assegurar a disponibilidade e qualidade das águas subterrâneas para as gerações futuras.

Introdução

A gestão e o planejamento dos recursos hídricos subterrâneos estão despertando um maior interesse dos setores público e privado, devido a sua importância estratégica no desenvolvimento e bem-estar social. Segundo Hirata e Fernandes (2008), a crescente demanda pelo uso das águas subterrâneas, tanto para o abastecimento público quanto para atividades econômicas, tem levado os governos a instituírem programas direcionados à proteção da qualidade dos aquíferos. Essa abordagem reforça a premissa de que é mais vantajoso tanto tecnicamente quanto economicamente proteger um aquífero do que remediar um possível dano.

A vulnerabilidade intrínseca à contaminação de aquíferos é estudada em diferentes ambientes geológicos, com múltiplos objetivos de utilização e por diversos autores, instituições nacionais e internacionais para contribuir substancialmente na gestão global dos recursos hídricos subterrâneos (De Vargas et al. 2022a). A vulnerabilidade das águas subterrâneas pode ser entendida como a propensão natural de um aquífero em ser adversamente afetado por atividades humanas. Essa vulnerabilidade é determinada por uma combinação de características físicas, químicas e biológicas da zona não saturada ou da camada que confina o aquífero. Em áreas de alta vulnerabilidade, a presença de atividades de risco pode representar uma ameaça significativa, enquanto em áreas de baixa vulnerabilidade, o perigo pode ser inexistente ou mínimo, dependendo do tipo de atividade. Entender a distribuição dessas áreas no território possibilita aos gestores direcionamento das medidas protetivas e efetividade nas ações de gestão territorial (HIRATA E FERNANDES, 2008).

Dentro das estratégias de estudo da vulnerabilidade, o emprego de ferramentas de geoprocessamento tem se tornado progressivamente mais popular para a proteção dos aquíferos. Esses instrumentos de gestão têm utilizado cada vez mais modelos matemáticos geoespaciais para compilar e visualizar as características das áreas a serem geridas. Sendo a vulnerabilidade uma combinação de diversos fatores, apenas um mapa não seria capaz de representar tamanha complexidade. Nesse sentido, utilizar ferramentas SIG auxilia na integração de informações e na geração de mapas com as características mais importantes para cada região. O grande desafio consiste em conciliar a complexidade da interação entre os poluentes e o ambiente hidrogeológico com as simplificações necessárias para tornar o método aplicável, reproduzível e confiável. Além disso, esse tipo de avaliação é



considerada qualitativa ou semiquantitativa e contém incertezas acumuladas provenientes da integração de diferentes mapas paramétricos do meio físico, oriundos de modelagens geoespaciais (De Vargas et al., 2022b).

Diversos estudos têm utilizado a metodologia GOD para avaliar a vulnerabilidade de aquíferos, já que o método permite a interpolação dos dados de litologia, profundidade até o lençol freático e grau de confinamento da água subterrânea. Também, apresenta vantagem de aplicação em situações que não é possível definir parâmetros com precisão ou quando não existe disponibilidade de tempo, recursos financeiros e equipe apta para adquirir as informações que seriam necessárias em métodos mais complexos (Gomes et al. 2021), além da facilidade de determinação de seus parâmetros e a boa espacialização dos dados em ambiente SIG (BATISTA *et al.*, 2016). Arelado ao SIG, a metodologia GOD pode ser uma ótima ferramenta para auxiliar gestores e *stakeholders* nas tomadas de decisão.

Diferentes interpoladores vêm sendo utilizados para a construção de mapas de vulnerabilidade aquífera em bacias hidrográficas. Esses interpoladores podem ser determinísticos, que se baseiam na geometria (distâncias euclidianas), ou estocásticos, que consideram os processos aleatórios e as incertezas (Yamamoto e Landim, 2013). No Brasil, em estudos de vulnerabilidade à contaminação de aquíferos, alguns autores têm preferido interpoladores estocásticos (Gomes et al., 2021; Nobre et al, 2009). Luiz *et al.* (2017), verificaram que o método de krigagem, aplicado com o modelo esférico, apresentou o melhor ajuste para interpolar os dados de vulnerabilidade aquífera pelo método GOD, na Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria.

Este estudo teve como objetivo avaliar a aplicabilidade da metodologia de análise de vulnerabilidade GOD utilizando os dados dos poços disponíveis no Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS) para o estado do Rio Grande do Sul, por meio de ferramentas de geoprocessamento.

O foco do estudo foi levantar as principais dificuldades e limitações de aplicação da ferramenta em nível de gestão territorial à partir do cadastro nacional de poços, visando aferir a potencialidade da utilização da ferramenta, sem investigar, detalhadamente, a qualidade do banco de dados de água subterrânea.

Materiais e métodos

Obtenção dos dados e organização do banco

A primeira etapa para o cálculo da vulnerabilidade a partir do método GOD é a obtenção dos dados. No Brasil, o SIAGAS armazena dados disponíveis para gerenciamento das águas subterrâneas, incluindo dados construtivos dos poços, análises físico-químicas e dados de caracterização dos solos e geologia do local de instalação dos poços. Esses dados permitem que sejam realizadas avaliações técnicas, como por exemplo, a aplicação do método GOD para determinação da vulnerabilidade dos aquíferos. Assim, para esse estudo foi obtido banco de dados dos poços cadastrados no Rio Grande do Sul, através de envio da equipe técnica do Serviço Geológico Brasileiro (SGB).

O banco de dados enviado em Acess, possuía as seguintes informações:

- I. Dados Gerais: ID dos poços, município, coordenadas, natureza (tipo do poço), situação, uso da água, bacia hidrográfica, sub-bacia, cota do terreno, profundidade do poço, proprietário, data de instalação e observações
- II. Dados construtivos: Perfurador, profundidade final, tamanho da abertura do poço, método de perfuração, tipo do reservatório e capacidade do reservatório
- III. Dados Hidráulicos: Tipo de teste de bombeamento, método de interpretação, surgência, duração do teste, nível estático, nível dinâmico, vazão específica, estabilização e observação.
- IV. Formação geológica: Tipo de formação geológica e formação geológica.
- V. Litologia: Descrição da litologia padrão e cor do solo.
- VI. Qualidade da água: Parâmetros da amostragem, concentração dos parâmetros, unidade da concentração, parâmetros amostra microrganismos e concentração do parâmetro de microrganismos.
- VII. Amostra físico-químicas: data das amostras, concentração de Ph, condutividade elétrica, sabor, odor, temperatura, turbidez, sólidos suspensos, sólidos sedimentáveis e aspecto natural.

No entanto, apesar de existirem todos esses campos de informação no SIAGAS, muitos estão sem informações ou com dados inexistentes. Essa é uma barreira ainda a ser transposta em diversos sistemas de apoio à gestão da água e do solo e que contam com sistemas especialistas, como o SIAGAS, para o fornecimento de dados.

Método GOD

O método GOD considera 3 parâmetros: *Groundwater occurrence* (G), que avalia o grau de confinamento do aquífero, *Overall aquifer class* (O), que retrata a composição da zona não saturada (litologia) e a *Depth to groundwater table* (D), que indica o nível do lençol freático.

O método GOD envolve a atribuição de pontuações ou classificações para cada um desses fatores, com base em dados hidrogeológicos da área de estudo. O grau de confinamento (G) é subdividido em seis categorias, que iniciam em zero para nenhum ou fluxo ascendente jorrante até 1,0 para não-confinado. A ocorrência de estratos de cobertura (O) é subdividida em diversos tipos de litologia e grau de consolidação da zona vadosa, cujos multiplicadores variam de 0,4 a 1,0, englobando litologias não consolidadas, consolidadas de rochas porosas e consolidadas de rochas duras. Por fim, a Distância até o lençol freático é subdividida em quatro categorias, variando de > 50 m até < 5m, com seus respectivos multiplicadores variando de 0,6 a 0,9. Essas pontuações são combinadas para calcular uma avaliação geral da vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação, que varia de insignificante, baixa, média, alta à extrema. A Figura 1 apresenta um esquema da metodologia de GOD.



A figura a seguir apresenta as variáveis utilizadas pelo método, e as pontuações atribuídas a cada uma. Essa pontuação foi aplicada para os dados obtidos dos poços cadastrados no Rio Grande do Sul.

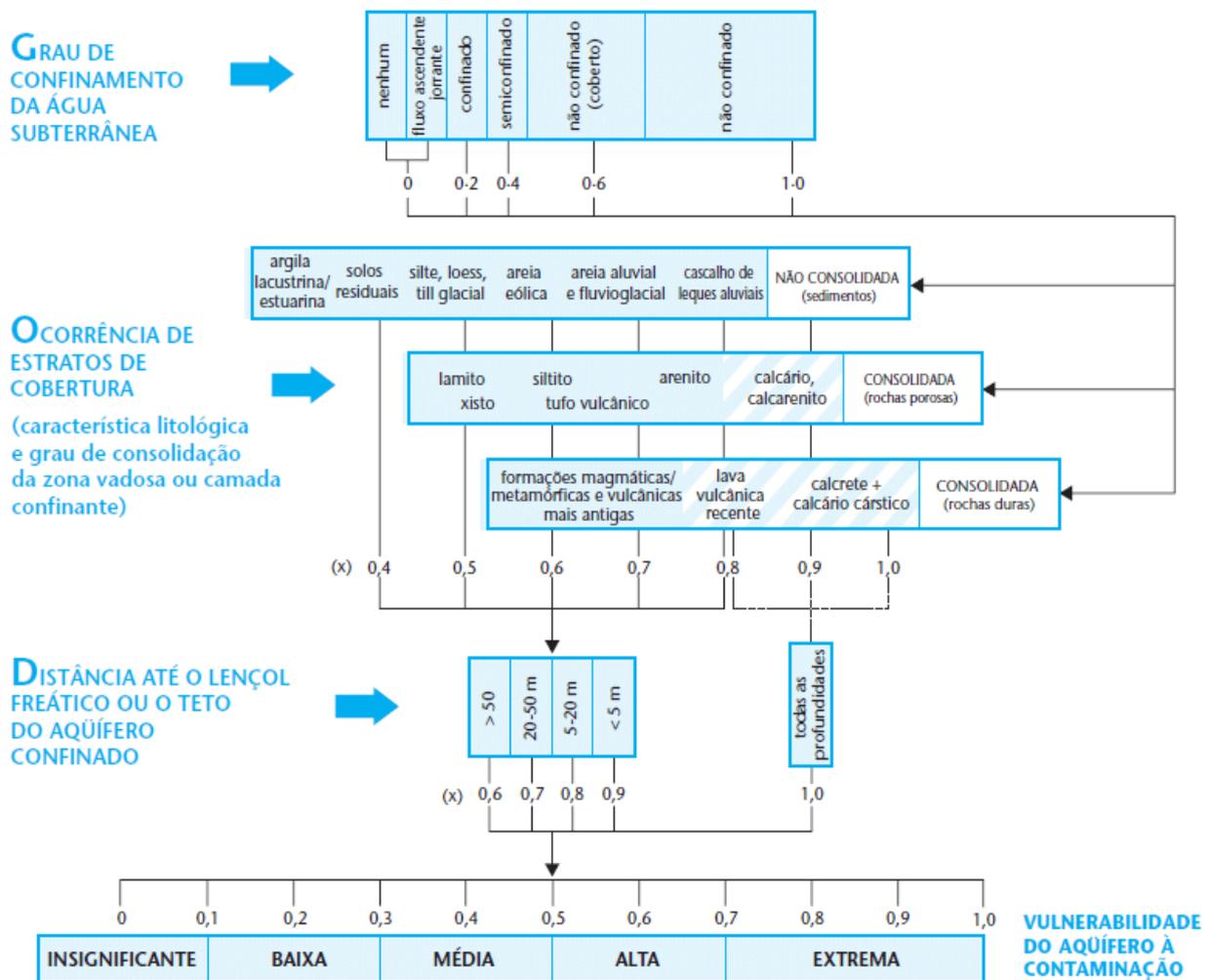


Figura 1: Método GOD.
Fonte: Foster et al. (2006)

Interpolação dos parâmetros e geração dos dados matriciais

Cada poço cadastrado no banco do SIAGAS representa um ponto com uma informação geoespacial. Para obter tal informação em outro local que não existe a indicação de poço cadastrado é realizada uma interpolação dos dados. A interpolação permite que uma área seja avaliada em sua totalidade com base em dados pontuais existentes. O método de interpolação utilizado foi Krigagem (Yamamoto e Landim, 2013). Essa técnica geoestatística retorna médias locais estimadas a partir de elementos amostrais vizinhos para encontrar um valor em uma posição através de uma combinação linear com ponderadores (Ribeiro *et al.* 2011).

Depois da interpolação dos dados e geração do mapa matricial para cada uma das 3 variáveis, foi realizada a composição da vulnerabilidade através da álgebra de mapas. A resolução dos dados matriciais gerados é de 2,5 km. O produto das três variáveis gera o valor equivalente da vulnerabilidade, variando de 0 a 1.

Resultados e discussão

No total foram avaliados 20.054 cadastros de poços no SIAGAS para o estado do Rio Grande do Sul. Desses, nem todos tinham registro das variáveis necessárias para cálculo da vulnerabilidade segundo o método GOD. Dos 20.054 registros de poços, 77% possuíam informação sobre o nível estático, 68% possuíam informação completa da litologia e 58% obtinham informações sobre o grau de confinamento do aquífero. Comparando as três variáveis, 48% dos poços cadastrados obtinham o registro das 3 variáveis. A falta de dados completos ou inexistência de informações acerca dos poços cadastrados no SIAGAS representa uma limitação na obtenção de dados para aplicação do modelo. Além disso, a resolução do dado gerada é adequada para gestão territorial em grande escala, não é adequada para planejamento em pequena escala como bairros. A resolução está diretamente associada ao número de poços cadastrados com informações no SIAGAS.



Classificação dos parâmetros e espacialização dos poços

Para a classificação das variáveis de acordo com as pontuações propostas pela metodologia GOD, foram realizadas adequações e consistências nos dados apresentados no banco do SIAGAS, com o objetivo de obter a padronização necessária. A principal dificuldade foi com relação aos dados de litologia, que por serem na maioria das vezes demasiadamente descritivos, dificultou a padronização da tipologia do solo. A tabela a seguir apresenta a distribuição dos dados contidos no banco.

Tabela 1: Classificação das variáveis

Variável	Classificação	Número de poços	Porcentagem em relação ao total (%)	
Característica da camada não saturada (O)	AREIA EÓLICA	1	0,0	
	AREIAS	1079	5,4	
	ARENITO	913	4,6	
	ARENO-ARGILOSO	556	2,8	
	ARGILA	569	2,8	
	ARGILITO	136	0,7	
	ARGILO-ARENOSO	36	0,2	
	BASALTO	5822	29,0	
	BASALTO ALTERADO	83	0,4	
	CASCALHO	41	0,2	
	FOLHELHOS	35	0,2	
	GRANITO	409	2,0	
	LATERITA	16	0,1	
	RIOLITO	27	0,1	
	ROCHA CRISTALINA	34	0,2	
	ROCHA INTEMPERIZADA	817	4,1	
	SILTICO	59	0,3	
	SILTITO	68	0,3	
	SOLO ARENOSO	440	2,2	
	SOLO ARGILOSO	2209	11,0	
	SOLO BASALTICO	60	0,3	
	SOLO RESIDUAL	24	0,1	
	SOLO SILTOSO	145	0,7	
	Registro incompleto	2927	14,6	
	Sem informação	3548	17,7	
	Grau de Confinamento (G)	Confinado	9015	45,0
		Livre	5407	27,0
Sem informação		5372	26,8	
Semi-Confinado		225	1,1	
Semi-Livre		35	0,2	
Distância do lençol freático (D)	Sem informação	4630	23,1	
	> 50 m	1569	7,8	
	50-20 m	3877	19,3	
	20-5 m	6341	31,6	
	>5 m	3637	18,1	

As ferramentas de geoprocessamento podem auxiliar na gestão e na avaliação dos dados distribuídos no território. Valendo-se das ferramentas tecnológicas existentes, os gestores podem direcionar sua atenção aos locais que carecem de cuidado ou que apresentam maior vulnerabilidade.

Após organizar os dados, foi realizado processamento para georreferenciação dos dados através do software de geoprocessamento ArcGIS. Com os dados espacializados foi possível analisar a distribuição espacial dos dados no território do estado do Rio Grande do Sul. As figuras a seguir apresentam a espacialização dos poços cadastrados com relação às variáveis para cálculo da vulnerabilidade. Pode-se observar pelas figuras, que existe boa distribuição espacial dos dados, o que possibilita a avaliação de informações em todo território estadual. Cabe ressaltar que a consistência dos dados é fase importante a ser realizada em qualquer estudo que inclua a utilização de dados primários coletados em campo. Neste artigo, o objetivo era entender a aplicabilidade da ferramenta para geração de informações a nível de gestão. Sendo assim, não foi realizada consistência profunda nos dados disponíveis no banco do SIAGAS. Além disso, optou-se por não dividir as amostras usando critérios hidrogeológicos, apenas aplicou-se a metodologia considerando a totalidade dos dados.

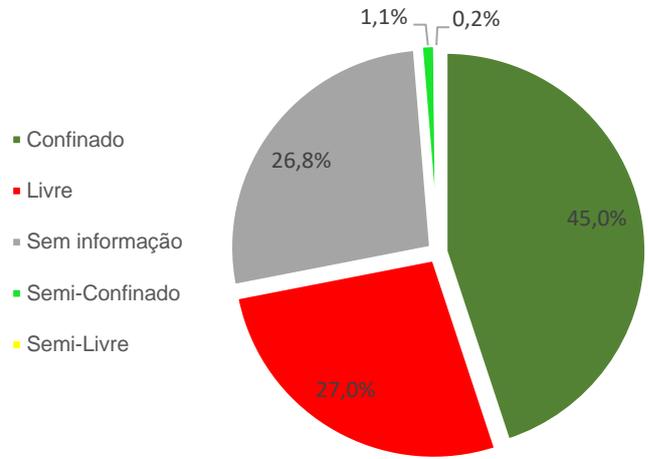
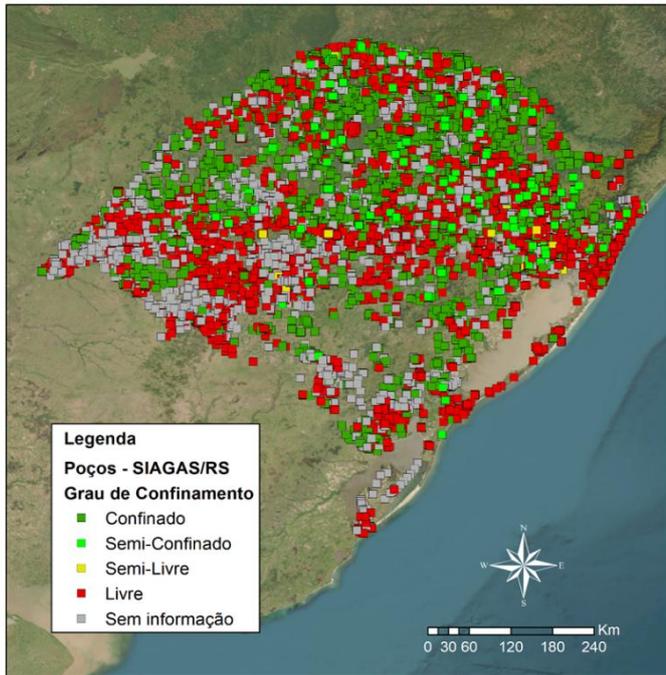


Figura 2: Dados de Grau de confinamento dos poços cadastrados no SIAGAS.

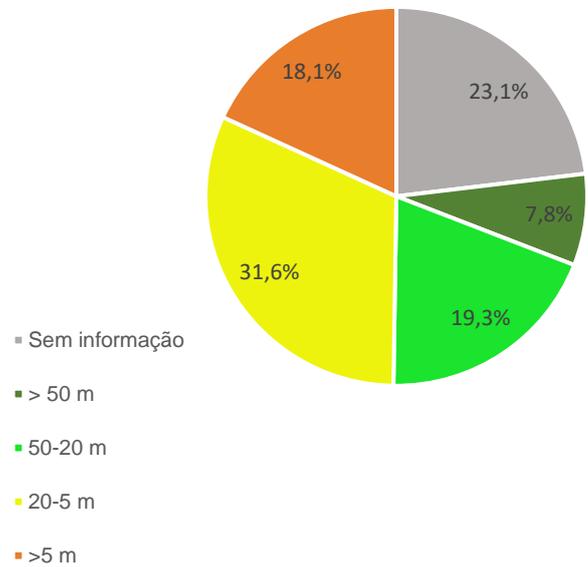
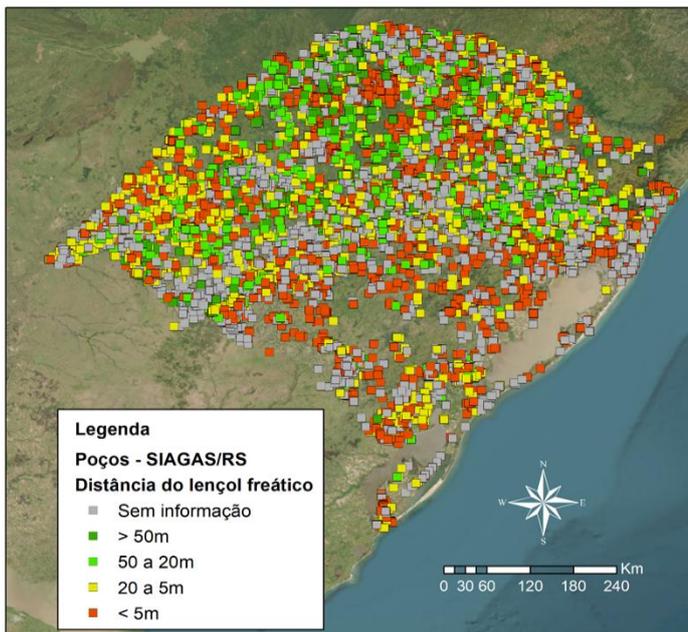
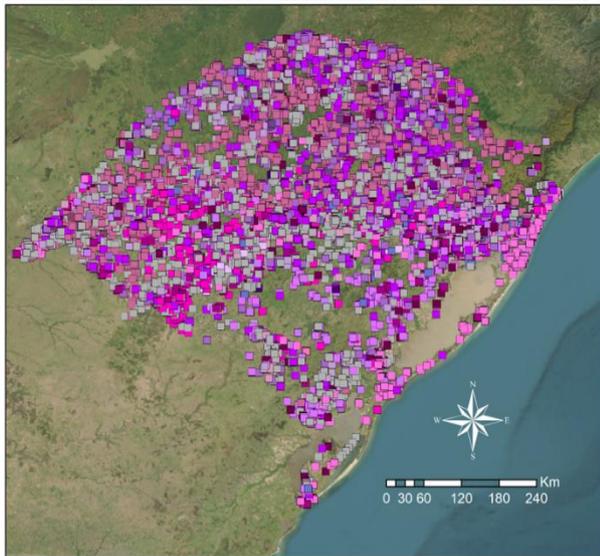


Figura 3: Dados de Distância do lençol freático dos poços cadastrados no SIAGAS.



Legenda	
Poços - SIAGAS/RS	
Ocorrência de estratos de cobertura	
AREIA EÓLICA	INCOMPLETO
AREIAS	LATERITA
ARENITO	RIOLITO
ARENO-ARGILOSO	ROCHA CRISTALINA
ARGILA	ROCHA INTEMPERIZADA
ARGILITO	SILTICO
ARGILO-ARENOSO	SILTITO
BASALTO	SOLO ARENOSO
BASALTO ALTERADO	SOLO ARGILOSO
CASCALHO	SOLO BASALTICO
FOLHELHOS	SOLO RESIDUAL
GRANITO	SOLO SILTOSO
	Sem informação

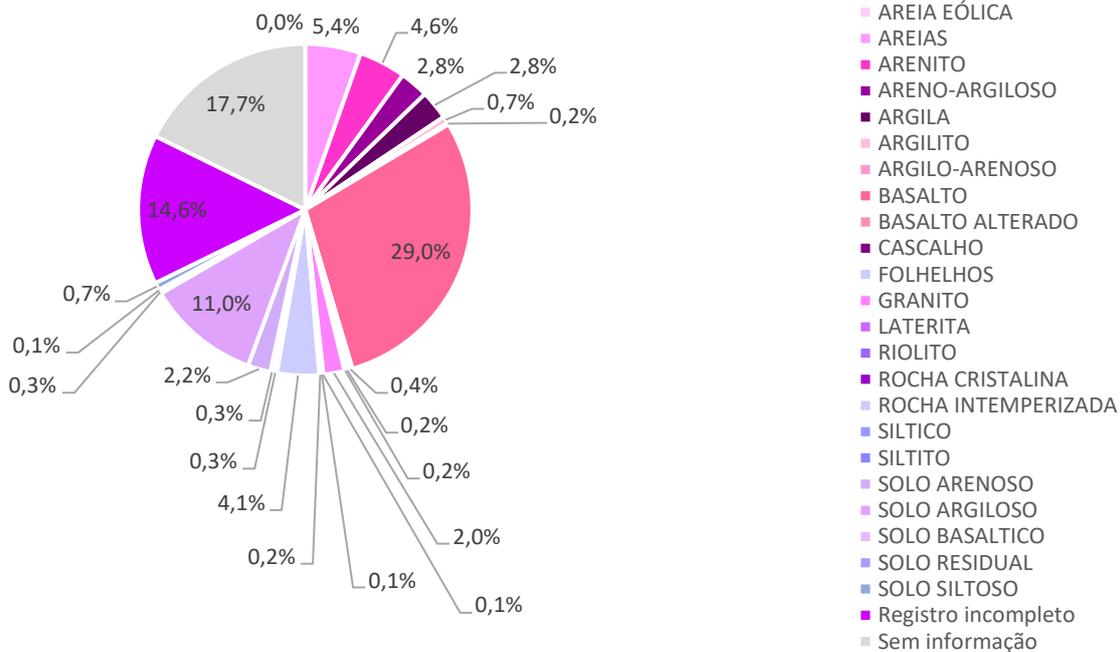


Figura 4: Dados de Ocorrência de estratos de cobertura dos poços cadastrados no SIAGAS.

Após a da interpolação dos dados e geração do mapa matricial para cada uma das 3 variáveis, foi realizada a composição da vulnerabilidade através da álgebra de mapas. O produto das três variáveis gera o valor equivalente da vulnerabilidade, variando de 0 a 1 (Figura 5).

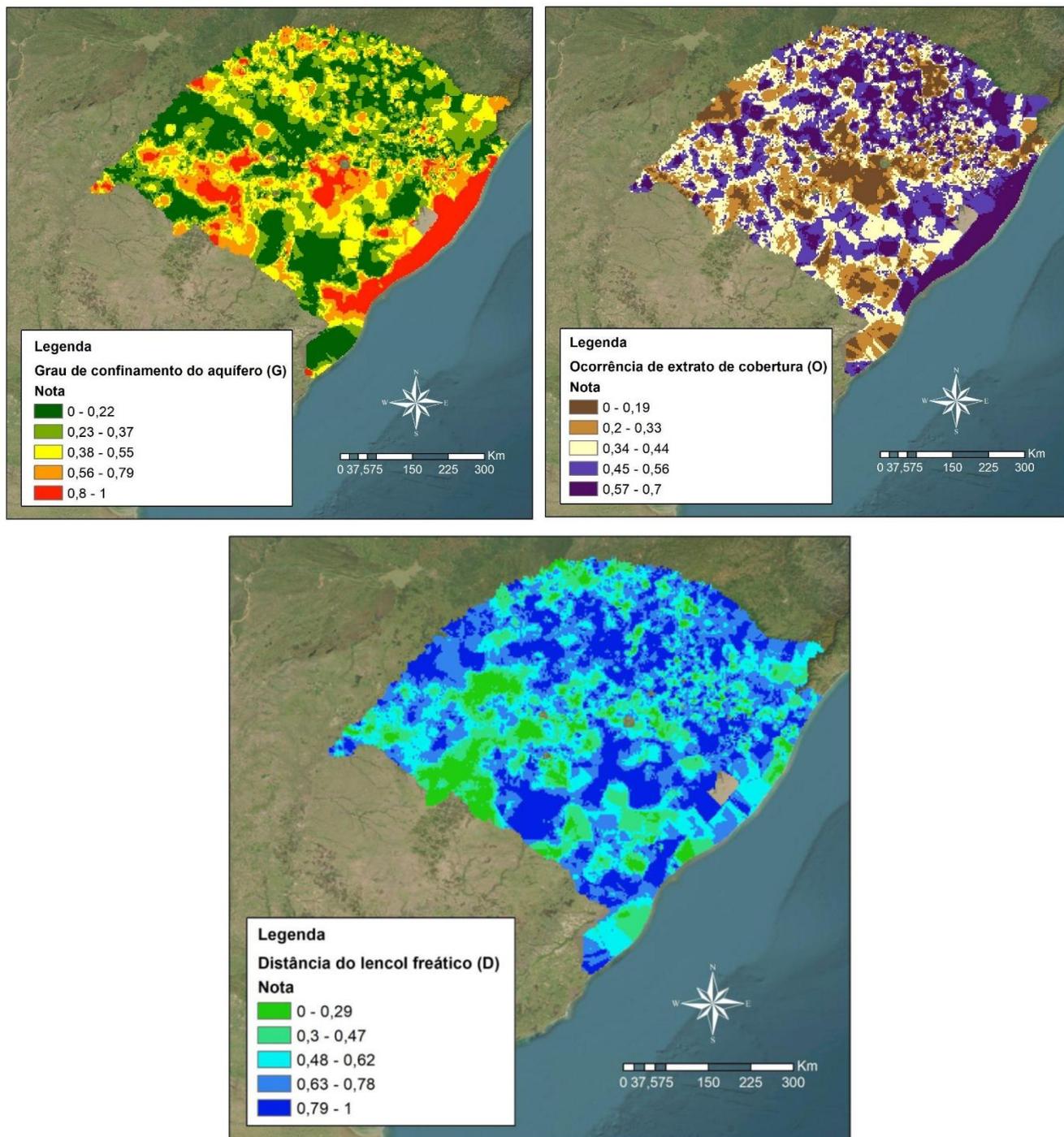


Figura 5: Interpolação das variáveis para cálculo da vulnerabilidade.

A Figura 6 apresentada a seguir registra a vulnerabilidade obtida através da composição das 3 variáveis do método GOD. Avaliando o resultado, observa-se que para o estado do Rio Grande do Sul foram classificadas poucas áreas como alta vulnerabilidade, estando a maior parte do território nas classes de insignificante ou baixa vulnerabilidade. Sendo, Insignificante: 58,56%, Baixa: 36,81 %, Media: 4,30% e Alta: 0,33 %.

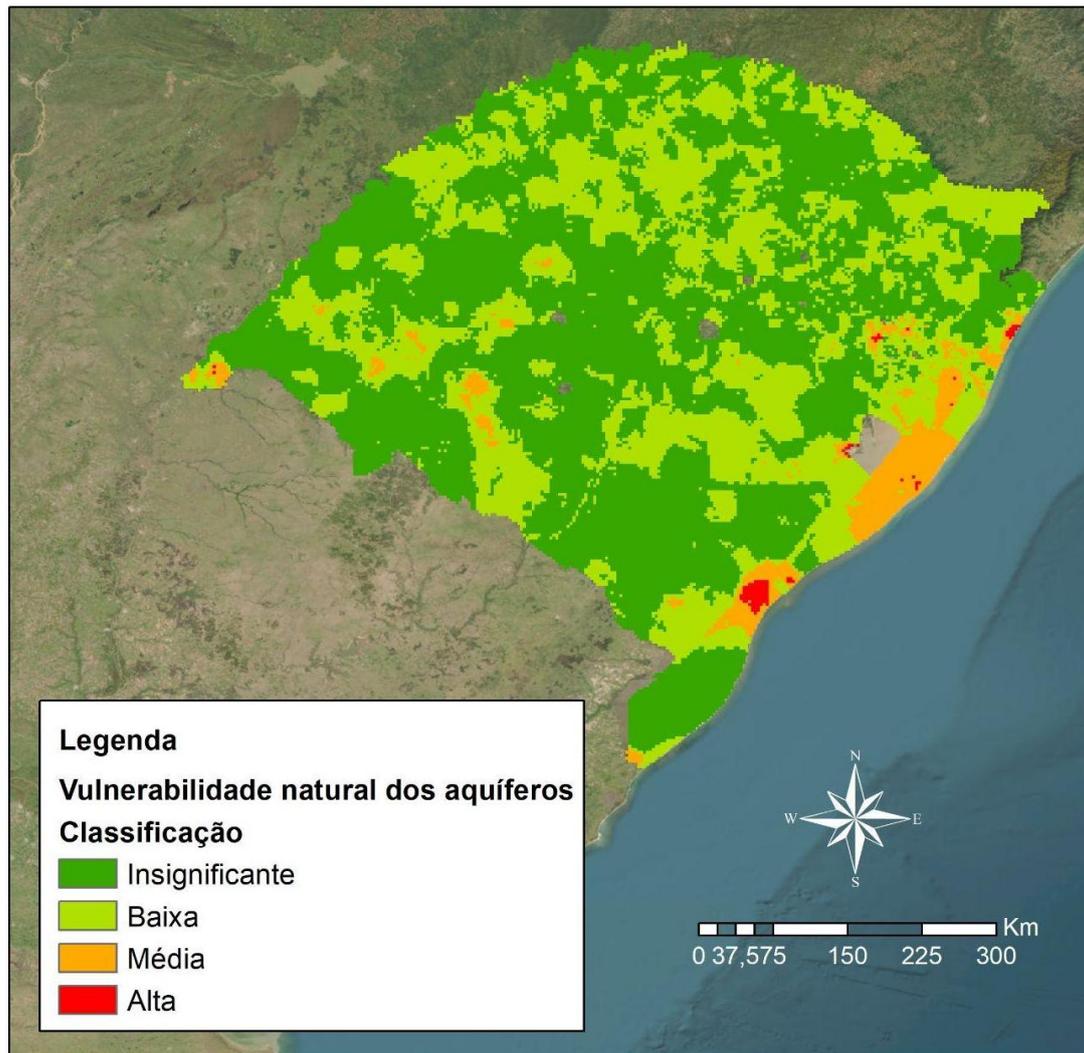


Figura 6: Vulnerabilidade natural dos aquíferos segundo método GOD.

Considerações finais

Este estudo aplicou a metodologia GOD com o objetivo de avaliar as dificuldades e as possibilidades de emprego das ferramentas de geoprocessamento em nível de gestão territorial da vulnerabilidade de aquíferos. Como principais considerações do trabalho, inclui-se:

- O uso de tecnologias de geoprocessamento deve ser cada vez mais aplicado na rotina da gestão territorial, pois são ferramentas capazes de sintetizar um conjunto de informações em modelos matemáticos geoespecializados;
- A obtenção de dados em campo é extremamente relevante para reduzir as incertezas na representação dos modelos matemáticos existentes;
- O banco de dados do SIAGAS mostrou ser uma importante fonte de informação para a avaliação da vulnerabilidade natural dos aquíferos no Rio Grande do Sul, embora apresente limitações por apresentar dados completos ou inexistência de informações;
- É importante ressaltar a limitação de qualquer ferramenta de modelagem em representar a complexidade de um ambiente real, sendo sempre necessário avaliar com criticidade o resultado gerado e a compatibilidade com informações reais de campo. É recomendado que seja avaliada a necessidade de uma triagem nos dados, de acordo com as características hidrogeológicas;
- Para trabalhos futuros sugere-se um avaliar com detalhe os dados obtidos e a adequação da metodologia para aprimoramento do retrato do território gaúcho;

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, agradeço também ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua, Projeto CAPES/ANA AUXPE N°. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento.



Referências bibliográficas

BATISTA, Carla Sales Polon; GESUALDO, Gabriela Chiquito; LEITE, Pamela Cristine Colla. **Aplicação do método GOD para avaliação de vulnerabilidade de aquífero livre em bacia hidrográfica.** Revista Águas Subterrâneas, 2016.

BORGES, V.M.; ATHAYDE, G.B.; REGINATO, P.A.R. Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do sistema aquífero Serra Geral no Estado do Paraná – Brasil. Águas Subterrâneas, v. 31, n. 4, p. 327-337, 2017.

DE VARGAS, TIAGO; BELLADONA, ROSSANO ; SGORLA, VINÍCIUS; SBABO, LEONARDO CRIPPA. Vulnerabilidade intrínseca da água subterrânea como alicerce na gestão do uso do solo em bacias de captação. REVISTA BRASILEIRA DE GEOGRAFIA FÍSICA, v. 15, p. 710-720, 2022.

DE VARGAS, TIAGO; BELLADONA, R. ; SOUZA, M. E. R. . Hydrogeology of fractured aquifers: application of consistency indexes for the validation of geospatial mathematical models. GEOCIÊNCIAS (SÃO PAULO. ONLINE), v. 41, p. 391-404, 2022

FALHEIROS, Matheus Oliveira, CARNEIRO, João Paulo Hora; NETO, Emmanoel Franco; **Utilização do método GOD para a avaliação de vulnerabilidade dos aquíferos das cidades de Boquim-SE e Riachão do Dantas-SE.** XII Encontro de Recursos Hídricos. 2019, Aracaju/SE.

GOMES, M. G. ; DE VARGAS, TIAGO ; BELLADONA, R. ; BOSCO, V. D. ; ARAUJO, B. ; BORTOLIN, T. A. . A vulnerabilidade natural de aquíferos fraturados: avaliando os modelos DRASTIC e GOD, originais e adaptados. GEOCIÊNCIAS (SÃO PAULO. ONLINE), v. 40, p. 735-749, 2021.

HIRATA, Ricardo; FERNANDES, Amélia João. Vulnerabilidade à poluição de aquíferos. *In:* FEITOS, Fernando A. C., FILHO, João Manoel; FEITOSA, Edilton Carneiro. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações.** 3 ed. rev. e amp - Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2018. 812 p.

LUIZ, Thiago Boeno Patricio; FILHO, Leônidas Luiz Volcato Descovi; SILVA, José Luiz Silvério da. **Avaliação de interpoladores para o estudo de vulnerabilidade aquífera: O caso da Bacia do Rio Santa Maria.** Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável V. 12, Nº 4, p. 756 - 762, 2017.

Nobre, J.G.A., Teixeira, A., dos, S., De Sousa, V.F., Moreira, L.C.J., Costa, C., 2009. SIG como ferramenta de planejamento de uso de águas subterrâneas no município de Santa Rosa do Piauí-PI. *In:* Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Natal, Brasil, pp. 4789–4795.

RIBEIRO, D. M.; ROCHA, W. F.; GARCIA, A. J. V. **Vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos da sub-bacia do Rio Siriri, Sergipe.** Águas Subterrâneas, v. 25, n. 1, p. 91-102, 2011.

YAMAMOTO, J.K. & LANDIM, P.M.B. Geoestatística: conceitos e aplicações. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 215 p., 2013.



FERRAMENTAS APLICADAS AOS INSTRUMENTOS DE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA SEGURANÇA EM BARRAGEM DE TERRA

1Paulo Roberto Garcia, 2Alberto Costa Fernandes Carvalho, 3Igor Leonardo Gama, 4Paulo de Castro Guetti, 5Sofia Rodrigues de Azeredo Zuaid, 6Albert Willian Faria, 7Luciano Gobo Saraiva Leite

1 Universidade Federal do Triângulo Mineiro, e-mail: paulo.garcia@ufm.edu.br; 2 Universidade Federal do Triângulo Mineiro, e-mail: d202011273@ufm.edu.br; 3 Universidade de Uberaba, e-mail: igor.gama@oi.com.br; 4 Universidade Federal do Triângulo Mineiro, e-mail: paulo.guetti@ufm.edu.br; 5 Universidade Federal do Triângulo Mineiro, e-mail: d202011125@ufm.edu.br; 6 Universidade Federal do Triângulo Mineiro, e-mail: albert.faria@ufm.edu.br; 7 Universidade Federal do Triângulo Mineiro, e-mail: luciano.leite@ufm.edu.br

Palavras-chave: barragem de terra; segurança; instrumentação

Resumo

O presente trabalho aborda a questão dos instrumentos e métodos construtivos que garantirão a segurança de uma barragem de terra. Tratamos dos aspectos gerais, como definição de barragens, visão geral da utilização de barragens de terra no Brasil e método construtivo de uma barragem de terra. E adentrando especificamente no tema abordado, apresentamos a questão da necessidade de instalação de instrumentos de monitoramento garantindo a segurança e integridade física da barragem. E por fim, abrangemos um estudo de caso, através de uma ocorrência na barragem de Piau, situada no município com o mesmo nome no estado de Minas Gerais que veio confirmar a importância da instrumentação de barragens.

Introdução

As barragens desempenham um papel fundamental na vida humana, sendo essenciais para o desenvolvimento da humanidade em várias frentes. Além de armazenar água, proporcionam uma série de benefícios, como o abastecimento de água potável, a geração de energia, a irrigação, a regulação dos cursos d'água e o controle de inundações, entre outros. No entanto, é crucial reconhecer que essas estruturas também representam riscos, especialmente quando não são adequadamente monitoradas.

Neste contexto, o monitoramento das condições físicas das barragens, especialmente as de terra, se revela de extrema importância. Este trabalho se propõe a explorar esse tema, destacando a necessidade de implementação de instrumentação adequada para garantir a segurança e integridade dessas estruturas.

1.1 DEFINIÇÃO DE BARRAGEM E SEU CONTEXTO HISTÓRICO NO BRASIL

Uma barragem, conforme definição estabelecida pela Deliberação Normativa nº 87/2005 e pelo Manual de Segurança e Inspeção de Barragens, é uma estrutura construída transversalmente a um rio ou talvez com o objetivo de elevar o nível da água ou criar um reservatório. No Brasil, a construção de barragens remonta ao início do século XX, com iniciativas documentadas no interior do Ceará e na Paraíba, realizadas pela Inspeção de Obras contra a Seca.

1.2 ESTUDO DE CASO: OCORRÊNCIA NA BARRAGEM DE PIAU

Para ilustrar a importância do monitoramento das barragens, apresentamos um estudo de caso baseado em uma ocorrência na barragem de Piau. Esta análise nos permite compreender os desafios enfrentados na gestão e manutenção dessas estruturas, evidenciando a necessidade de investimentos em tecnologias e procedimentos que garantam sua segurança e integridade ao longo do tempo.

Em suma, este trabalho busca sensibilizar para a importância do monitoramento das condições operacionais das barragens de terra, destacando sua relevância para a segurança das comunidades e do meio ambiente. Através do conhecimento e da implementação de medidas adequadas, podemos assegurar que essas estruturas continuem a desempenhar seu papel de forma segura e sustentável.

2 Situação Atual no Brasil

No Brasil há uma grande quantidade de pequenas barragens de terra utilizadas como reservatórios de água para atender a demanda da zona rural, a maioria destas barragens é construída pelos proprietários de terras sem nenhum projeto ou mecanismo de manutenção e inspeção de segurança de barragem. (RODRIGUES, 2007).

Um exemplo que podemos utilizar é a pesquisa realizada por pesquisadores da Embrapa, mencionada em artigo no site agronlink, na bacia do Rio Preto existe uma grande quantidade de pequenas barragens de terra e dentre os itens pesquisados concluiu-se que a maioria dos reservatórios possui mais de 30 anos de construção e grande parte dos proprietários não possui informações técnicas sobre a construção. Conforme pesquisa, a maioria delas foi construída avaliando-se apenas aspectos locais. Para piorar ainda mais a situação, atualmente, vários desses pequenos reservatórios estão operando em condições inadequadas e/ou estão prestes a romper. (RODRIGUES, 2007).



2.1 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA

Pode ser encontrada ampla bibliografia sobre segurança de barragens, editada pela Comissão Internacional de Grandes Barragens (CIGB), pela Internacional Commission on Large Dams (ICOLD) e pelo Comitê Brasileiro de Grandes Barragens (CBGB). Os seminários nacionais e internacionais, a criação de comitês e entidades específicas como ICOLD, CIGB e o CBGB, o envolvimento de profissionais experientes em projetos e construção de barragens, bem como a participação das universidades, com desenvolvimento de teses e dissertações, vem somando experiências e contribuindo para a elaboração de legislações mais completas, que cada vez mais reduzem os riscos, levando a condições sempre mais seguras de exploração e operação, além de maior conforto para a sociedade (SANTANA, 2011).

Na história da legislação brasileira de barragens, algumas datas marcam importantes passagens que trouxeram grandes avanços para seu desenvolvimento. Foi criada no Brasil em 1936 a Comissão Brasileira de Grandes Barragens (CBGB). No ano de 1983, o Comitê Brasileiro de Grandes Barragens publicou “Diretrizes para inspeção e avaliação de segurança de barragens em operação”, sendo esse o primeiro estudo sobre o tema editado no Brasil. Em 1986, a Comissão Técnica de Segurança de Barragens do CBGB publicou trabalho sobre segurança de barragens intitulado “Recomendações para formulação e verificação de barragens e reservatórios”.

Em 17 de julho de 2000, foi criada, pela Lei Federal 9.984, a Agência Nacional de Águas, (ANA), que integra o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e tem, dentre as atribuições descritas no artigo 4º, a de planejar e promover ações destinadas a prevenir ou minimizar os efeitos das secas e inundações, no âmbito do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, em articulação com o órgão central do Sistema Nacional de Defesa Civil, em apoio aos Estados e Municípios. Cabe ainda à ANA definir e fiscalizar as condições de operação de reservatórios por agentes públicos e privados, visando garantir o uso múltiplo dos recursos hídricos, conforme estabelecido nos planos de recursos hídricos das respectivas bacias hidrográficas.

A ANA é uma autarquia especial vinculada ao MMA (Ministério do Meio Ambiente), responsável por organizar, implantar e gerir o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens – SNISB.

Em julho de 2002, o Ministério da Integração Nacional, através da Secretaria de Infraestrutura Hídrica, publicou o Manual de Segurança e Inspeção de Barragens, que estabeleceu parâmetros a serem observados na construção, operação e inspeção de barragens. Em 17 de dezembro de 2002, o COPAM (Conselho Estadual de Política Ambiental) do Estado de Minas Gerais delibera norma nº 62, que dispõe sobre critérios de classificação de barragens de contenção de rejeitos, de resíduos e de reservatório de água em empreendimentos industriais e de mineração no estado de Minas Gerais. (Publicação – diário do Executivo – “Minas Gerais”- 21/12/2012)

2.2 RESPONSABILIDADES RELATIVAS À SEGURANÇA DAS BARRAGENS

Os principais responsáveis pela segurança de uma barragem estão diretamente ligados a ela, tais como proprietários, projetistas (e construtores), legisladores e entidades envolvidas. As partes interessadas como por exemplo os vizinhos dessa construção devem estar envolvidas durante todo o ciclo de vida de uma barragem.

3 Gestão de Segurança de Barragem por Instrumentação

Existem várias metodologias para classificação e avaliação da segurança de barragens, sendo algumas quantitativas e outras qualitativas.

A análise de risco é um método que objetiva estimar as probabilidades de ocorrer uma falha e as consequências resultantes (o risco é definido como o produto da probabilidade e da consequência), sendo empregada a finalidade de auxiliar na tomada de decisão em relação às atividades com potencial de afetar a segurança pública. Na avaliação de risco é possível compreender melhor o comportamento da barragem e assim priorizar ações necessárias para se dirigir aos resultados esperados. A análise de risco pode ser qualitativa (avaliações subjetivas da probabilidade, consequência e do risco total) ou quantitativa (valores numéricos de probabilidade e custos de reparação das consequências). Uma avaliação qualitativa simples pode ser apropriada para avaliar locais potenciais para instalação do reservatório de rejeitos, visto que uma avaliação quantitativa detalhada seria mais apropriada para avaliação de modificações em uma barragem de contenção de rejeitos já existente. DUARTE 2008

As metodologias geralmente praticadas para a avaliação de risco incluem processos/sistemas, tais como listas de verificação, modelação de projetos, revisões de segurança, análise preliminar de perigo, estudos de perigo e operabilidade (HAZOP), análise de simulação probabilística, análise da árvore de falhas e de eventos, análise de causa-consequência, análise do erro humano, dentre outros.

Segundo Duarte (2008), o processo de avaliação de risco tem muitas variáveis e abordagens. De modo geral, a análise de risco em barragens deve considerar os principais componentes da estrutura, que inclui:

- O projeto da barragem, a fundação, o grau de instrumentação e monitoramento;
- A capacidade de armazenamento diante de cheias e as estruturas vertedoras;
- A capacidade de a estrutura suportar alterações das condições de operação ao longo do tempo.

Em Minas Gerais, a FEAM avalia o gerenciamento das barragens de contenção de rejeitos e de resíduos industriais e as classifica de acordo com o potencial de dano ambiental em classes I, II ou III de acordo com a DN 87 (COPAM, 2005).

Cada barragem é também classificada de acordo com o desempenho atual conforme medido por uma série de critérios técnicos e analíticos. Assim como para o potencial de perigo, o mais baixo valor dentro de cada critério é atribuído à barragem com o desempenho mais fraco. Os critérios são:



- Qualidade geral de dados técnicos disponíveis;
- Nível de percolação;
- Presença de deformações;
- Nível de deterioração da face da barragem e taludes;
- Evidência de erosão a jusante;
- Condição dos equipamentos de descarga.

A metodologia da SABESP adota uma classificação quanto ao comportamento diferenciado em dois contextos distintos, quais sejam aqueles definidos pela Periculosidade Potencial em que cada unidade apresenta em função de suas características de localização e de projeto, e aqueles definidos pelo seu estado real de funcionamento. No primeiro caso (periculosidade potencial), a classificação consiste numa hierarquia baseada principalmente no potencial existente para a ocorrência de prejuízos materiais ou perdas de vidas humanas ou eventual paralisação operativa devido a um colapso ocasionado pelas cheias. Este potencial não está associado ao estado real da barragem ou ao seu comportamento. Quanto ao estado real, por outro lado, a hierarquização é ponderada em função das informações relativas ao comportamento da barragem e às condições de seus elementos constituintes. (DUARTE, 2008).

3.1 PROJETO DE CONSTRUÇÃO DE BARRAGEM DE TERRA

Conforme em nota no Manual de Inspeção e Segurança de Barragens na fase do projeto, a reavaliação da construção deve ser suficientemente pormenorizada para verificar se as barragens, dispositivos de descarga e taludes do reservatório satisfazem todos os requisitos de segurança atualmente aplicáveis. A reavaliação do projeto, na medida em que registra as condições atuais da barragem em nível de “como construída”, deve incluir, onde aplicável, mas não ser limitada, ao seguinte:

- Registros de construção, para determinar se a barragem foi construída em conformidade com as hipóteses de projeto e para verificar a adequabilidade da sua estrutura e dos materiais de fundação;
- Atualizar a avaliação de eventos extremos, enchentes e sismos. para os quais a barragem está projetada, levando-se em conta qualquer evento extremo que possa ter ocorrido desde o comissionamento da barragem;
- Estabilidade e adequação estrutural, resistência à percolação e erosão de todas as partes dos barramentos, incluindo-se suas fundações, bem como quaisquer barreiras naturais sob condições de carregamentos, normais e extremas;
- Capacidade de todos os canais e condutos hidráulicos para descarregar seguramente as vazões de projeto e a adequação desses condutos hidráulicos para suportar a vazão afluente de projeto e de esvaziamento dos reservatórios, caso necessário, em condições de emergências;

A avaliação da segurança de uma barragem deverá incluir uma comparação com outras barragens similares existentes.

3.2 OBJETIVO BÁSICO DE INSTRUMENTAÇÃO

O principal objetivo da instrumentação é ser fonte de informação sobre o comportamento das estruturas de uma barragem, contribuindo para o entendimento do seu desempenho e para a manutenção de sua segurança.

De acordo com o MANUAL DE SEGURANÇA E INSPEÇÃO DE BARRAGENS, (Junho, 2002), uma barragem segura é aquela cujo desempenho satisfaça as exigências de comportamento necessárias para se evitar incidentes e acidentes que se referem a aspectos estruturais, econômicos, ambientais e sociais.

O interesse crescente pela segurança de barragens, sejam convencionais ou para contenção de rejeitos, tem despertado em vários países, à implementação de normas e critérios específicos para o projeto, a construção, a observação, a inspeção e o acompanhamento da operação dessas barragens. Neste contexto, a instalação de um adequado sistema de instrumentação desempenha um importante papel na avaliação da segurança da barragem. Através da leitura desenvolvida no corpo da barragem propriamente dita, ou no maciço de fundação, é possível comparar quantidades experimentalmente medidas com aquelas previstas pelo projeto ou estimadas para uma operação segura da barragem. (DUARTE 2008).

Em um programa de instrumentação, devem-se estabelecer quais instrumentos a serem utilizados, assim como dimensionar a quantidade necessária aos objetivos que se deseja alcançar. Segundo Kanji & Figueira (1990) por Duarte (2008), dada a grande diversidade das situações locais e de tipos de soluções, os projetos de instrumentação variam muito, não sendo aplicável uma única receita. Pode-se, entretanto, de uma forma estatística, configurar qual tem sido a prática comum adotada na instrumentação de barragens de terra e/ou enrocamento, de onde se poderiam observar tendências e fatores comuns.

4 Estudo de Caso

4.1 INTRODUÇÃO

O presente estudo de caso tem por objetivo constatar o que foi anteriormente apresentado, ou seja, a importância da instrumentação para segurança da barragem.

Os dados apresentados neste estudo foram disponibilizados pela área de segurança da barragem da CEMIG, onde descreve um incidente ocorrido na Barragem do Piau, uma barragem de terra com 23,5 m de altura construída na década de 1950, está situada em um Município com o mesmo nome no estado de Minas Gerais, situada a 240km da capital Belo Horizonte.



Em 2002, a poro-pressão do maciço aumentou e o nível freático do talude jusante atingiu níveis significativos, os quais poderiam levar à ruptura do barramento. As análises das medidas apresentadas pelos instrumentos indicaram que o sistema de drenagem do talude jusante estava colmatado. Inspeções nessa drenagem confirmaram essa hipótese, e revelaram uma obstrução provocada por ferro-bactérias *Gallionella* spp. e *Leptothrix* spp., além da sulfobactéria *Thiothrix* spp. A manutenção foi realizada e a segurança da barragem restabelecida (CBDB, 2006), de acordo com o arranjo estrutural estabelecido na Figura 1.

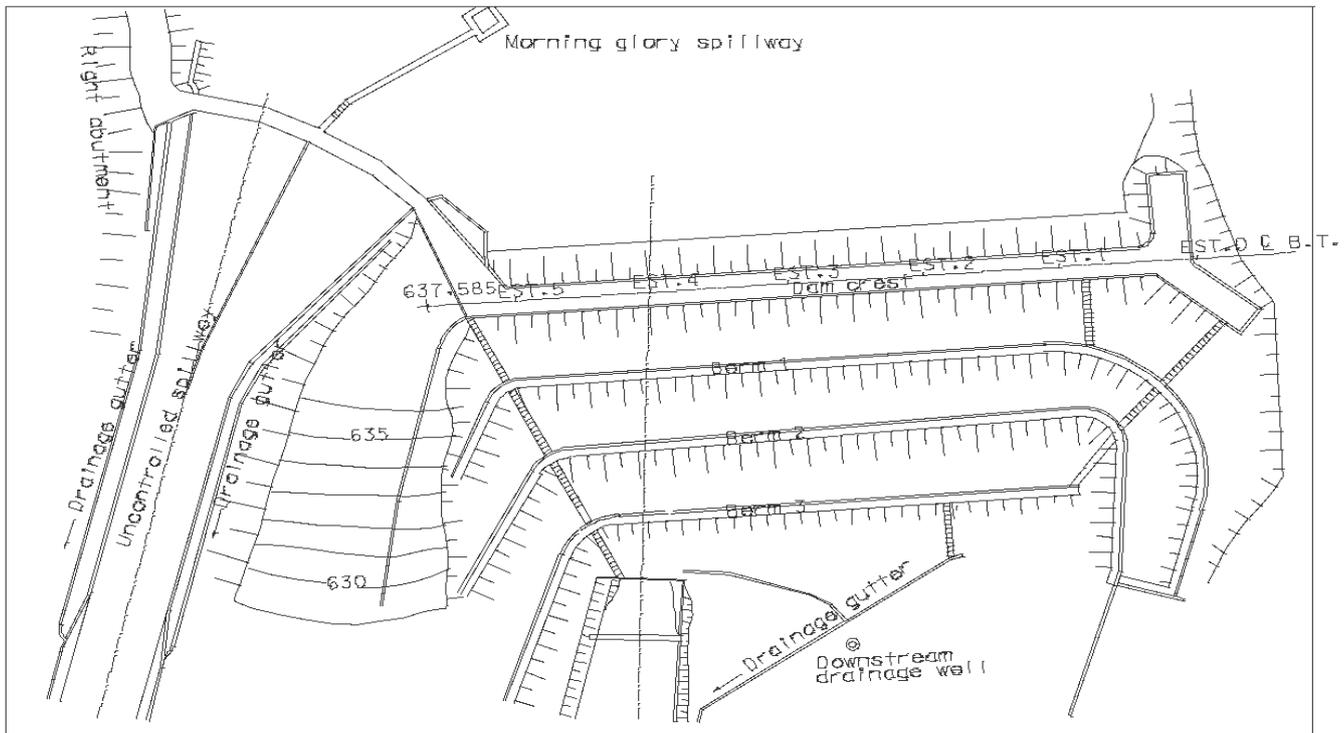
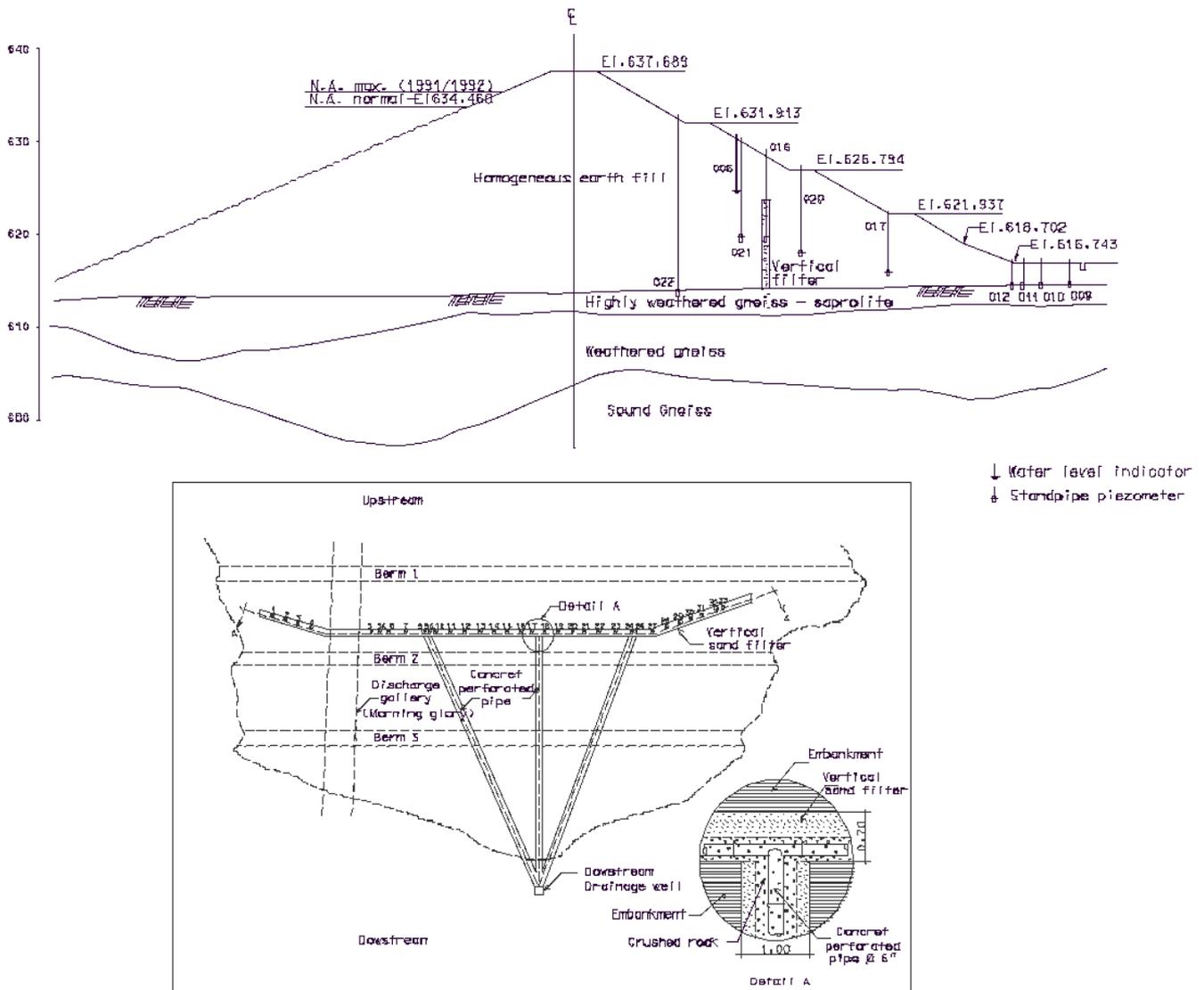


Figura 1. Barragem do Piau - Arranjo das estruturas de terra.

Desde a sua construção em 1950 até o presente, a barragem do Piau passou por diversas intervenções no sentido de melhorar o seu comportamento no sentido de melhorar e controlar a percolação pelo maciço, fundação e ombreira, especialmente a região da ombreira esquerda. Mas em 1979 especificamente a barragem de terra foi instrumentada inicialmente com 17 piezômetros tipo Casagrande (Tubo aberto) e 2 Medidores de Nível d'água (CBDB, 2006), como ilustrado nas figuras 2 e 3, a seguir.



Figuras 2 e 3. Detalhes do sistema de drenagem interno da barragem.

4.2 FALHA NA DRENAGEM

Com a execução desta drenagem profunda em 1979, a barragem apresentou um comportamento normal até 1997, quando os instrumentos instalados na mesma ombreira passaram a apresentar um comportamento anômalo. As cotas piezométricas começaram a aumentar, ao mesmo tempo em que o vertedouro de vazão, instalado no final do sistema de drenagem, registrava diminuição das vazões drenadas. Mas nenhum empoçamento ou surgência foi encontrado em inspeções visuais nesta região (CBDB, 2006).

A primeira providência tomada foi a execução de limpeza e ensaio de dissipação de carga em todos os piezômetros e medidores de nível d'água, onde constatou-se a operação normal destes instrumentos (CBDB, 2006).

Mediante este fato, em 2000 a CEMIG contratou a empresa de consultoria para fazer análises de percolação e estabilidade ao escorregamento da barragem e verificar as reais condições de segurança do maciço. Como as informações disponíveis sobre os materiais de construção eram insuficientes, foram executadas sondagens à percussão no maciço, com ensaio de SPT e instalação de piezômetros nos furos realizados. Foram coletados blocos indeformados em dois poços no aterro e executados ensaios. Os parâmetros de resistência representativos do maciço foram utilizados na análise de estabilidade ao escorregamento (CBDB, 2006), como mostra a tabela 1, a seguir.



Tabela 1. Performance dos ensaios Triaxiais

Item	Descrição	Número de amostras	Identificação das amostras	Tensão confinada (kg/cm ²)
1	Ensaio triaxial, consolidado, saturado, com medição da poropressão(CU _{sat})	3	Bloco 1 – PI1	0,5; 1,5; 3,0
		3	Bloco 2 – PI1	1,0; 2,5; 4,0
		3	Bloco 3 – PI2	0,75; 2,0; 3,5
2	Ensaio triaxial, consolidado, não saturado, com medição da poro pressão(CU)	2	Bloco 1 – PI1	0,5 ; 2,0
		2	Bloco 2 – PI1	1,5; 3,0
		2	Bloco 3 – PI2	1,0; 2,5

As Tabelas 2 e 3 mostram os parâmetros utilizados nas análises de estabilidade da barragem. As informações do maciço foram obtidas a partir de ensaios e as características da fundação e coeficientes de permeabilidade foram obtidas da experiência com materiais semelhantes (CBDB, 2006).

Tabelas 2 e 3. Parâmetros utilizados nas análises de estabilidade

Material	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_h (kN/m ³)	Parâmetros de resistência				Ensaio
			C' (kN/m ²)	Φ' (°)	C (kN/m ²)	Φ (°)	
Aterro saturado	19.1		3.5	35.1	132.7	13.2	CU _{sat}
Aterro ã saturado		1.92	56.0	28.7	76.5	23.8	CU
Saprolito de gnaisse	20		100	30	-	-	-
Gnaisse	20		100	45	-	-	-

Material	Coefficientes de permeabilidade
Aterro	$KH = 9K_v = 2.25 \times 10^{-8} \text{m/s}$
Filtro vertical	$KH = K_v = 3.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$
Fundação 1	$KH = K_v = 1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$
Fundação 2	$KH = K_v = 3.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$

O relatório final preparado pela contratada, concluiu que o nível d'água a jusante do filtro vertical estava alto, indicando mau funcionamento do sistema interno de drenagem devido à pequena capacidade de vazão do sistema de drenagem ou a alta permeabilidade do solo da fundação. Com relação aos níveis piezométricos, recomendou-se manter o monitoramento das leituras e que eventualmente seria necessário abrir poços de inspeção para verificar a possível colmatção da trincheira drenante (CBDB, 2006).

Em março de 2002, foi observada pelos barrageiros a presença de uma grande área úmida no pé da barragem, mostrada na Figura 4.

Ao mesmo tempo, a piezometria da barragem foi verificada, indicando que havia alcançado os níveis de alerta dos instrumentos. As informações dadas pelos instrumentos indicaram claramente que o sistema de drenagem localizado no talude de jusante estava com algum tipo de entupimento (CBDB, 2006)

Decidiu-se então, tentar desobstruir o sistema de drenagem construído em 1979. Através da manilha coletora da drenagem do filtro profundo, foi introduzido um desentupidor tipo "roto-rooter". Logo nos primeiros metros de extensão começou a sair um material gelatinoso e escuro, e à medida que a sonda ia sendo introduzida o material aumentava. A aproximadamente 18m de extensão houve resistência à introdução da sonda, quando de repente, começou a sair pela manilha, uma grande quantidade desse material gelatinoso juntamente com a areia do sistema de drenagem que envolvia a manilha. A vazão do dreno, instantaneamente aumentou cerca de 10 vezes. A Figura 5 mostra o dreno no momento da remoção da obstrução (CBDB, 2006).

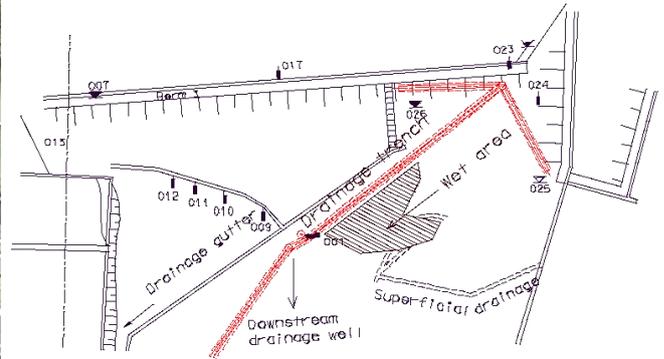


Figura 4. Localização da área úmida no talude jusante da barragem.

Todos os instrumentos foram continuamente monitorados durante a operação, e observou-se que os níveis dos instrumentos instalados no interior do dreno voltaram imediatamente aos valores normais, anteriores a janeiro de 1997. Os piezômetros mais próximos também tiveram seus níveis reduzidos (CBDB, 2006).



Figura 5. Medidor de vazão no momento da limpeza da drenagem.

A inspeção visual das manilhas da trincheira drenante de Piau, revelaram deterioração da parte superior, com depósitos de material precipitado no fundo e no nível da superfície da água, como mostrado na Figura 6. Acredita-se que o meio sem luz, tendo volumes semelhantes de ar e água, variação da temperatura entre 15 e 20° e um pH quase neutro, propiciaram condições para o crescimento das bactérias e a biodegradação do concreto (CBDB, 2006).

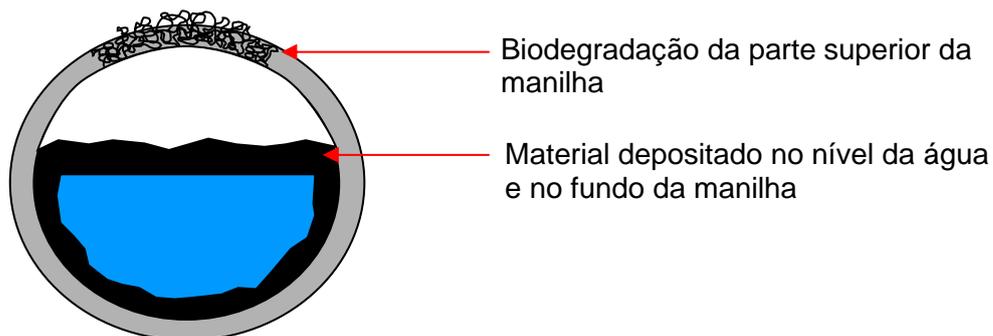


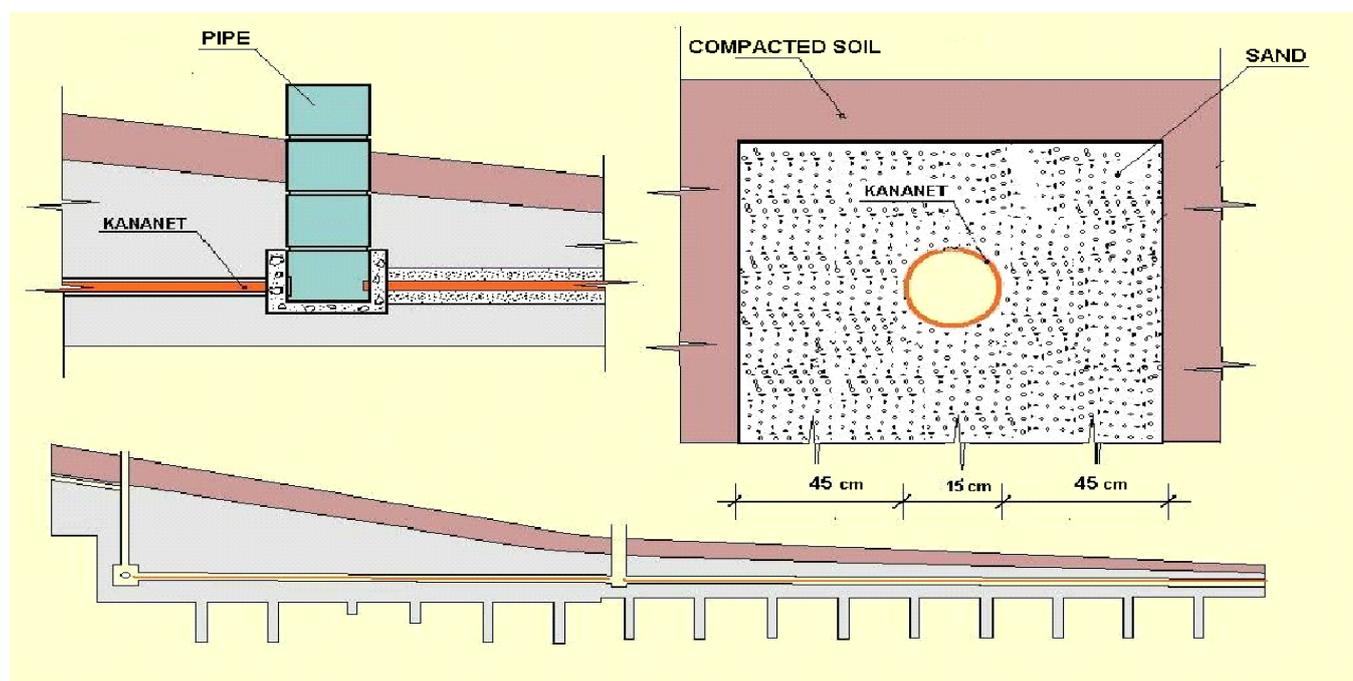
Figura 6. Aspectos da manilha porosa na área colmatada.



4.3 MEDIDAS CORRETIVAS

Após concluir que o sistema de drenagem havia sido entupido por bactérias, decidiu-se promover mudanças no sistema de drenagem localizado na ombreira esquerda da barragem. A trincheira de drenagem principal foi escavada a partir do medidor de vazão a jusante até o ponto onde a manilha estava decomposta. A manilha foi substituída por um tubo de PVC flexível de 6" (KANANET), resistente ao ataque de bactérias. Todo o trecho onde a manilha estava deteriorada foi recuperado. A montante, o PVC foi introduzido na manilha existente e ainda bem conservada. Na junção dessas duas partes, foi construído um poço de inspeção de 70 cm (CBDB, 2006).

A areia foi compactada em camadas de 20 cm usando água e compactadores manuais. A cobertura da trincheira foi executada em solo, com camadas compactadas de 7 cm. A geometria da saída da trincheira drenante foi modificada, permitindo a aeração (CBDB, 2006), como mostradas nas Figuras 7, 8 e 9.



Figuras 7, 8 e 9. Reparo na trincheira drenante e detalhe do KANANE.

Considerações Finais

As barragens são essenciais para a vida humana, pode-se dizer que, além de outros fatores, as barragens são bases para o desenvolvimento da humanidade, mas é um ramo da engenharia de grande complexidade que compõe vários temas multidisciplinares, pois caso haja um acidente, poderá ter sérios danos não limitando apenas em bens materiais, mais também ambientais e sociais.

Neste trabalho, podemos avaliar a importância da instrumentação na segurança de barragem. Conforme no estudo de caso apresentado, podemos avaliar que através dos instrumentos instalados em 1979, foi possível conhecer a real iminência de uma ruptura da barragem, ocasionado por uma falha no sistema de drenagem.



Referências Bibliográficas

- AFFONSO, H. M. M. Instrumentação para medir deslocamentos em barragens de enrocamento. 2004, 94f. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)** - PUC Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia Civil, 2004.
- ALMEIDA, Marínis Maria - Estudo de Tensão Deformação de Barragem de Terra e Enrocamento - **Dissertação (Mestrado em Geotecnia)** - UFOP Ouro Preto Departamento de Geotecnia de Barragens, 2010.
- MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. Manual de Segurança e Inspeção de Barragens. Brasília, DF: MINC, 2002. p. 148.
- COFFIN, V. **Risk assessment of tailings areas at Noranda. Case studies on tailings management.** UNEP-ICME, 1998, p. 44-45.
- COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS - CBDB. Comunicação pessoal, tratando de projeto de lei sobre segurança de barragens, 2004.
- COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS - CBDB. Monitoramento na Prevenção de Acidentes - Caso de Uhe Piau III Simpósio sobre Instrumentação de barragens. São Paulo, SP, 2006.
- DISE, K; VICK, S. **Dam safety risk analysis for Navajo dam. Commission Beijing: Internationale des Grands Barrages.** ICOLD, 2000.
- DUARTE, Anderson Pires, Classificação de Barragens de Contenção de Rejeitos de Mineração e de Resíduos Industriais no Estado de Minas Gerais em Relação ao Potencial de Risco, 2008, 10f. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)** - UFMG Belo Horizonte Departamento de Engenharia Civil, 2008.
- KANJI, M. A.; FIGUEIRA, P. C. S. Quantificação tentativa do uso de instrumentação em barragens. In: **SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA DE CAMPO - SINGEO'90.** Rio de Janeiro: ABMS, 1990, p. 119-128.
- KUPERMAN, S. C.; RE, G.; FERREIRA, W. V. F.; TUNG, W. S; VASCONCELOS, S. E; ZÚÑIGA, J. E. V. Análise de risco e metodologia de tomada de decisões para barragens: evolução do sistema empregado pela SABESP. In: **SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS**, 24. 2001, Fortaleza: CBDB, 2001, v. 4, p. 79-82.
- LADEIRA, Josias Eduardo Rossi. Avaliação de Segurança em Barragem de Terra, Sob o Cenário de Erosão Tubular Regressiva, por Métodos Probabilísticos, o CASO UHE - São Simão. **Dissertação (Mestrado em Saneamento)** - UFMG, Belo Horizonte, Departamento de Engenharia, 2007.
- MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. Diretrizes Ambientais para Projeto e Construção de Barragens e Operação de Reservatórios. Ministério da Integração Nacional, Secretaria de Infraestrutura Hídrica, Unidade de Gerenciamento do Proágua/Semi-árido. Brasília: **Bárbara Bela Editora Gráfica e Papelaria LTDA**, 2005.
- OLIVEIRA, Jader R. C. Manual para Inspeção e Controle da Segurança de Pequenas Barragens de Terra. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)** - UFMG, Belo Horizonte, Departamento de Engenharia Civil, 2008.
- SANTANA, Helber Luiz. **Segurança de Barragens Monitorado por Instrumentação. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil.** UNIUBE, Uberaba, 2012.
- SIWIK. Tailings management: roles and responsibilities. In: **PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL WORKSHOP ON MANAGING THE RISKS OF TAILINGS DISPOSAL.** Stockholm: ICME/UNEP, 1997, p. 143-158.



ANÁLISE DOS CRITÉRIOS UTILIZADOS NA IMPLEMENTAÇÃO DO INSTRUMENTO DE OUTORGA PARA LANÇAMENTO DE EFLUENTES NOS ESTADOS BRASILEIROS

1Nathalya Dala Zen Pires, 2Marco Antonio Jacomazzi, 3Fábio Tomasella Johansson

1Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: nathalya.zen@gmail.com; 2Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: marcoantonio@rasa.eng.br; 3Departamento de Engenharia de Biosistemas, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ/USP, e-mail: fabiotomasella23@gmail.com

Palavras-chave: Outorga de lançamento de efluentes, parâmetros para outorga, vazão de diluição

Resumo

Os lançamentos de forma contínua e progressiva, não regulamentado, de cargas poluidoras nos cursos d'água, podem suplantam a capacidade de suporte desses mananciais, acelerando a degradação do recurso natural e causando indisponibilidade hídrica por qualidade. A outorga de uso é um instrumento de gestão que autoriza o seu usuário a derivar determinada vazão dos cursos de água, assegurando o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água, sendo que o lançamento de efluentes é um dos usos sujeitos a outorga cujos critérios de deferimento devem garantir manutenção dos parâmetros de qualidade do manancial e, assim, assegurar os usos preponderantes planejados para a bacia. Quando não há critérios técnicos para outorga de lançamento de efluentes, esses são analisados segundo os padrões de qualidade deste efluente, frente a capacidade de suporte do corpo hídrico receptor, desconsiderando os demais lançamentos existentes na bacia. Essa forma isolada de controle de lançamento de efluentes, ocasiona degradação do recurso hídrico, comprometendo também o atendimento ao enquadramento do rio. Embora haja legislação acerca da outorga de lançamento de efluentes para os rios da União, cada estado deve definir os critérios que utilizará para esse tipo de concessão. Este trabalho teve como objetivo levantar os diferentes critérios para a outorga de lançamento de efluentes adotados nos estados da federação, por meio da consulta à legislação vigente sobre recursos hídricos e, assim, avaliar a efetiva implementação desse instrumento pelo Brasil. Foram buscados nas legislações, planos de bacia, sites dos órgãos estaduais gestores de recursos hídricos as seguintes informações: vazão máxima outorgável, à vazão de referência e o critério estabelecido para a outorga de diluição. Este estudo permitiu concluir que o instrumento apresenta diversos critérios para a sua avaliação, tanto para diferentes parâmetros, quanto para diferentes metodologias. Atualmente são utilizadas 6 vazões de referência distintas para vazão de referência, sendo que a maioria dos estados utilizam a Q_{90} , seguido pela Q_{95} e $Q_{7,10}$. Quanto aos parâmetros utilizados para a análise da concessão de outorga, a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) é a mais utilizada, seguida pela temperatura e Oxigênio Dissolvido (OD), em ambientes lenticos ou sujeitos à eutrofização 7 estados e a União utilizam os parâmetros de nitrogênio e/ou fósforo. Um estado utiliza os parâmetros da Resolução CONAMA 430/11 e um utiliza os critérios para o licenciamento. Em 8 estados, não foi encontrada na legislação quais são os parâmetros para outorga, indicando que o instrumento de outorga para lançamento de efluentes ainda não está implementado. Apenas 33% dos estados vincula a outorga de lançamento de efluentes às metas de enquadramento. É necessário que todos os estados do país implementem o instrumento de outorga para lançamento de efluentes, de modo a possuírem critérios estabelecidos para um melhor controle da qualidade das águas de seus rios.

Introdução

A água é um recurso amplamente abundante em nosso planeta; no entanto, o volume de água doce disponível é limitado. Apesar de exceder as necessidades globais de consumo da população, sua distribuição é notadamente irregular, tanto em termos espaciais quanto temporais. Os corpos d'água possuem a capacidade intrínseca de recuperar muitas de suas características e estabelecer um novo estado de equilíbrio por meio de um conjunto de processos naturais denominados autodepuração. Porém, caso a carga poluidora lançada seja maior que a capacidade de recuperação do manancial, poderão ocorrer danos irreversíveis neste ecossistema (ARAÚJO; SANTAELLA, 2003).

No início deste século, o Brasil experimentou um crescimento econômico, resultando em um aumento significativo na demanda por recursos hídricos, concomitantemente, as atividades empresariais, que dependem consideravelmente da água em seus processos produtivos, também contribuem para a geração de resíduos que são descartados nos corpos d'água. A poluição causada por estes despejos pode alcançar os mananciais de forma pontual ou difusa, sendo esta última mais difícil de quantificar e controlar (MOTA, 2000). Dependendo da quantidade de efluente lançado, bem como da concentração dos diversos poluentes, o lançamento poderá ser incompatível com os demais usos antrópicos da água, ou com os objetivos de qualidade que a sociedade determinou por meio do enquadramento dos corpos de água (SILVA, 2007).

O lançamento contínuo e progressivo, não regulamentado, de cargas poluidoras nos cursos d'água, podem suplantam a capacidade de suporte desses mananciais, acelerando a degradação da qualidade do recurso natural e causando indisponibilidade hídrica; conforme discutido em Porto (2012), as principais fontes de poluição por cargas pontuais são os esgotos domésticos e os efluentes industriais. A Resolução CONAMA nº 430/11 dispõe sobre condições, parâmetros, padrões e diretrizes para gestão do lançamento de efluentes em corpos de água receptores, alterando parcialmente e complementando a Resolução CONAMA nº 357/05 (Artigo 1º); na ausência de outras legislações ou normas específicas, disposições dos órgãos ambientais competentes, o



lançamento de efluentes domésticos e industriais deverá observar os dispositivos desta resolução, já que é também a resolução que embasa o instrumento de enquadramento de corpos hídricos.

Segundo os artigos 16º a 21º, os efluentes somente poderão ser lançados no corpo hídrico receptor desde que atendam, minimamente, as principais condições: (i) pH entre 5 a 9; (ii) temperatura do efluente no lançamento inferior a 40°C; (iii) materiais sedimentáveis no teste do cone Imhoff até 1 mL/L; (iv) vazão máxima de lançamento de até 1,5 vezes maior que a defluência média diária e v) remoção mínima de 60% da carga orgânica lançada no efluente, medida por meio da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO 5 dias a 20°C). No caso de efluentes domésticos, oriundos de estações de tratamento de esgoto (ETE), além das condições descritas anteriormente, a máxima concentração da carga orgânica do lançamento deverá ser igual ou menor a 120 mg/L da DBO 5 dias a 20°C.

Segundo o Artigo 1º da Resolução ANA nº 219 de 6 de junho de 2005, “na análise técnica para emissão de outorga de direito de uso de recursos hídricos para fins de lançamento de efluentes em cursos d’água de domínio da União, somente serão avaliados os parâmetros relativos à Temperatura, à Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO e, em locais sujeitos à eutrofização, ao Fósforo ou ao Nitrogênio”.

A base legal para a outorga de diluição de efluentes está na política nacional de recursos hídricos, Lei nº 9.433, que inclui no art. 12, § III, entre os usos sujeitos à outorga o lançamento de efluentes para fins de sua diluição, transporte ou disposição final. A outorga para lançamento de efluentes é regulamentada pela Resolução nº 16/01 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). A lei determina que toda a outorga deve respeitar a classe de enquadramento vigente, criando, com isso, uma clara vinculação entre os dois instrumentos. Além disso, o objetivo da outorga é assegurar o controle quali-quantitativo dos usos da água, denotando claramente a inter-relação existente entre esses dois instrumentos. Devido ao passivo que ainda se tem na coleta e tratamento de esgotos no Brasil, o sistema de gestão das águas brasileiras reconhece que uma parte delas deve estar disponível para a diluição das cargas efluentes (ANA, 2019). A outorga de direito de uso da água é um dos principais instrumentos de gestão para controle quantitativo e qualitativo dos recursos hídricos. Para sua implantação, é necessário, entre outras ações, definir critérios e desenvolver ferramentas para análise integrada dos aspectos quantitativos e qualitativos da água (LISBOA *et al.*, 2019).

Os padrões de emissão de efluentes são definidos pela Resolução CONAMA 430/2011 que estabelece carga máxima permitida de poluente a ser lançada no corpo hídrico receptor; já a outorga para diluição prioriza a qualidade desse corpo hídrico, devendo estabelecer critérios para deferir sobre a vazão de lançamento.

Atualmente, existe um descompasso entre a implementação da outorga para diluição de efluentes nos diferentes órgãos gestores do País. Com isso, muitos lançamentos de efluentes atualmente existentes não têm sua adequação ao enquadramento local verificada. Tendo em vista que o balanço quali-quantitativo da outorga deveria retratar a realidade das bacias, este descompasso não é desejável, razão pela qual é importante que o instrumento da outorga de diluição de efluentes, vinculado ao enquadramento, seja implementado em todas as Unidades da Federação.

O instrumento de gestão do enquadramento dos corpos d’água e a outorga de lançamento são fortemente vinculados, assim, a metodologia mais comumente usada para quantificar a outorga de diluição de efluentes é a de vazão de diluição, ou seja, o cálculo da descarga líquida necessária para diluir um parâmetro específico até a concentração permitida pelo enquadramento. Esta abordagem possibilita a integração entre os dois instrumentos, além de permitir que um uso não-consuntivo (a diluição de efluentes) seja tratado em termos de uma vazão, portanto comparável com outros usos consuntivos existentes na mesma bacia (ANA, 2019).

Quando não há critérios técnicos para outorga de lançamento de efluentes, esses são analisados segundo os padrões de qualidade deste efluente, frente a capacidade de suporte do corpo hídrico receptor, desconsiderando os demais lançamentos existentes na bacia. Essa forma isolada de controle de lançamento de efluentes, ocasiona à degradação do recurso hídrico, comprometendo também o atendimento ao enquadramento do rio.

O conceito de vazão de diluição pode ser investigado e estimado por meio de diversas metodologias, como as propostas por Kelman (1997) e Nahon (2006), as quais apresentam uma considerável extensão temporal em seus métodos de cálculo. A vazão de diluição é calculada pelo balanço qualitativo de um lançamento com determinada concentração para o parâmetro avaliado; é interpretada como uma descarga virtual necessária para diluir a concentração do parâmetro adicionado ao manancial, de modo que a concentração resultante dessa mistura seja igual à permitida.

Como critério para outorga de lançamento, a Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA) adota o conceito de vazão indisponível, conforme descrito na Resolução CNRH nº 140 de 21 de março de 2021; segundo Cardoso da Silva e Monteiro (2004), esse conceito deriva da proposta da vazão de diluição de Kelman (1997), sendo essa vazão calculada pelo somatório de diluição e da vazão de lançamento de efluentes; essa vazão indisponível é virtualmente “retirada” do manancial para uso na diluição do lançamento adicionado ao corpo hídrico e, portanto, reduziria a disponibilidade hídrica, segundo o balanço hídrico qualitativo.

Este trabalho tem como objetivo levantar os diferentes critérios para a outorga de lançamento de efluentes adotados nos estados da federação, por meio da consulta aos órgãos gestores e à legislação vigente sobre recursos hídricos e, assim, avaliar a efetiva implementação desse instrumento no Brasil.

Material e métodos

Este estudo buscou elaborar análise comparativa entre as diferentes abordagens para a outorga de lançamento de efluentes nos rios federais e estaduais, no que concerne à vazão de lançamento máxima outorgável, à vazão de referência e os critérios estabelecidos para essa modalidade de outorga; quando a unidade da federação já dispunha de legislação específica



foram detalhados, principalmente os parâmetros e as metodologias utilizadas; paralelamente foi possível rastrear quais estados apresentam essa modalidade de outorga estabelecida, que apresentam critérios operacionais críveis e os outros que não conseguiram implementá-la ainda.

Inicialmente, a pesquisa de informações será por meio de consulta aos órgãos estaduais gestores de recursos hídricos e responsáveis pela outorga de uso; também serão consultados sites de comitês e das agências de bacias quando existirem. Após análise das autarquias e instituições responsáveis, será consultada a legislação estadual de recursos hídricos, da respectiva política estadual de recursos hídricos (PERH) às, portarias, decretos e resoluções associadas. Por fim serão estudadas as informações necessárias para preenchimento dos requerimentos de outorga de uso, consulta aos manuais de outorga e demais materiais disponíveis para elaboração dos processos técnicos e administrativos.

Por meio dessa consulta aos órgãos gestores serão identificados os critérios utilizados nas diferentes unidades da federação, procurando compará-los e, assim, verificar se há uniformidade quanto aos parâmetros de qualidade avaliados nas outorgas e quais os principais critérios utilizados nessas autorizações.

A partir do levantamento de informações pertinentes serão elaboradas tabelas e gráficos ilustrando os resultados e, por meio de índices estatísticos descritivos, será avaliado a proposição desses critérios nos estados da federação.

Resultados e discussão

A Tabela 1 apresenta o resultado da busca das vazões de referência e a derivação máxima permitida para a União, os 26 estados e o distrito federal; conforme esses dados, a maioria dos estados utiliza como critério de derivação máxima permitida, percentuais da vazão de referência.

Tabela 1 - Vazões de referência e derivação máxima permitida na União e nos estados brasileiros

Região	Estado	Vazão mínima de referência	Derivação máxima permitida
União		Q95 anual e mensal	70% da Q95
NO RT E	AC	Q90	Sem informação
	AP	Q7,10	70% da Q7,10
	AM	Q95	75% da Q95 e 20% da Q95 por outorga
	PA	Q95	50% da Q95
	RO	Q95	70% da Q95
	RR	Q7,10, Q90 ou QL	80% das vazões de referência ou 80% das vazões regularizadas
	TO	Q90	75% da Q90
	NO RD EST E	AL	Q90
BA		Q90	50% da Q90; não podendo exceder 20% da Q90 por outorga
CE		Q90	Sem informação
MA		Q90	50% da Q90 (desde que com 90% de remoção de DBO)
PB		Q90	9/10 da Q90
PE		Q95	Sem informação
PI		Q95	80% da Q95
RN		Q90	9/10 da Q90
SE		Q90	Sem informação
CEN TRO- OES TE		DF	Qmmm
	GO	Q95	70% da Q95
	MT	Q95	70% da Q95
	MS	Q95	50% da Q95
SUDE STE	ES	Q90	50% da Q90
	MG	Q7,10	50% da Q7,10, por empreendimento
	RJ	Q95	40% da Q95
	SP	Q7,10	50% da Q7,10
SUL	PR	Q95	Qoutorgável i = 0,5.(Q95%)i – Qindisponível i
	RS	Q90	50% da Q90



SC

Q98

50% da Q98 (sem conflitos); 20% da Q98 (individual) até 80% da Q98 (consumo humano)

A Figura 1 apresenta contabilização dos critérios para as vazões de referência utilizadas nos estados. Atualmente são utilizados 6 critérios distintos para a vazão de referência, sendo que a maioria dos estados utilizam a Q90, seguido pela Q95 e apenas 4 estados utilizam a vazão mínima de sete dias consecutivos, associada ao tempo de retorno de 10 anos (Q7,10); a ANA, orienta utilização da Q95 como vazão de referência para outorga, permitindo derivação máxima de 70% desta. Existe uma grande variedade de vazões de referência utilizadas no país, desde vazões menos restritivas, como é o caso da Q90, até vazões mais restritivas, como o estado de Santa Catarina, que utiliza a Q98 (estado de SC – Tabela 1).

Avaliando as unidades que adotam a Q90 como vazão de referência (Tabela 1), é observado que esse critério está concentrado nos estados das regiões Norte e Nordeste, enquanto ou a Q95, ou a Q7,10 são adotadas para, principalmente nas regiões Sudeste e Centro-Oeste.

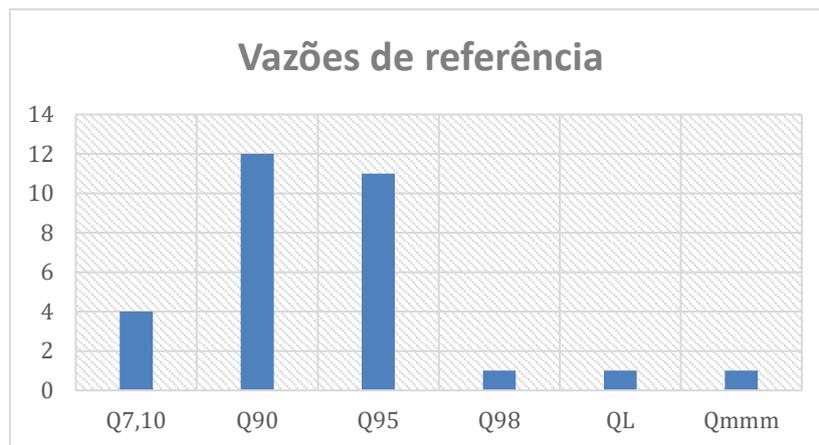


Figura 1: Vazões de referência utilizadas nos estados brasileiros e na União.

A segunda etapa da pesquisa consistiu na identificação dos parâmetros de qualidade e metodologias utilizados nos diferentes estados brasileiros e pela União. Quanto aos parâmetros, a Figura 2 mostra que o mais utilizado é a DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), seguida pela temperatura e OD (oxigênio dissolvido). Para ambientes lênticos ou sujeitos à eutrofização 7 estados e a União utilizam nitrogênio e/ou fósforo. Em um estado se utilizam os parâmetros da Resolução CONAMA 430/11 e os critérios para o licenciamento. Cabe destacar que quando o estado não define um parâmetro específico para a análise da outorga de lançamento de efluentes, pode-se inferir que não é tecnicamente viável a análise efetiva das condições de diluição de todos os parâmetros estabelecidos na Resolução CONAMA ou nas licenças dos empreendimentos. Em 8 estados, não foi encontrada na legislação quais são os parâmetros para outorga, indicando que o instrumento de outorga para lançamento de efluentes ainda não está amplamente implementado.

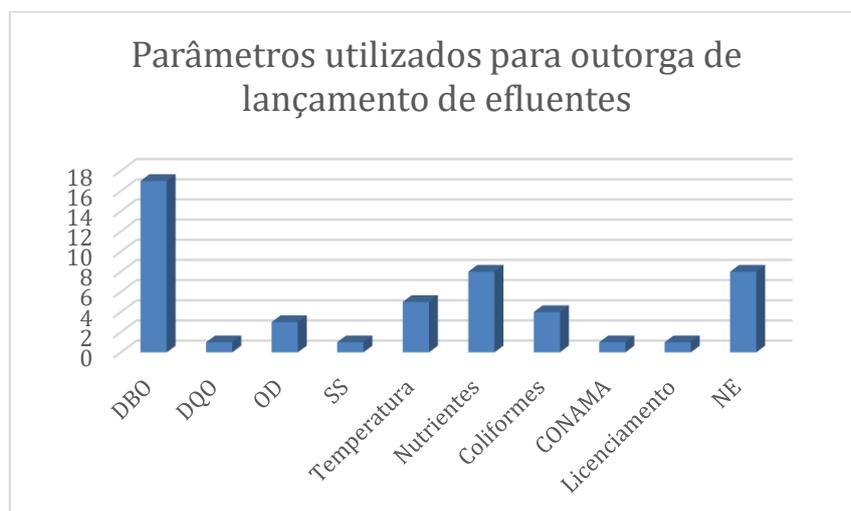


Figura 2: Parâmetros utilizados como critério para outorga de lançamento de efluentes nos estados brasileiros e na União.

Na Tabela 2 está o resultado da busca pelos parâmetros e metodologias utilizados para a concessão de outorga para



lançamentos de efluentes para a União, os 26 estados e o distrito federal; a maioria dos estados utiliza como variável outorgável a vazão de diluição, proposto por Kelman (1997), dois outorgam a vazão de lançamento, desconsiderando aspectos da carga lançada e as demais unidades não definiram critérios específicos quantitativos para essa outorga.

Houve uma grande dificuldade para encontrar as metodologias utilizadas, tendo em vista que muitos estados nem sequer implementaram o instrumento de outorga para lançamento de efluentes. Embora muitos tenham os parâmetros definidos, a metodologia de avaliação ainda é incipiente e não está bem definida na maioria dos estados.

Tabela 2 – Parâmetros e metodologias utilizados como critérios para concessão de outorgas para lançamentos de efluentes na União e nos estados brasileiros

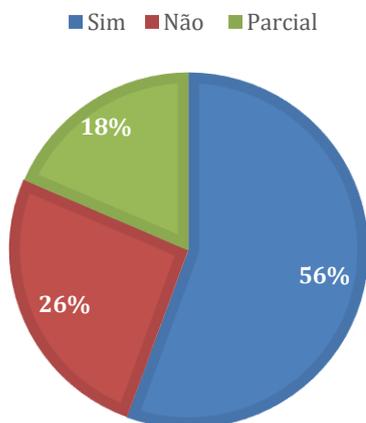
Região	Estado	Parâmetro avaliado	Variável outorgável	Outros critérios
União		DBO e Temperatura e Fósforo para reservatórios	vazão de diluição	-
NORTE	AC	Não especificado	-	-
	AP	DBO e temperatura; fósforo e nitrogênio para locais sujeitos a eutrofização	vazão de diluição	não especificado
	AM	DBO	vazão de diluição	não especificado
	PA	DBO, Coliformes Termotolerantes e, em locais sujeitos à eutrofização, o Fósforo ou o Nitrogênio	não especificado	não especificado
	RO	Resolução CONAMA nº 430/2011	não especificado	não especificado
	RR	Não especificado	não especificado	não especificado
	TO	Não especificado	não especificado	não especificado
	NORDESTE	AL	Não especificado	não especificado
BA		DBO e Coliformes Termotolerantes em cursos de água; Nitrogênio e Fósforo para ambientes sujeitos a eutrofização.	Vazão de diluição (metodologia de Kelman, 1997)	Estudo de monitoramento DBO; Metas progressivas para DBO e coliformes totais
CE		Não especificado	não especificado	não especificado
MA		DBO e OD	OD por metodologia de Streeter-Phelps	não especificado
PB		DBO	não especificado	Metas progressivas para alcance da melhoria da qualidade da água, com prazo máximo total de até 10 anos
PE		DBO, OD, N total, P total e coliformes totais	não especificado	instrumentos de suporte à decisão
PI		De acordo com a concentração limite prevista no licenciamento	não especificado	não especificado
RN		DBO e temperatura	não especificado	não especificado
SE		Laudo de análise de cloretos, coliformes termotolerantes, nitritos, nitratos, oxigênio dissolvido, pH, potássio, STD, Salinidade, DBO (água doce), COT (água salobra ou salina) e turbidez.	não especificado	não especificado
CENTRO-OESTE		DF	DBO e Temperatura	vazão de diluição
	GO	Não especificado	vazão de diluição	-
	MT	DBO; Fósforo e Nitrogênio em ambientes sujeitos eutrofização (Lênticos)	vazão de diluição	



	MS	DBO, Temperatura; Fósforo e Nitrogênio em ambientes sujeitos eutrofização (Lênticos)	vazão de diluição	-
SUDESTE	ES	DBO, Fósforo (ambientes lênticos) e OD	vazão de diluição	Concentração máxima na mistura de 5mg/L ou indicados pelo enquadramento; OD maior ou igual a 4 mg/L, após lançamento
	MG	DBO	vazão de diluição	Concentração DBO da mistura deverá, no limite, atender enquadramento
	RJ	DBO, utilizado apenas para cobrança	vazão de lançamento	não especificado
	SP	DBO, utilizado apenas para cobrança	vazão de lançamento	não especificado
SUL	PR	DBO, DQO e SS	Vazão indisponível	Metas progressivas de QA for maior que a Qoutorgável
	RS	Não especificado	não especificado	não especificado
	SC	Não especificado	não especificado	não especificado

Por fim, foi analisado se o estado implementa o instrumento de enquadramento e se considera metas do enquadramento para a aplicação da outorga de lançamento de efluentes. Os resultados dessa análise são apresentados na Figura 3.

O ESTADO DISPÕES DE ENQUADRAMENTO?



CONSIDERA METAS DO ENQUADRAMENTO?

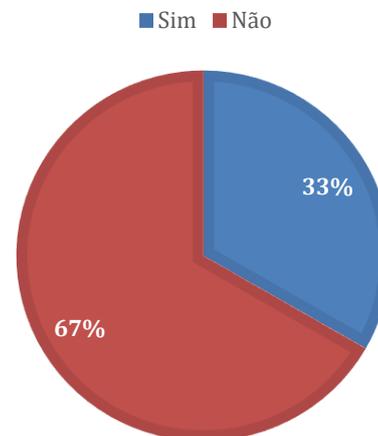


Figura 3: Avaliação do instrumento de enquadramento nos estados.

Comentários finais

Este estudo se propôs a avaliar a situação da implementação do instrumento de outorga para lançamento de efluentes nos estados, distrito federal e na União. Foi verificado a partir de ampla pesquisa na legislação dos estados, que o instrumento apresenta diversos critérios para a sua avaliação, tanto para os parâmetros, quanto para as metodologias. Destacam-se os estados do Paraná e da Bahia, o primeiro apresenta metodologia bem definida e detalhada, implementada numa plataforma SIG para auxiliar na avaliação; já a outorga de lançamento na Bahia abarca metas progressivas para redução das cargas. Estados com metodologias bem definidas servem de base para os demais, que podem aprender ou aprimorar as técnicas desses estados para realizar a implementação de um instrumento tão importante para a qualidade dos rios. É necessário que todos os estados do país implementem o instrumento de outorga para lançamento de efluentes, de modo a possuírem critérios estabelecidos para um melhor controle da qualidade das águas de seus rios, proporcionando efetivo tanto quantitativo, quanto qualitativo da disponibilidade hídrica dos cursos d'água.



Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, agradeço também ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua, Projeto CAPES/ANA AUXPE N°. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

Referências Bibliográficas

- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Outorga dos direitos de uso de recursos hídricos. Brasília, 2019.
- APAC. AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. Resolução n° 02/2021 – DC, de 16 de abril de 2021. Normatiza as Tipologias de Serviço, Interferência e Finalidade de Uso relacionados com a regularização de uso dos recursos hídricos para emissão de Outorga e dá outras providências.
- ARAÚJO, J. C.; SANTAELLA, S. T. Gestão da Qualidade. In: CAMPOS, N.; STUDART, T. Gestão das águas: princípios e práticas. Porto Alegre: ABRH, 2003. p. 159-180.
- BRASIL. Lei Federal n.º 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 8 jan. 1997.
- BRASIL. Resolução n.º 140 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), de 21 de março de 2012. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 21 março 2012.
- BRASIL. Resolução n.º 16 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), de 8 de maio de 2001. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 8 maio 2001.
- BRASIL. Resolução n.º 219 da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), de 6 de junho de 2005. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 6 junho 2005.
- BRASIL. Resolução n.º 430 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), de 13 de maio de 2011. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 13 maio 2011.
- CARDOSO da SILVA, L.M.C.; MONTEIRO, R.A. Outorga de direito de uso de recursos hídricos: uma das possíveis abordagens. In: Carlos José Saldanha Machado. (Org.). Gestão de Águas Doces. 1ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2004, v. 1, p. 135-178.
- CENERH. CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS. Resolução n° 96 de 25 de fevereiro de 2014. Estabelece diretrizes e critérios gerais para a outorga do direito de uso dos recursos hídricos de domínio do Estado da Bahia, e dá outras providências.
- CERH. CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS. Deliberação Normativa n° 26, de 18 de dezembro de 2008. Dispõe sobre procedimentos gerais de natureza técnica e administrativa a serem observados no exame de pedidos de outorga para o lançamento de efluentes em corpos de água superficiais no domínio do Estado de Minas Gerais.
- CERH/AP. CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DO AMAPÁ. Resolução n°. 012, de 25 de outubro de 2022. Estabelece os critérios técnicos para emissão de outorga para fins de Lançamento de Efluentes em corpos hídricos de domínio do Estado do Amapá e demais providências.
- CMATIC - CONSELHO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE, CIÊNCIA E TECNOLOGIA. Resolução CEMACT n° 4 de 17/08/2010. Regulamenta a concessão outorga provisória e de direito de uso dos recursos hídricos no Estado do Acre.
- CONERH/MA - CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DO MARANHÃO. Resolução CONERH n° 57 DE 21/05/2019. Estabelece os critérios gerais para a Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos e dá outras providências.
- CONERH/MA - CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DO MARANHÃO. Resolução CONERH n° 103 DE 17/12/2020. Dispõe sobre Critérios Técnicos para Outorga de Lançamento de Efluentes Provenientes de Empreendimentos de Saneamento Básico, Públicos e Privados com fins de Diluição em Corpos de Água Superficiais de Domínio do Estado do Maranhão.
- CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DO PARÁ. CERH/PA. Resolução CERH n° 10, de 03 de setembro de 2010 doe n° 31.770, de 11/10/2010. Dispõe sobre os critérios para análise de Outorga Preventiva e de Direito de Uso de Recursos Hídricos e dá outras providências.
- CRH. CONSELHO DE RECURSOS HÍDRICOS. Resolução CRH n° 141, de 21 de março de 2014. Institui o Plano Estadual de Recursos Hídricos do estado do Rio Grande do Sul – PERH/RS.



ESTADO DO MATO GROSSO DO SUL. Decreto nº 13.990, de 2 de julho de 2014. Regulamenta a outorga de direito de uso dos recursos hídricos, de domínio do Estado de Mato Grosso do Sul.

GOVERNO DA PARAÍBA. Resolução nº 08, de 01 de março de 2010. Estabelece critérios de metas progressivas obrigatórias de melhoria de qualidade de água para fins de outorga para diluição de efluentes em cursos de água de domínio do Estado da Paraíba.

GOVERNO DO DISTRITO FEDERAL. Decreto nº 22.359, de 31 de agosto de 2001. Dispõe sobre a outorga de direito de uso de recursos hídricos no território do Distrito Federal e dá outras providências.

GOVERNO DO ESTADO DE ALAGOAS. Decreto nº 6, de 23 de janeiro de 2001. Regulamenta a outorga de direito de uso de recursos hídricos prevista na Lei nº 5.965 de 10 de novembro de 1997, que dispõe sobre a política estadual de recursos hídricos, institui o sistema estadual de gerenciamento integrado de recursos hídricos e dá outras providências.

GOVERNO DO ESTADO DE ALAGOAS. Instrução Normativa SEMARH nº 1 DE 30/05/2018. Estabelece critérios e padrões de lançamento para análise técnica de outorga na modalidade lançamento de efluentes no Estado de Alagoas.

GOVERNO DO ESTADO DE RORAIMA. Decreto nº 8.123-e de 12 de julho de 2007. “Regulamenta o inciso III, do artigo 4º, bem como os artigos 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77 e 78 da Lei nº 547, de 23 de junho de 2006, que dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos e institui o Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos”

GOVERNO DO ESTADO DE SANTA CATARINA. Decreto n.º 4.778 de 11 de outubro de 2006. Regulamenta a outorga de direito de uso de recursos hídricos, de domínio do Estado, de que trata a Lei Estadual nº 9.748, de 30 de novembro de 1994, e dá outras providências.

GOVERNO DO ESTADO DE SANTA CATARINA. Portaria SDS nº 51, de 02 de outubro de 2008. ALTERA a Portaria SDS nº 36, de 29 de julho de 2008.

GOVERNO DO ESTADO DO AMAZONAS. Portaria Normativa/SEMA/IPAAM nº 01/2016. Dispõe sobre os procedimentos administrativos e documentação necessária para emissão de outorga de direito de uso de recursos hídricos, no âmbito do estado do Amazonas, bem como sua respectiva dispensa.

GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ. Decreto Nº 23.067, de 11 de fevereiro de 1994. Regulamenta o artigo 4º da Lei nº 11.996, de 24 de julho de 1992, na parte referente à outorga do direito de uso dos recursos hídricos, cria o Sistema de Outorga para Uso da Água e dá outras providências. Regulamenta o artigo 4º da Lei nº 11.996, de 24 de julho de 1992, na parte referente à outorga do direito de uso dos recursos hídricos, cria o Sistema de Outorga para Uso da Água e dá outras providências.

GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ. Estudos de análise e integração dos instrumentos de gestão com foco na outorga, cobrança e fiscalização. Relatório 09 – volume outorgado. Maio/2017.

GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ. Outorga e licença de obras hídricas - Manual de Procedimentos. Fortaleza – CE.

GOVERNO DO ESTADO DO MATO GROSSO. Resolução nº 27, de 09 de julho de 2009. O Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CEHIDRO), no uso de suas atribuições legais, que lhe conferem a Lei nº 6.945, de 05 de novembro de 1997, o Decreto Estadual nº 3.952, de 06 de março de 2002, alterado pelo Decreto Estadual nº 6.822 de 30 de novembro de 2005;

GOVERNO DO ESTADO DO PARANÁ. Lei 12726 - 26 de novembro de 1999. Institui a Política Estadual de Recursos Hídricos e adota outras providências.

GOVERNO DO ESTADO DO PIAUÍ. Decreto nº 11.341, de 22-03-2004. Regulamenta a outorga preventiva de uso e a outorga de direito de uso de recursos hídricos do Estado do Piauí, nos termos da Lei no 5.165, de 17 de agosto de 2000.

GOVERNO DO ESTADO DO PIAUÍ. RESOLUÇÃO CERH Nº.004 /05, de 26 de abril de 2005. Dispõe sobre Critérios e Procedimentos Provisórios para Outorga Preventiva e Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos.

GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE. Decreto nº 13.283, de 22/03/1997. Regulamenta os incisos III do art. 4º da Lei nº 6.908, de 01 de julho de 1996, que dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos, e dá outras providências.

GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE. Lei complementar nº 481, de 03 de janeiro de 2013. Altera a Lei Estadual nº 6.908, de 1º de julho de 1996, que “Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos, institui o Sistema Integrado de Gestão de Recursos Hídricos – SIGERH e dá outras providências”.

GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. Decreto Nº 37.033, de 21 de novembro de 1996. Regulamenta a outorga



do direito de uso da água no Estado do Rio Grande do Sul, prevista nos artigos 29, 30 e 31 da Lei nº 10.350, de 30 de dezembro de 1994.

GOVERNO DO ESTADO DO SERGIPE. Decreto nº 18.456 de 03 de dezembro de 1999. Regulamenta a outorga de direito de uso de recursos hídricos, de domínio do Estado, de que trata a Lei nº 3.870, de 25 de setembro de 1997, e da providências correlatas.

GOVERNO DO ESTADO DO TOCANTINS. Decreto nº 2.432 de 06/06/2005. Regulamenta a outorga do direito de uso de recursos hídricos de que dispõe os artigos 8º, 9º e 10 da Lei 1.307, de 22 de março de 2002.

GOVERNO DO ESTADOD E SÃO PAULO. Lei nº 7.663, de 30 de dezembro de 1991. Estabelece normas de orientação à Política Estadual de Recursos Hídricos bem como ao Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

IEMA. INSTITUTO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. Instrução Normativa IEMA Nº 7-N DE 07/06/2022. Estabelece procedimentos administrativos e critérios técnicos para alteração de projetos no licenciamento ambiental ordinário.

INEA. INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE. Resolução INEA nº 162, de 26-12-2018. Estabelece critério para a determinação da vazão de referência para fins do cálculo de disponibilidade hídrica para outorga de direito de uso de recursos hídricos e usos considerados insignificantes de domínio do estado do Rio de Janeiro e revoga o art. 10 e altera o art. 18 da Portaria Serla nº 567, de 07 de maio de 2007.

INEMA. Instituto de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Portaria nº 17.280 de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre critérios técnicos referentes à outorga de lançamento de efluentes, estabelece metas progressivas de melhoria da qualidade da água para fins de outorga para lançamento de efluentes e revoga a Instrução Normativa SRH nº 3 de 08 de novembro de 2007.

KELMAN, J. Gerenciamento de recursos hídricos: Parte I – outorga. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 12., 1997, Vitória. Anais... Rio de Janeiro: ABRH, 1997. p. 123-128.

LISBOA, Luana; SILVA, Demetrius David da; MOREIRA, Michel Castro. Sistema para análise das outorgas de captação de água e diluição de efluentes na bacia do rio Piracicaba (MG). Eng Sanit Ambient. v.24 n.5. Set/Out 2019.

MOTA, S. Introdução à Engenharia Ambiental. 2. ed. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2000. 416 p.

NAHON, I. M. Sistema de apoio à análise de outorga de lançamento de efluentes para a variável Demanda Bioquímica de Oxigênio: estudo de caso da Bacia do Alto Iguaçu. 2006. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SEDAM. SECRETARIA DE ESTADO DO DESENVOLVIMENTO AMBIENTAL – SEDAM. Portaria SEDAM nº 081/gab/sedam, de 23 de março de 2017. Altera a Portaria SEDAM nº 38/GAB/SEDAM/2004 que dispõe sobre os procedimentos administrativos e documentação necessária para emissão de autorização de uso de recursos hídricos no âmbito do Estado de Rondônia.

SEMARH. SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS HÍDRICOS. Instrução Normativa SEMARH nº 15, de 27-09-2012. Dispõe sobre os procedimentos de Outorga para usos de Recursos Hídricos no Estado de Goiás e da outras providências.

SILVA, Luciano Menezes da. **Cobrança pelo uso de recursos hídricos para diluição de efluentes.** XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. São Paulo. 2007.

SUDERHSA. Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento ambiental. Manual técnico de outorgas. Novembro/2006.



USO DA REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA NA PREDIÇÃO DO NÍVEL DOS RESERVATÓRIOS A PARTIR DE IMAGENS DE SATÉLITE

1Artemisa Fontinele Frota, 2David Ermerson Farias Eugênio, 3Roberto Pimentel Holanda, 4Luis Henrique Magalhães Costa

1 Universidade Federal do Ceará, e-mail: artemisaff@outlook.com; 2 Universidade Federal do Ceará, e-mail: david_ermerson@hotmail.com; 3 Centro Universitário Uninta, engenharia.civil@uninta.edu.br; 4 Universidade Estadual Vale do Acaraú, luis_costa@uvanet.br

Palavras-chave: Regressão Linear Múltipla; Google Earth Engine; Nível dos Reservatórios.

Resumo

O presente estudo teve como foco principal a aplicação da plataforma Google Earth Engine (GEE) para a delimitação das áreas inundadas em sete reservatórios localizados no estado do Ceará. Essa análise abrangeu distintas datas ao longo do ciclo operacional desses reservatórios. Por meio da utilização dos dados relativos aos níveis de água, adotou-se uma abordagem fundamentada na regressão linear múltipla, direcionada a cada um dos reservatórios em questão. Essa metodologia, complementada pela contribuição do ambiente de programação Scilab, viabilizou a estabelecer vínculos entre a elevação da cota do reservatório, os pixels que compõem a área interna do reservatório e os pixels de contorno (perímetro). Tais relações visaram à criação de uma ferramenta de gerenciamento com notável potencial. Essa ferramenta desenvolvida, por sua vez, ostenta a capacidade de estimar os níveis hídricos correntes nos reservatórios, a partir da análise de imagens obtidas por satélite. Os desdobramentos da análise culminaram na formulação de equações de regressão linear múltipla que exibiram coeficientes de determinação (R^2) que ultrapassaram o valor de 0,89, chegando até 0,99. Esse elevado grau de correlação realça a robustez e a eficácia inerentes à metodologia adotada, notabilizando a associação dos dados da plataforma GEE ao ambiente de programação Scilab.

Introdução

As regiões semiáridas do Brasil, caracterizadas por baixos índices pluviométricos e condições climáticas adversas, enfrentam desafios significativos em relação ao abastecimento de água. Nessas áreas, a disponibilidade de água é frequentemente limitada e sujeita a variações imprevisíveis, tornando o monitoramento dos recursos hídricos uma questão de extrema importância e complexidade.

O monitoramento dos recursos hídricos desempenha um papel crucial na coleta de dados em tempo real sobre os níveis dos corpos d'água, a qualidade da água, a quantidade armazenada em reservatórios e aquíferos, bem como as tendências de longo prazo. Essas informações não apenas fornecem uma compreensão mais profunda dos padrões hidrológicos, mas também auxiliam na identificação de ameaças iminentes, permitindo respostas proativas.

Por exemplo, ao detectar uma diminuição nos níveis de um reservatório devido a uma seca, as autoridades podem adotar medidas como restrições de uso, incentivo à economia de água e até mesmo realocação de recursos para garantir um abastecimento contínuo. Na região Nordeste, onde reservatórios abrigam expressivas quantidades de água superficial, o monitoramento desses corpos d'água é indispensável para a gestão hídrica regional. No cenário cearense, merece destaque a atuação da Companhia de Gerenciamento de Recursos Hídricos (COGERH), que assume a responsabilidade pela administração das reservas de água no estado.

Os recursos hídricos são alvo de monitoramento em escala global por meio de três enfoques principais: medições in situ, modelagem e observações via sensoriamento remoto. No entanto, nos últimos anos, houve uma significativa redução no uso de medidores in situ, e a tarefa complexa de modelar os recursos hídricos em âmbito global, devido à intricada interação entre as entradas e saídas, trouxe desafios adicionais.

Nesse contexto, a conveniência do monitoramento hídrico através de sensoriamento remoto, especialmente por meio de satélites, tem emergido como um objetivo de destaque na área de hidrologia para as décadas vindouras. Este direcionamento é respaldado por estudos como os de Alsdorf et al. (2007) e Duan e Bastiaanssen (2013), que ressaltam a importância dessa abordagem devido às suas vantagens em lidar com as limitações previamente mencionadas.

Em dezembro de 2010, a Google introduziu no mercado uma tecnologia denominada Google Earth Engine (GEE). Essa plataforma destaca-se como um sistema de computação em nuvem voltado para o processamento de dados provenientes de satélites e outras fontes espaciais. O GEE possui um catálogo abrangente contendo petabytes de informações orbitais abrangendo um período de mais de quarenta anos. Sua capacidade de processamento e visualização de dados supera significativamente as abordagens tradicionais baseadas em sistemas de informações geográficas para desktop, conforme destacado por Gorelick et al. (2017).

Este trabalho empregou a plataforma Google Earth Engine (GEE) como uma tecnologia de destaque para a extração das áreas inundadas de sete distintos reservatórios em múltiplas datas ao longo de sua operação. Utilizando os dados correspondentes aos níveis de água, o objetivo é estabelecer equações de regressão linear múltiplas individuais para cada reservatório. Essas equações estabelecerão uma relação entre a cota de água, os pixels de contorno e os pixels dentro do reservatório.

A meta subjacente é criar uma ferramenta de gerenciamento que forneça como resultado o nível de água presente no reservatório, fundamentada nos pixels do interior do reservatório e o perímetro do mesmo, identificados a partir das imagens de satélite. Essa ferramenta visa aprimorar as operações de gestão, uma vez que, nos casos em que medições convencionais dos níveis de água não possam ser efetuadas por motivos diversos, as equações desenvolvidas terão a capacidade de estimar com precisão os valores correspondentes.

Material e Métodos

Para estabelecer uma correlação entre os dados provenientes de imagens de satélite e as cotas de água em reservatórios, foi aplicado um modelo de regressão linear múltipla. A metodologia adotada nesta pesquisa baseia-se no trabalho conduzido por Albuquerque (2021) e está dividida em cinco etapas sequenciais, conforme ilustrado na Figura 1. As etapas serão detalhadas a seguir.



Figura 1: Etapas da metodologia.

Seleção da área de estudo

Na primeira etapa, foram selecionados os reservatórios que constituem o foco deste estudo. A escolha dos reservatórios analisados foi baseada em critérios estratégicos regionais e na disponibilidade de dados que pudessem ser coletados e processados conforme os requisitos do estudo. Assim, foram definidos sete reservatórios, distribuídos pelo território do Estado do Ceará: Açude Castanhão, Açude Edson Queiroz, Açude Forquilha, Açude Jaburu I, Açude Jaburu II, Açude Lima Campos e Açude Poço do Barro. A Figura 2, por sua vez, apresenta as vistas dos reservatórios selecionados obtidas através do Google Earth.



(a) Açude Castanhão



(b) Açude Edson Queiroz



(c) Açude Forquilha



(d) Açude Jaburu I



(e) Açude Jaburu II



(f) Açude Lima Campos



(g) Açude Poço do Barro

Figura 2: Açudes abordados pelo presente estudo.
Fonte: Google Earth (2023) (Adaptado)

A Tabela 1 exhibe as características de cada um deles, incluindo o município em que estão localizados, área da bacia, capacidade de acumulação, vazão regularizada e cota de sangria acima do nível do mar.

Tabela 1: Características dos reservatórios abordados pelo estudo

Reservatório	Município	Área da bacia	Capacidade de armazenamento	Vazão regularizada	Cota de sangria
Açude Castanhão	Alto Santo	45.309,63 km ²	6.700 hm ³	30,21 m ³ /s	106,00 m
Açude Edson Queiroz	Santa Quitéria	1.777,61 km ²	254 hm ³	2,44 m ³ /s	201,00 m
Açude Forquilha	Forquilha e Groaíras	191,86 km ²	50,13 hm ³	-	111,46 m
Açude Jaburu I	Tianguá e Ubajara	314,10 km ²	140 hm ³	-	716,38 m
Açude Jaburu II	Crateús e Independência	913,50 km ²	75,31 hm ³	-	310,65 m
Açude Lima Campos	Icó	340 km ²	51,17 hm ³	-	174,52 m
Açude Poço do Barro	Morada Nova	373,68 km ²	52 hm ³	-	125,00 m

Aquisição e processamento das imagens

Na segunda etapa foi dada uma atenção especial à coleta de dados provenientes de imagens de satélite, sendo verificadas a disponibilidade, a quantidade e a qualidade das imagens de satélite disponíveis na plataforma do Google Earth Engine. Esses dados históricos revelaram informações pertinentes sobre as áreas de inundação dos reservatórios, permitindo uma análise das variações nos níveis de enchimento e esvaziamento ao longo do tempo.

A qualidade das imagens está diretamente relacionada à sua eficácia na visualização do reservatório. Imagens de má



qualidade podem estar comprometidas pela presença de nuvens que obscurecem completamente a visão do reservatório, bem como pela ocorrência de eutrofização. Por outro lado, imagens de boa qualidade oferecem uma visualização clara e desobstruída do reservatório. Após uma análise criteriosa, foram selecionadas um número significativo de imagens de satélite para as sete áreas de estudo deste projeto, levando em consideração tanto a quantidade quanto a qualidade das imagens disponíveis.

Vale destacar que a extração e o processamento das imagens utilizaram dados de satélite das seguintes fontes: USGS Landsat 5 TM Collection 1 Tier 1 TOA Reflectance, USGS Landsat 7 Collection 1 Tier 1 and Real-Time data TOA Reflectance e USGS Landsat 8 Collection 1 Tier 1 and Real-Time data OLI Raw Scenes. Todos esses dados estavam disponíveis no banco de dados do Google Earth Engine (GEE) e possuíam uma resolução espacial de 30 metros, com revisitas a cada 16 dias.

Através do Code Editor do GEE, foi desenvolvido um algoritmo em linguagem Javascript que possibilitou a extração da área de inundação do reservatório em formato de imagem binária em diversas datas compreendidas entre os anos de 1980 e 2019, com base na imagem do próprio reservatório. O processamento das imagens foi conduzido por meio da criação de um algoritmo na plataforma Google Earth Engine (GEE), seguindo os passos delineados na Figura 3.

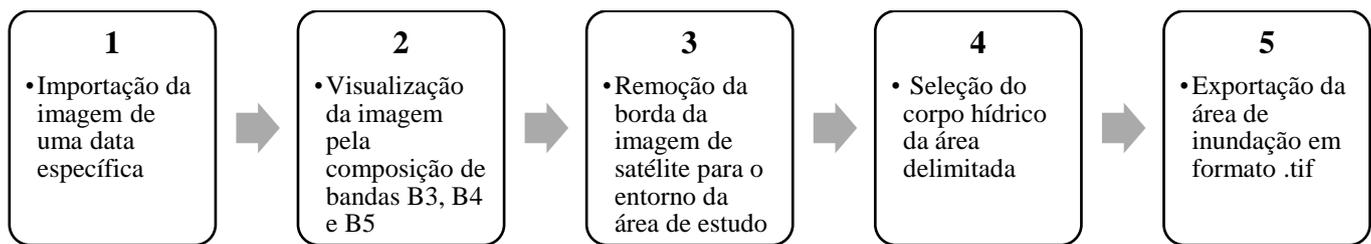


Figura 3: Passos para aquisição e processamento das imagens pelo GEE.

Conforme ilustra a Figura 3, o primeiro passo do processo envolveu a análise minuciosa de uma vasta quantidade de imagens disponíveis do reservatório na plataforma do Google Earth Engine (GEE). O objetivo era selecionar aquelas em que a presença de nuvens sobre o reservatório fosse insignificante, de modo a não prejudicar a identificação da área de inundação do açude. Para cada um dos sete reservatórios avaliados, havia um extenso banco de dados de imagens à disposição na plataforma do GEE, visto que esses dados abrangiam um período de 40 anos e que as imagens Landsat eram capturadas a cada 16 dias. Portanto, para cada reservatório, procedeu-se à análise individual de todas as imagens, avaliando sua qualidade. No total, foram examinadas e processadas 4.387 imagens para a realização deste trabalho, resultando na seleção de um conjunto de imagens de alta qualidade para cada um dos sete reservatórios estudados.

Posteriormente, foi realizado o processamento das regiões de estudo, aplicando uma composição das bandas B3, B4 e B5. Esse procedimento teve como objetivo realçar a visualização da área aquática de cada reservatório. Cada uma dessas bandas representa diferentes níveis de cinza, e sua combinação permite uma visualização mais clara das áreas de interesse. Em seguida, delimitou-se o contorno do reservatório na imagem. A partir desse contorno, extraiu-se a região correspondente à área aquática do reservatório, e posteriormente, fez-se a exportação em formato binário .tif, mantendo uma resolução espacial de 30 metros. Esse processo foi realizado individualmente para cada imagem e demandou, em média, 20 segundos de tempo computacional para ser concluído.

Coleta de dados do nível da água nos reservatórios

A terceira etapa direcionou-se à obtenção de informações concretas acerca dos níveis de água nos reservatórios, juntamente com as áreas correspondentes de inundação. Para isso, foram utilizados dados públicos fornecidos pelo do portal hidrológico do Ceará (Governo do Estado do Ceará, 2024), que é gerenciado pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH) e pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). Dessa forma, simultaneamente à extração da área de inundação de cada reservatório, de acordo com as datas das imagens, foram obtidos os valores dos níveis de água correspondentes. Esses dados sobre os níveis de água são coletados através de batimetrias.

Criação do modelo de Regressão Linear Múltipla

Para realizar a análise de regressão linear múltipla, desenvolveram-se algoritmos no software Scilab 5.4.1 que permitiu estabelecer uma equação que correlaciona o nível da água do reservatório com os pixels que compõem o seu contorno, bem como os pixels localizados dentro do reservatório. O Scilab é um programa de código aberto conhecido por sua versatilidade e competência de realizar tarefas complexas de análise numérica e simulação, sendo escolhido devido à sua capacidade de resolver sistemas de equações de regressão linear múltipla e calcular a distância entre pontos utilizando o método *cityblock*. A distância *cityblock*, também conhecida como distância de Manhattan, é uma métrica de distância que calcula a distância entre dois pontos em um espaço bidimensional, considerando apenas movimentos ortogonais (horizontal e vertical). A fórmula para calcular a distância *cityblock* (D) entre dois pontos de coordenadas (x_1, y_1) e (x_2, y_2) é a representada na Equação (1).

$$D = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2| \quad (1)$$

O processo realizado pelos algoritmos no Scilab para criação do modelo é apresentado na Figura 4.

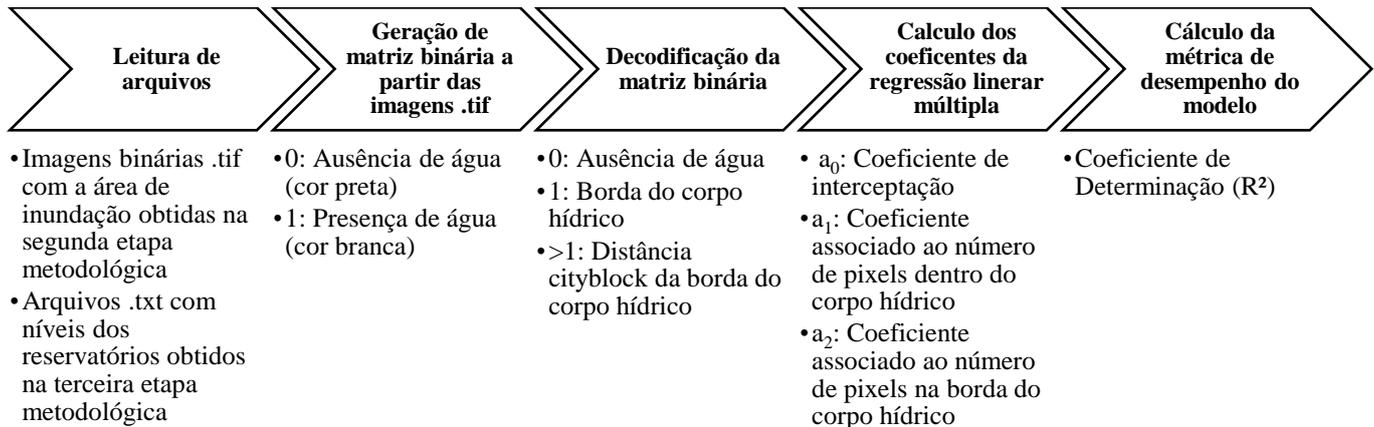


Figura 4: Processo realizado para geração do modelo de Regressão Linear Múltipla.

O processo iniciou-se com a leitura da coleção de imagens no formato .tif, obtidas na segunda etapa da metodologia, representando a área inundada do reservatório em diferentes datas. Essas imagens são binárias, ou seja, apresentam apenas duas cores: preto, indicando a ausência de água, e branco, indicando a presença de água. Além disso, foi realizada a leitura de um arquivo .txt contendo os valores do nível de água no reservatório correspondentes a cada uma das datas selecionadas para a extração das imagens. Vale destacar que os níveis dos reservatórios foram obtidos na terceira etapa metodológica a partir de fontes oficiais divulgadas pela COGERH.

Em seguida, cada imagem binária no formato .tif foi interpretada e transformada em uma matriz, na qual cada pixel da imagem corresponde a um elemento da matriz, recebendo o valor 0 na ausência de água (cor preta) e o valor 1 na presença de água (cor branca). Logo após, a matriz binária passou por um processo de decodificação, mantendo os elementos referentes à ausência de água com valor 0 e os elementos correspondentes à borda (ou perímetro) do corpo hídrico com valor 1, entretanto, os elementos localizados dentro do corpo hídrico receberam o valor da distância *cityblock* da borda.

Para a elaboração da equação de regressão linear múltipla realizou-se o cálculo de seus coeficientes utilizando o método dos mínimos quadrados ordinários (*Ordinary Least Squares - OLS*), cujas variáveis independentes são o número de pixels que compõem a borda do reservatório (elementos da matriz decodificada com valor igual a 1) e o número de pixels localizados dentro reservatório (elementos da matriz decodificada com valor maior igual a 1). Dessa forma, a equação obtida deve apresentar o seguinte formato:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 \quad (2)$$

Onde: y é o nível de água no reservatório, a_0 é o coeficiente de interceptação, a_1 é o coeficiente associado ao número de pixels dentro do corpo hídrico (x_1) e a_2 é o coeficiente associado ao número de pixels no contorno do corpo hídrico (x_2).

Como métrica de desempenho, foi calculado o coeficiente de determinação (R^2), que mede a proporção da variabilidade na variável dependente que é explicada pelas variáveis independentes no modelo. Ao calcular R^2 , o valor resultante estará entre 0 e 1. Quanto mais próximo de 1, maior a proporção da variabilidade na variável dependente que é explicada pelo modelo.

Representação gráfica do modelo de Regressão Linear Múltipla

Para a visualização do modelo de Regressão Linear Múltipla foi utilizada a versão online do MATLAB, que é uma ferramenta que simplifica a criação de gráficos 3D, desempenhando um papel fundamental na compreensão das complexas relações entre as variáveis independentes e a variável dependente em um espaço tridimensional. Dessa forma, é possível observar o comportamento do nível do reservatório em função da quantidade de pixels no contorno e no interior do mesmo, proporcionando uma compreensão mais clara e intuitiva das interações entre essas variáveis.

Resultados e Discussão

A Tabela 2 apresenta um resumo dos resultados obtidos após a aplicação da metodologia desenvolvida neste trabalho para cada um dos reservatórios selecionados como objeto de estudo. A partir de um conjunto inicial de 4.387 imagens obtidas através do Google Earth Engine, foram extraídas e processadas 627 imagens com qualidade aceitável para serem aplicadas ao modelo. Destas, 379 foram classificadas como apresentando boa qualidade, enquanto 248 foram consideradas de qualidade inferior.



Tabela 2: Resumo dos resultados

Reservatório	Qualidade das imagens	Número de imagens extraídas	R ² - Regressão linear simples	R ² - Regressão linear múltipla	R ² - Aumento percentual
Açude Castanhão	BOA	52	0,9723	0,9782668	0,61%
Açude Edson Queiroz	BOA	108	-	0,981624	
Açude Forquilha	BOA	50	-	0,979942	
Açude Jaburu I	BOA	117	0,9949	0,9951457	0,02%
Açude Jaburu II	BOA	52	-	0,9782039	
Açude Lima Campos	RUIM	192	0,8803	0,897172	1,88%
Açude Poço do Barro	RUIM	56	0,8843	0,933103	5,23%

Todos os reservatórios analisados possuem pelo menos 50 amostras disponíveis, sendo que o Açude Lima Campos foi o que apresentou o maior número de imagens (192), enquanto o Açude Forquilha teve o menor número (50). Quanto à qualidade, a maioria dos açudes apresentaram boa qualidade, com exceção dos Açudes Lima Campos e Poço do Barros, cujas imagens foram classificadas como de qualidade ruim.

A Figura 5 apresenta os gráficos obtidos pelo modelo que correlacionam o número de pixels no contorno e no interior dos reservatórios com o nível da água. Conforme esperado, observa-se uma correlação positiva entre as variáveis independentes e a dependente (nível do reservatório). Essa associação era esperada, uma vez que o aumento do número de pixels no contorno e dentro do corpo hídrico reflete o aumento da área de inundação e, por conseguinte, do nível do reservatório.

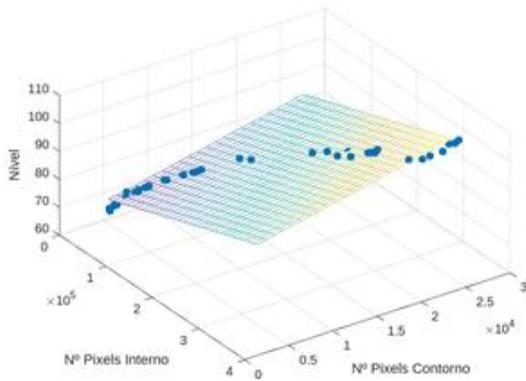
As equações obtidas para os açudes Castanhão, Edson Queiroz, Forquilha, Jaburu I, Jaburu II, Lima Campos e Poço do Barro são apresentadas pelas Equações de (2) a (8), nesta ordem.

$$y = 66,7816790 + 0,0000617x_1 + 0,0006702x_2 \quad (2)$$

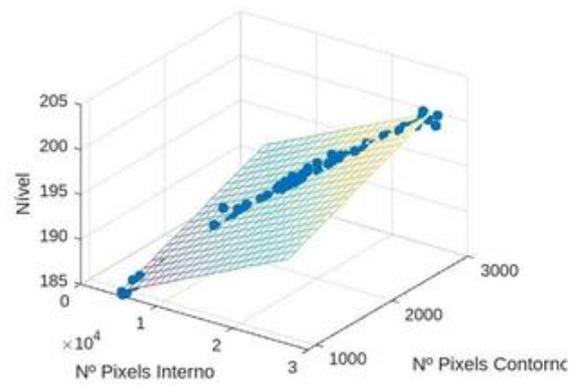
$$y = 180,15963 + 0,0004092x_1 + 0,0035944x_2 \quad (3)$$

$$y = 101,67933 + 0,0008275x_1 + 0,0027155x_2 \quad (4)$$

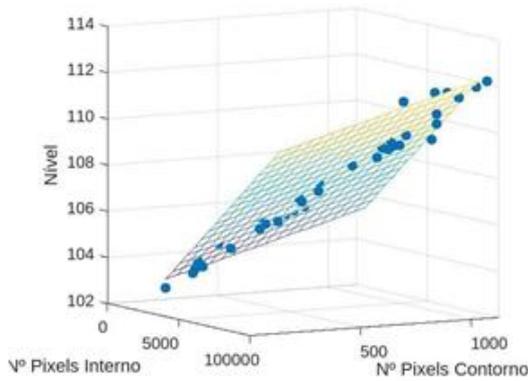
$$y = 692,07049 + 0,002076x_1 + 0,0012468x_2 \quad (5)$$



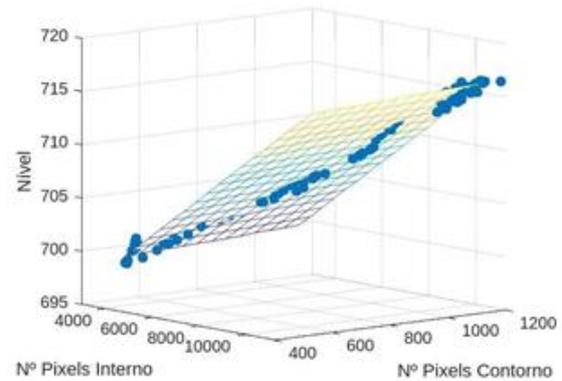
(a) Açude Castanhão



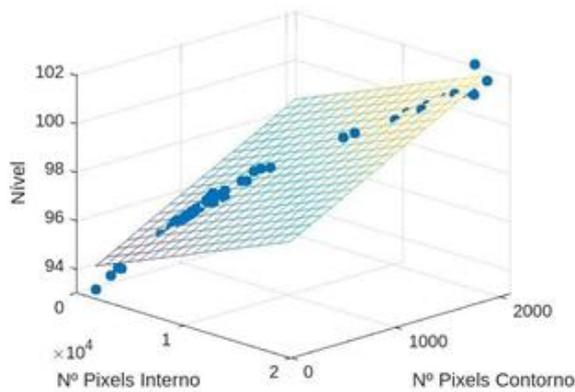
(b) Açude Edson Queiroz



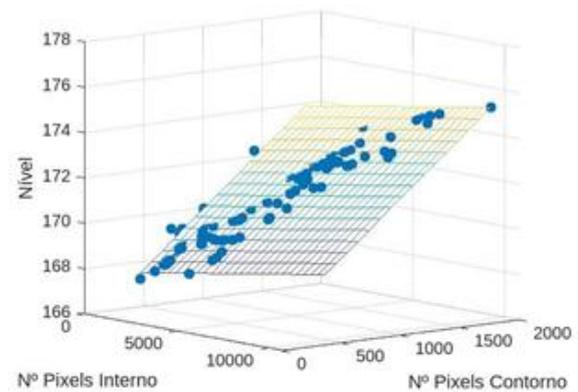
(c) Açude Forquilha



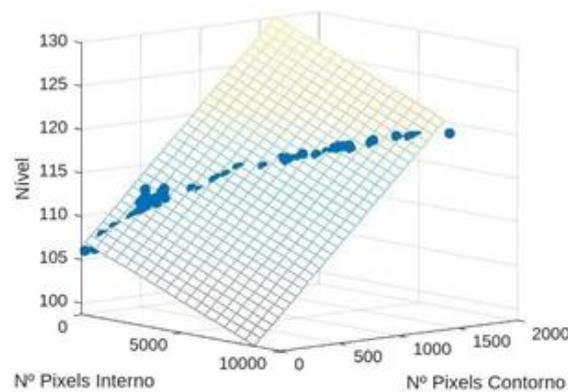
(d) Açude Jaburu I



(e) Açude Jaburu II



(f) Açude Lima Campos



(g) Açude Poço do Barro

Figura 5: Resultados gráficos do modelo para os reservatórios selecionados.



$$y = 93,550364 + 0,0001888x_1 + 0,0023633x_2 \quad (6)$$

$$y = 166,47334 + 0,0009669x_1 - 0,0007301x_2 \quad (7)$$

$$y = 106,57697 - 0,0009731x_1 + 0,0144308x_2 \quad (8)$$

No que diz respeito ao desempenho do modelo, os valores obtidos do coeficiente de determinação R^2 para todos os reservatórios foram significantes. O menor valor de R^2 obtido pelo modelo foi o do Açude Lima Campos (0,897), visto que, embora ele seja o reservatório com maior número de amostras de imagem, estas possuem qualidade ruim, prejudicando a performance do modelo. O segundo menor valor de R^2 foi o do Açude Poço do Barro, que também apresenta uma qualidade de imagens ruim, o que demonstra que a qualidade das imagens é um fator crítico para o desempenho do modelo. Destaca-se também que, o Açude Jaburu I foi o que apresentou o melhor resultado, com coeficiente de determinação de 0,995, sendo a variação nos dados quase completamente explicada pelo modelo.

Um estudo conduzido por Albuquerque (2021), que serviu como base para o desenvolvimento deste trabalho, também se concentrou na predição do nível dos reservatórios a partir de imagens de satélite. No estudo anterior, foi empregado um modelo de regressão linear simples, onde a área de inundação, calculada a partir da quantidade de pixels dentro do corpo hídrico, foi utilizada como variável independente. Os Açudes Castanhão, Jaburu I, Lima Campos e Poço do Barro também foram selecionados como área de estudo pela autora, sendo seus resultados também apresentados na Tabela 2.

Em comparação com os resultados do modelo de Albuquerque (2021), o presente estudo demonstrou valores superiores de coeficiente de determinação R^2 , sugerindo que a regressão linear múltipla explica melhor a variação dos dados em relação à regressão linear simples.

Em termos percentuais, observou-se que o Açude Jaburu I teve o menor aumento do coeficiente de determinação R^2 da regressão linear múltipla em relação à regressão linear simples, com apenas 0,02% de variação. Por outro lado, os açudes com imagens de qualidade ruim foram os que apresentaram os maiores aumentos percentuais no R^2 com a aplicação da regressão linear múltipla. Isso indica que a inclusão de múltiplas variáveis independentes na análise proporciona melhorias substanciais nos resultados, especialmente em cenários com imagens de qualidade inferior.

Comentários finais

A pesquisa apresentada neste estudo adotou uma abordagem abrangente na avaliação de reservatórios, fazendo uso de imagens de satélite e técnicas de processamento de dados. A metodologia, que englobou a aquisição e o processamento de imagens pelo Google Earth Engine, a análise de regressão linear múltipla utilizando Scilab e a geração de gráficos tridimensionais no MATLAB, proporcionou uma compreensão das relações entre o número de pixels de contorno e do interior do reservatório e o nível da água.

Os resultados obtidos pelo modelo foram satisfatórios, sendo o coeficiente de determinação R^2 obtidos para todos os reservatórios superior a 0,89, indicando um elevado percentual de variância nos dados explicado pelo modelo. Em comparação com a regressão linear simples, implementada por Albuquerque (2021), houve aumento do coeficiente de determinação, principalmente para os reservatórios com qualidade de imagem ruim, evidenciando que considerar múltiplas variáveis independentes contribui significativamente para a compreensão das variações nos níveis de água.

Assim, os resultados obtidos demonstraram a influência da qualidade das imagens na precisão das estimativas. Reservatórios com imagens de alta qualidade destacaram a importância da clareza nas imagens para análises precisas. Os resultados reforçaram a importância da integração de diversas ferramentas e metodologias, fornecendo uma base sólida para a compreensão das dinâmicas dos reservatórios e sendo essencial para a gestão eficaz dos recursos hídricos.

Em síntese, este estudo validou a eficácia da metodologia empregada, destacando a necessidade contínua de aprimoramento e adaptação de técnicas analíticas para lidar com desafios específicos de cada cenário. O conhecimento adquirido contribui não apenas para a compreensão dos reservatórios estudados, mas também para o desenvolvimento de abordagens mais robustas na análise de recursos hídricos por meio de tecnologias de sensoriamento remoto e ferramentas avançadas de processamento de dados.

Para futuras investigações, sugere-se uma abordagem mais integrada, considerando não apenas a qualidade das imagens, mas também fatores climáticos, modelos de aprendizado de máquina e análises temporais dinâmicas. A incorporação desses elementos pode enriquecer ainda mais a compreensão das dinâmicas hídricas e proporcionar previsões mais precisas.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelo apoio financeiro concedido à esta pesquisa.

Referências Bibliográficas

ALBUQUERQUE, L. F. de; 2021. Definição do nível de reservatórios a partir de imagens de satélite. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental,



Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 55 f. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/56594>. Acesso em: 03 jul. 2023.

ALSDORF, D. E.; RODRIGUEZ, E.; LETTENMAIER, D. P; 2007. Measuring surface water from space. *Reviews of Geophysics*, v. 45, n. 2, p. 1-24. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1029/2006RG000197>. Acesso em: 23 dez. 2023.

DUAN, Z.; BASTIAANSSEN, W. G. M; 2013. Estimating water volume variations in lakes and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data. *Remote Sensing of Environment, USA*, v. 134, p. 403-416. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.010>. Acesso em: 01 ago. 2023.

GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R; 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, v. 202, p. 18-27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031 Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425717302900>. Acesso em: 03 jul. 2023.

GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ; 2024. Portal Hidrológico do Ceará. Disponível em: <http://www.hidro.ce.gov.br>. Acesso em: 8 jun. 2024.



SÍNTESE DO PROGRAMA PROTETOR DAS ÁGUAS E SUA EVOLUÇÃO NO USO DO PAGAMENTO POR SERVIÇOS AMBIENTAIS NA PROMOÇÃO DA CONSERVAÇÃO E RECUPERAÇÃO DA BACIA DO ARROIO ANDRÉAS, RS, BRASIL

1Marcelo Luís Kronbauer, 2Walter Roberto Kuester, 3Tanise Etges, 4Joana Tartari Klein, 5Vera Maria da Costa Nascimento

1 Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC, e-mail: marcelokr@unisc.br; 2 Universidade de Santa Cruz do Sul-UNISC, e-mail: walter.kuester@hotmail.com; 3 Prefeitura Municipal de Vera Cruz, e-mail: tanise_etges@yahoo.com.br; 4 Philip Morris Brasil, e-mail: joana.tartariklein@pmi.com; 5 Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA, e-mail: vera@ana.gov.br

Palavras-chave: Pagamento por Serviços Ambientais; Bacia hidrográfica; Recursos hídricos.

Resumo

O Presente artigo apresenta uma síntese do Programa Protetor das Águas, implementado na sub-bacia do Arroio Andréas, localizada na Bacia Hidrográfica do Rio Pardo, no município de Vera Cruz, Rio Grande do Sul, Brasil. Iniciado em 2011, o programa visa a conservação e restauração de áreas ripárias em área rural, com foco na recuperação de áreas degradadas e na melhoria da qualidade e quantidade de água, utilizando como mecanismo de incentivo aos agricultores o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA). Um dos grandes diferenciais do programa, dentre todos os demais desenvolvidos no Brasil, é o fato de na sua essência, o mesmo ter sido concebido através de uma parceria entre a iniciativa privada, universidade e o município de Vera Cruz, que se beneficia diretamente da iniciativa com a recuperação do seu principal manancial de abastecimento. Desde o ano de 2018, o programa conta com uma Unidade de Gestão do Programa (UGP), composta pela Philip Morris Brasil, Prefeitura Municipal de Vera Cruz, Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA, Comitê Pardo, Associação dos Fumicultores do Brasil - AFUBRA e Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural - EMATER/RS-ASCAR. O financiamento das ações do programa é provido pela Philip Morris Brasil, com suporte adicional da Prefeitura Municipal de Vera Cruz. A prefeitura implementa uma política municipal de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) conforme a Lei nº 4.264 de 01 de dezembro de 2015, que inclui a Lei 4.195/2015, concedendo isenção da tarifa de água para os produtores participantes, resultando em um benefício financeiro anual de R\$ 687,60. Adicionalmente, a Lei nº 5.079/2020 destina 1% da arrecadação da tarifa de água do município para o Programa Municipal de PSA, garantindo a sustentabilidade e expansão contínua do programa. Ao longo dos 13 anos de execução do programa, inúmeras conquistas foram obtidas, como a melhora da qualidade da água em diversos pontos de monitoramento, atestadas através de análises físico-químicas e biológicas. Os valores pagos anualmente aos agricultores tiveram diferentes metodologias ao longo do tempo, inicialmente usando o custo de oportunidade para a cultura do milho como referência, aliada a uma bonificação por adesão, que considerava somente a área protegida, até o modelo atual, que se utiliza de uma calculadora de PSA adaptada a realidade da sub-bacia do arroio Andréas, que considera um conjunto de boas práticas na propriedade rural. O programa finalizou o ano de 2023, com 103 agricultores contratados, totalizando 224 hectares de áreas de APP's pagos anualmente. O programa destaca-se como um modelo eficaz e inspirador para outras regiões que buscam preservar seus recursos naturais e promover a sustentabilidade ambiental.

Introdução

Nas últimas cinco décadas, a humanidade vivenciou um crescimento econômico e tecnológico sem precedentes, conforme destacado pelo estudo da *Millennium Ecosystem Assessment* (2005). Esse progresso acelerado esteve diretamente ligado a intervenções significativas nos ecossistemas, realizadas de maneira mais rápida e em maior escala do que em qualquer outro período da história. Embora essas intervenções tenham proporcionado substanciais ganhos econômicos, elas também resultaram em degradação ambiental e perda de biodiversidade, impactando negativamente a provisão de serviços ecossistêmicos essenciais e desfavorecendo determinados grupos populacionais no acesso a esses recursos.

Conforme apontado por Costanza et al. (2014), cada serviço ambiental desempenha uma função específica ou abrangente que resulta em benefícios. No caso da água, o funcionamento do ciclo hidrológico permite a provisão desse recurso vital para a agricultura, indústria e consumo humano. Bacias hidrográficas, reservatórios e aquíferos desempenham papéis essenciais no armazenamento de água no território. Entretanto, Hasan et al. (2020) ressaltam que os serviços ambientais são diretamente afetados pelos tipos de uso e cobertura do solo, uma vez que a alteração da paisagem pode provocar mudanças significativas no funcionamento dos ecossistemas. Modificações na paisagem, como a urbanização e a conversão de terras inadequadas para a agricultura, transformam as características físicas, químicas e biológicas do solo, deteriorando a qualidade e a quantidade dos cultivos e, conseqüentemente, os serviços de provisão e de regulação relacionados à água.

Essa influência é ainda mais perceptível nas zonas ripárias, que acompanham as margens de corpos d'água superficiais e são frequentemente cobertas por mata ciliar. A presença dessa cobertura vegetal é fundamental para estabilizar as margens e formar corredores ecológicos. Além disso, as plantas proporcionam a filtragem de sedimentos e a retenção de nutrientes, melhorando a qualidade da água e elevando a capacidade de armazenamento na bacia (Attanasio et al., 2006).

Em um esforço recente para potencializar serviços ambientais e restaurá-los, a Assembleia Geral das Nações Unidas proclamou a década de 2021-2030 como a Década das Nações Unidas para a Restauração de Ecossistemas, conforme a Resolução 73/284 de 1 de março de 2019. O objetivo principal é prevenir, interromper e reverter a degradação dos ecossistemas em todo o mundo. O planejamento integrado do uso da terra, baseado em direitos e informando todas as partes interessadas sobre os benefícios da conservação, restauração e uso sustentável dos recursos naturais, é fundamental para alcançar esse equilíbrio (PNUMA, 2021).

Diante desse cenário, os mecanismos de compensação econômica emergem como uma solução viável para recompensar indivíduos ou comunidades que atuam em benefício da provisão de serviços ambientais. Destacam-se os Pagamentos por Serviços Ambientais (PSA), considerados uma ferramenta promissora para a gestão ambiental em diversas escalas. Esses esquemas de PSA remuneram os provedores de serviços ambientais pelo uso desses serviços, sendo vistos como promissores para financiar a proteção e restauração ambiental e complementar as regulações existentes (FAO, 2004; Wunder, 2009). A principal característica dos acordos de PSA é a manutenção do fluxo de um serviço ambiental específico em troca de uma compensação econômica, garantindo benefícios adicionais que não ocorreriam sem essa intervenção (Vonada & Borges, 2011).

Material e Método

Localização da área de estudo e características gerais

O programa de pagamento por serviços ambientais (PSA) objeto desse artigo é implementado na bacia do Rio Pardo, na sub-bacia do Arroio Andréas, localizada no município de Vera Cruz, na região central do estado do Rio Grande do Sul, Brasil (figura 1). O relevo da região apresenta uma variação significativa, com altitudes que vão de 100 a 500 metros acima do nível do mar. A sub-bacia de aplicação da metodologia de recuperação apresenta como uso do solo predominante as atividades agrossilvopastoris, especialmente o cultivo do tabaco.

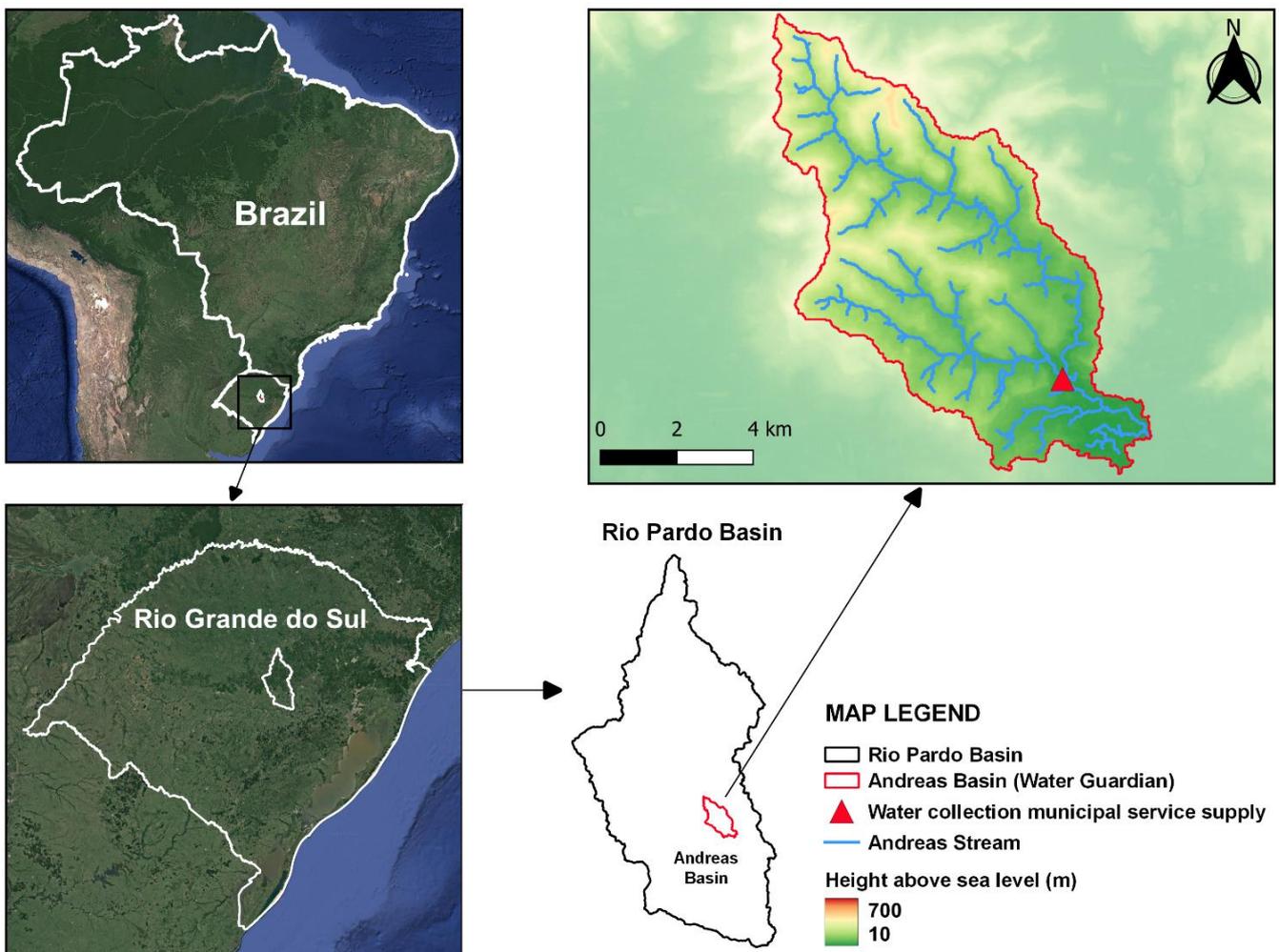


Figura 1: Mapa da localização da Bacia do Rio Pardo e da Bacia do arroio Andréas em Vera Cruz, RS.



Fase Inicial de desenvolvimento do programa Protetor das Águas (2011 – 2017)

Em meados de março de 2011, através de um primeiro parceiro da iniciativa privada (Universal Leaf Tabacos), analisou-se a possibilidade de execução de um programa de recuperação de áreas ripárias com PSA na bacia do Pardo, o que na época era extremamente inovador no sul do Brasil. Para definição da área de atuação foi consultado o Plano de Bacia, que trazia tanto nos estudos de diagnóstico, como prognóstico, cenários complexos em termos de disponibilidade hídrica para a bacia do arroio Andréas, que esta inteiramente localizada nos limites do município de Vera Cruz, e contribui com o abastecimento de 70% da população urbana do município. Dessa forma, a escolha da área de atuação, se deu pelas informações levantadas no plano de bacia, e indicação direta do próprio Comitê Pardo.

A iniciativa proposta recebeu o nome de “Protetor das Águas”, tendo em vista o seu objetivo principal de recuperação das condições que propiciam melhor qualidade e maior quantidade de água no ponto de captação para o município de Vera Cruz, com especial atenção as áreas ripárias no entorno de nascentes e cursos de água.

Para a definição dos valores pagos aos agricultores, foi utilizado o método do custo de oportunidade gerado pela não utilização da terra. A partir da renda bruta média das três principais culturas agrícolas do município - milho, tabaco e arroz - estipulou-se uma margem líquida de 20%, valorando-se assim, o custo de oportunidade por hectare de preservação. Desta forma, considerando-se os valores médios das culturas para o ano de 2011, obteve-se as seguintes rendas brutas: R\$ 10.000,00/ha para o tabaco, R\$ 1.500,00/ha para o milho e R\$ 2.250,00/ha para o arroz. Com base nesses valores, estimou-se o custo de oportunidade, obtendo-se R\$ 2.000,00/ha para as áreas aptas ou com potencial para o cultivo de tabaco, R\$ 300,00/ha para as áreas aptas ao cultivo de milho e R\$ 450,00/ha para as áreas que poderiam ser utilizadas para o cultivo de arroz.

Porém, como o custo de oportunidade para o cultivo do tabaco seria muito elevado e inviabilizaria o projeto, considerou-se, apenas, os custos de oportunidade com base no cultivo do milho e do arroz. Assim, o valor estabelecido foi fixado em R\$ 325,00 por hectare/ano destinado à preservação. Além disso, optou-se a época, em um bônus de adesão no valor de R\$ 200,00/ano (independente da área preservada), visto que alguns produtores da bacia dispunham de áreas pequenas para o projeto e o valor recebido por eles, dessa maneira, ficaria pouco atrativo.

A partir do diagnóstico inicial detalhado da sub-bacia, foram identificadas áreas potenciais para integrar inicialmente o Programa Protetor das Águas, considerando a relevância das nascentes para a produção hídrica e das áreas ripárias para a salvaguarda do Arroio Andréas.

Além disso, estratégias de mobilização para a adesão dos agricultores foi um fator determinante na fase inicial do programa, pois houve casos em que alguns se recusaram a negociar ou mesmo a receber a equipe técnica responsável. Cabe destacar que todo o processo de adesão era realizado em caráter voluntário, sendo as propriedades da bacia percorridas individualmente.

Os agricultores que aceitavam a realização de diagnóstico, recebiam uma visita técnica, utilizando sistema de GPS para marcar pontos específicos de interesse para adesão ao programa, bem como as divisas da propriedade. Esses pontos foram então sobrepostos em imagens de satélite para criar um croqui da área, definindo assim as parcelas a serem incluídas no Pagamento por Serviços Ambientais (PSA). Em alguns casos, foram feitas múltiplas propostas aos agricultores, mas a decisão final sobre a área coube sempre ao proprietário.

A figura 2 apresenta uma proposta de croqui oferecida ao produtor rural. Uma vez definida a área a ser integrada ao programa, procede-se à sua demarcação *in loco*, e quando necessário, a instalação de cercamento para proteção, especialmente para isolar as áreas de pastoreio de bovinos e equinos.

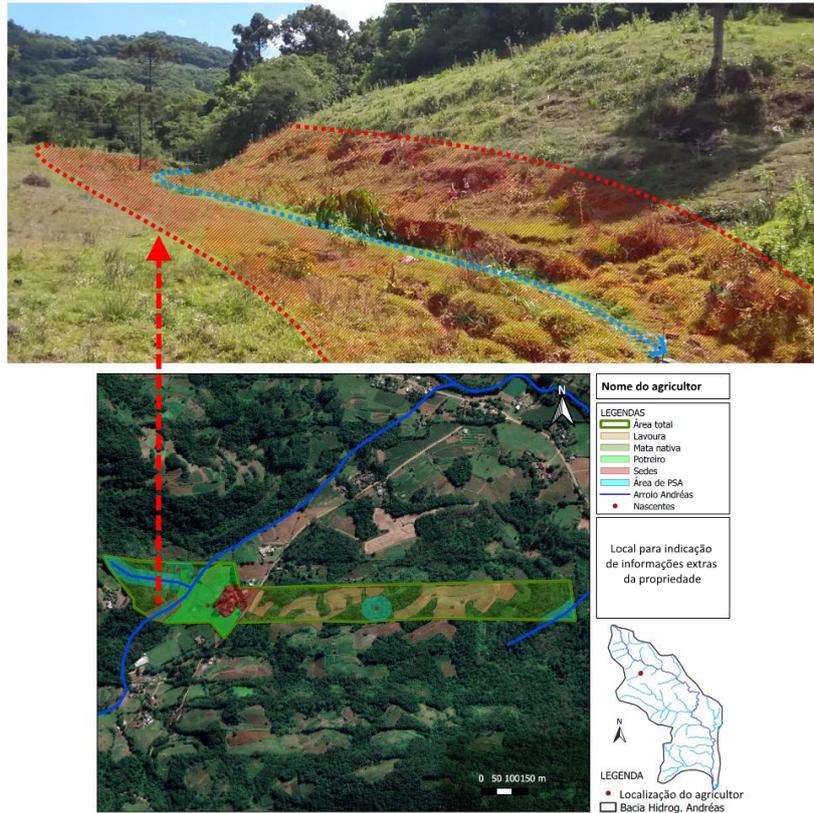


Figura 2: Croqui esquemático de uma das propriedades participantes do Programa Protetor das Águas.

Todo o diagnóstico inicial, da bacia, e das propriedades contratadas, contou com uma etapa específica de análise de qualidade de água, com amostras de parâmetros físicos, químicos e biológicos em 20 pontos ocorrendo entre 2011 e 2017, e posteriormente 5 pontos entre os períodos de 2019 e 2023. Dessa forma, três pontos específicos receberam monitoramento contínuo ao longo dos 13 anos de execução do programa, localizados conforme figura 03.

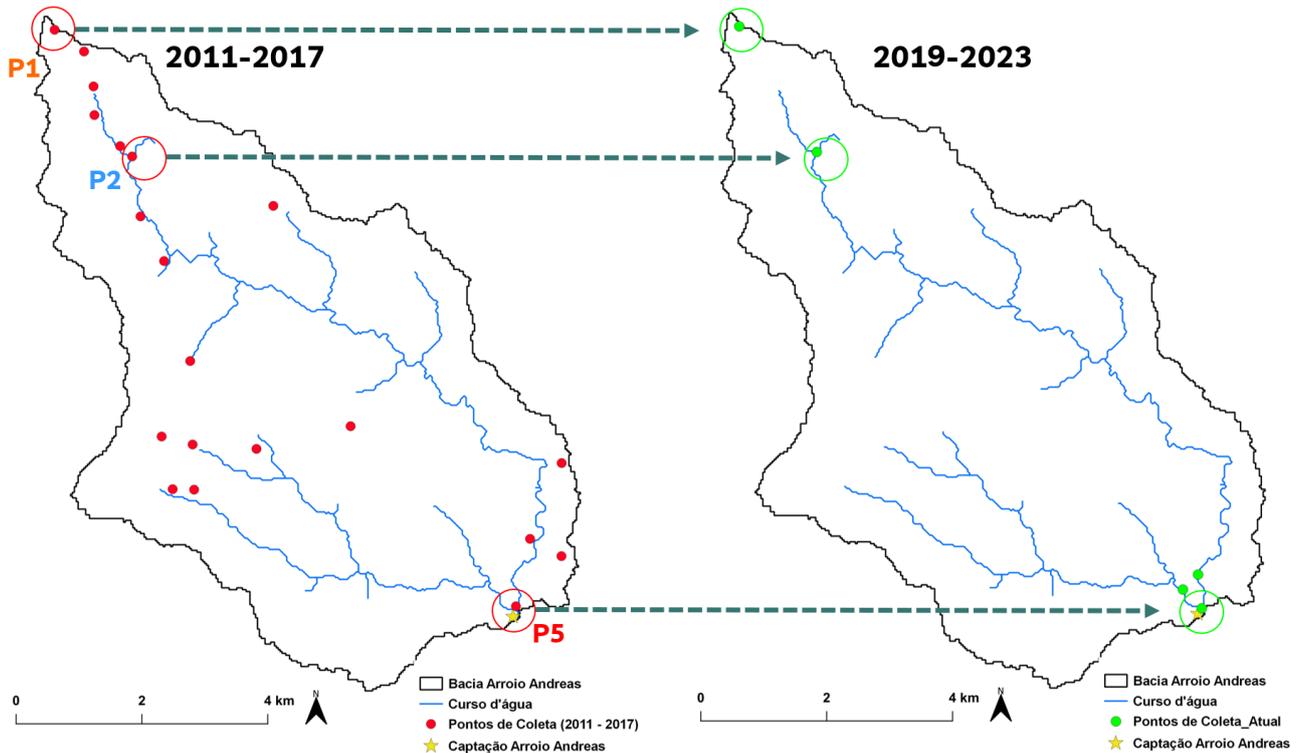


Figura 3: Localização dos pontos de amostragem de qualidade de água.



Um ponto que merece destaque na evolução do programa Protetor das Águas, foi o seu reconhecimento e certificado, no ano de 2013, como Produtor de Água pela Agência Nacional de Águas e Saneamento básico (ANA), passando a ser o único projeto do Rio Grande do Sul. Dessa maneira no ano de 2016, recebeu recursos para ações de conservação de solo, através do plantio direto, readequação de estradas rurais, proteção dos taludes no ponto de captação de água do município e atividades de educação ambiental. Para isso, a União disponibilizou R\$ 654.076,50 e o município, entrou com uma contrapartida de 2%, R\$ 13.348,50.

No final do ano de 2015, a Lei nº 4.264, instituiu a Política Municipal de Pagamento por Serviços Ambientais, criando o Programa Municipal de pagamento por serviços ambientais e o fundo municipal de pagamento por serviços ambientais no município de Vera Cruz. Dessa forma, além do valor pago anualmente pelo financiador privado, os agricultores participantes do projeto passaram a receber também a isenção na taxa de abastecimento de água. Salienta-se que, já em 2015, 95% da área rural de Vera Cruz é abastecida pela rede hídrica da Prefeitura Municipal, atualmente (2023) já são 99% da área rural abastecida.

As ações desenvolvidas conjuntamente com a ANA, fecham uma primeira fase do programa, na qual a partir desse ponto, ocorre a troca do financiador privado, e o próprio modelo de valoração das propriedades é ajustado.

Fase atual de desenvolvimento do Programa Protetor das Águas (2018 – 2024)

Uma segunda fase de desenvolvimento do programa se deu em um momento de consolidação das atividades, contando com a participação de um novo patrocinador privado (Philip Morris Brasil) e a formação de uma Unidade Gestora de Programa (UGP), instrumento bastante incentivado pela ANA para gestão de projetos no âmbito do Produtor de Águas no Brasil. A UGP atualmente é composta pela Philip Morris Brasil, Prefeitura Municipal de Vera Cruz, Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, Comitê Pardo, Associação dos Fumicultores do Brasil - AFUBRA e Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural - EMATER/RS-ASCAR.

A defasagem em relação aos valores praticados de PSA, desde o ano de 2011, motivou dentro da UGP, a mudança no método de determinação do valor de PSA, e para tanto, adaptou-se um modelo previamente criado para a ANA, apresentado a seguir.

Adaptação de Calculadora de PSA aplicada no Programa Protetor das Águas

A proposta de calculadora apresentada é baseada na experiência do estado de Santa Catarina, que desenvolveu através de uma parceria entre a SEMA (Secretaria executiva de meio ambiente de Santa Catarina), SDE/SC (Secretaria do Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável), Agência Nacional de Águas e Saneamento básico e a Fundação Certi. A calculadora de PSA é uma ferramenta inovadora projetada para quantificar e valorizar os serviços ambientais prestados pelas propriedades participantes. Ela considera diversas variáveis ambientais e socioeconômicas, permitindo uma avaliação precisa e eficiente dos benefícios gerados pela conservação e restauração ambiental promovida pelos produtores rurais. Com esta ferramenta, é possível determinar de maneira justa e transparente os valores de compensação a serem pagos aos agricultores, incentivando práticas sustentáveis e garantindo a continuidade dos serviços ambientais essenciais para a região. Seu desenvolvimento se baseia na identificação das atividades passíveis de geração de serviços ambientais nas propriedades rurais da bacia em que se pretende aplicar a mesma, com a definição de graus de importância dados a cada atividade, que irão indicar uma nota associada ao atendimento integral, parcial, ou não atendimento a aquele requisito. A soma das notas irá indicar a pontuação do agricultor, que irá variar de 0 até 1.

O modelo desenvolvido em Santa Catarina, utilizado como base para obtenção dos valores de PSA, baseia-se no valor mínimo do preço da terra para servidão florestal. Não existe uma referência a nível estadual no Rio Grande do Sul para a valorização dos imóveis rurais, sendo que desta forma, devem-se buscar sempre referências municipais. Utilizando-se como base o município de Vera Cruz, para onde foi adaptada uma calculadora através da UGP, utilizou-se como referência o valor mínimo da terra, instituído através do Decreto nº 6910/2022, (que trata da fixação da planta de valores dos imóveis urbanos e rurais para fins de apuração da base de cálculo para a cobrança do ITBI no município). Os valores indicados pelo decreto encontram-se na tabela 1.

A metodologia apresentada indica um novo modelo de cálculo para o valor a ser pago aos agricultores, referentes aos serviços ambientais prestados pela preservação e recuperação de áreas ripárias no entorno dos recursos hídricos. O valor atualmente praticado, e que permaneceu vigente até o ano de 2022, de R\$ 325,00/hectare foi baseado no custo de oportunidade da terra, utilizando como referência os valores da cultura do milho no ano de 2011. Nesse sentido a calculadora de PSA, pretende utilizar uma outra referência para o cálculo do valor de PSA, mas mantendo evidentemente os valores aplicados dentro de um limite aceitável para os financiadores do programa.



Tabela 1 - valor do hectare praticado em zona rural no município de Vera Cruz com base no decreto nº 6910/2022

LOCALIZAÇÃO	APROVEITÁVEIS P/ AGROPECUÁRIA			
	VÁRZEA	COXILHA	MONTANHOSAS	NÃO APROVEITÁVEIS
ROD. PAVIMENTADA	R\$ 20.986,00	R\$ 58.019,00	R\$ 38.268,00	R\$ 9.383,00
ESTRADA GERAL	R\$ 16.048,00	R\$ 45.675,00	R\$ 29.626,00	R\$ 5.802,00
CORREDOR	R\$ 11.480,00	R\$ 38.268,00	R\$ 20.986,00	R\$ 3.827,00

Os dados obtidos foram utilizados para a escolha de um valor de referência para a terra nas áreas agrícolas de Vera Cruz. Foi de consenso da UGP a utilização do valor de R\$ 16.048,00 reais por hectare, considerando áreas com acesso através de estrada geral localizadas em várzeas. A utilização destas referências, permite que sejam adotados valores com base legal, que passam por atualização monetária anual, que permite que o valor de PSA não fique defasado ao longo do tempo. O ajuste do valor da terra para o uso na calculadora, é realizado através de um fator de multiplicação, que visa aproximar o valor da terra ao custo de oportunidade que fora definido inicialmente no programa. A figura 4 apresente a interface inicial da planilha eletrônica utilizada para o cálculo de PSA, e o questionário de avaliação da propriedade.

1. DADOS DE ENTADA		3. VALOR DO PSA (R\$/produtor/ano)	4. VALOR DO PSA (R\$/ha/ano)
Município de execução do projeto	Vera Cruz - RS	R\$707,95	R\$402,24
Valor mínimo da terra - Decreto nº 6910/2022 - (R\$/hectares)	R\$16.048,00		
Entre com a área de vegetação nativa na propriedade a ser inserida no projeto (hectares)	1,76		
Pontuação final calculadora	0,8355		

2. QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO DA PROPRIEDADE RURAL

GRUPO	ITEM	RESPOSTAS	NOTA
N1 - Conservação de Área Natural	Áreas Naturais	Vegetação nativa preservada ou em estágio inicial/estágio de regeneração	
		Vegetação em estágio inicial de regeneração	
		Área destinada para recuperação	
		Não possui área destinada para recuperação	
	Presença de lago de água ou estocagem	Sim	
		Não possui	
	Presença de cursos d'água	Sim	
		Não possui	
	Presença de florestas ou áreas matiais	Sim	
		Não possui	
Conectividade entre as áreas naturais	Presença conectividade na propriedade		
	Não possui conectividade na propriedade		
Presença florestal/vegetação nativa em áreas de recuperação incluídas nas áreas de recuperação	Sim		
	Não possui		
SOMA PARCIAL			
N2 - Qualidade do Serviço Ambiental	Nível de preservação das APPs em em. legal, conservadas	APP preservada	
		APP não preservada	
	Nível de preservação do RI, previsto no CAR	RI totalmente preservado	
		Não possui RI preservado	
	Presença de espécies exóticas invasoras na área natural	Não há registros exóticas	
		Presença de espécies exóticas com controle	
	Área com vegetação nativa existente a APP	Presença área preservada conforme o APP	
		Não possui área preservada conforme o APP	
	Presença área com vegetação nativa existente a RL	Presença área preservada conforme o RL	
		Não possui área preservada conforme o RL	
Proteção das Áreas Naturais, APP e RL	Não ocorre passagem de animais domésticos ou criação de animais nas áreas destinadas a conservação/recuperação		
	Ocorre passagem de animais domésticos ou criação de animais nas áreas destinadas a conservação/recuperação		
SOMA PARCIAL			
N3 - Gestão da propriedade	Práticas de produção	Presença alguma forma de organização das práticas de produção utilizadas na propriedade	
		Não possui organização das práticas de produção utilizadas na propriedade	
	Porcentagem de Manutenção de Solo nas áreas que produção agrícola	70%	
		51-70%	
		25-50%	
	Bases práticas/produção de cultivo	Adota a utilização responsável de insumos (manejo integrado de pragas, uso sustentável e responsável de fertilizantes)	
		Adota práticas de produção orgânica certificada (seja, CAFE)	
	Cursos e/ou tratamentos	Não adota boas práticas	
		Práticas sustentáveis em relação a boas práticas agrícolas	
	Formas e alguma associação/cooperativa/empresa agrícola	Sim	
Não possui			
Tipo de propriedade (interveniente do agricultor)	Agricultores ou CDP		
	Agricultores ou CDP		
Tratamento de efluentes domésticos	Outras atividades (Fábrica, com bico de produção rural)		
	Sistema de tratamento (fosca, compostura, caldo de gordura) + complemento (ex: zona de mata, lago, lago, lago)		
	Sistema de tratamento com reutilização		
Destinação de resíduos Sólidos	Práticas separação e destinação dos resíduos sólidos (segregação, reciclagem, rejeito + aproveitação)		
	Não separa e não destina corretamente os resíduos domésticos		
Tratamento de dejetos de Animais	Presença tratamento de dejetos de animais		
	Não possui tratamento de dejetos animais		
SOMA PARCIAL			
N4 - Avaliação de Administração	Tempo de participação no Programa	Entre 2 a 10 anos	
		Mais de 10 anos	
		Atende mais que 70%	
Atende mais que 70%	Atende mais que 70%		
	Atende menos que 50%		
SOMA PARCIAL			
N5 - Qualidade da água bruta captada	Índice em pontos decimais (sem subtração medida de TPA) (concentração < 100 N/L)	Menor que 10 N/L	
		Entre 10 e 100 N/L	
SOMA PARCIAL			

Figura 4: representação da Calculadora de PSA aplicada ao Protetor das Águas.

Resultados e Discussão

Síntese dos números do Programa Protetor das Águas

O Programa Protetor das Águas apresentou uma evolução gradativa no número de agricultores contratados ao longo da sua história, iniciando em 2011 com 25 agricultores contratados, e atualmente contando com 103 agricultores, conforme indicado na figura 5. Percebe-se que quatro propriedades estão fora da bacia inicialmente delimitada para trabalho, nesses casos, foram aderidos agricultores que protegem áreas de contribuição para nascentes utilizadas no abastecimento de comunidades rurais, sendo também beneficiados tal qual os produtores da bacia do arroio Andréas, sendo esse benefício instituído pela política municipal de PSA de Vera Cruz.

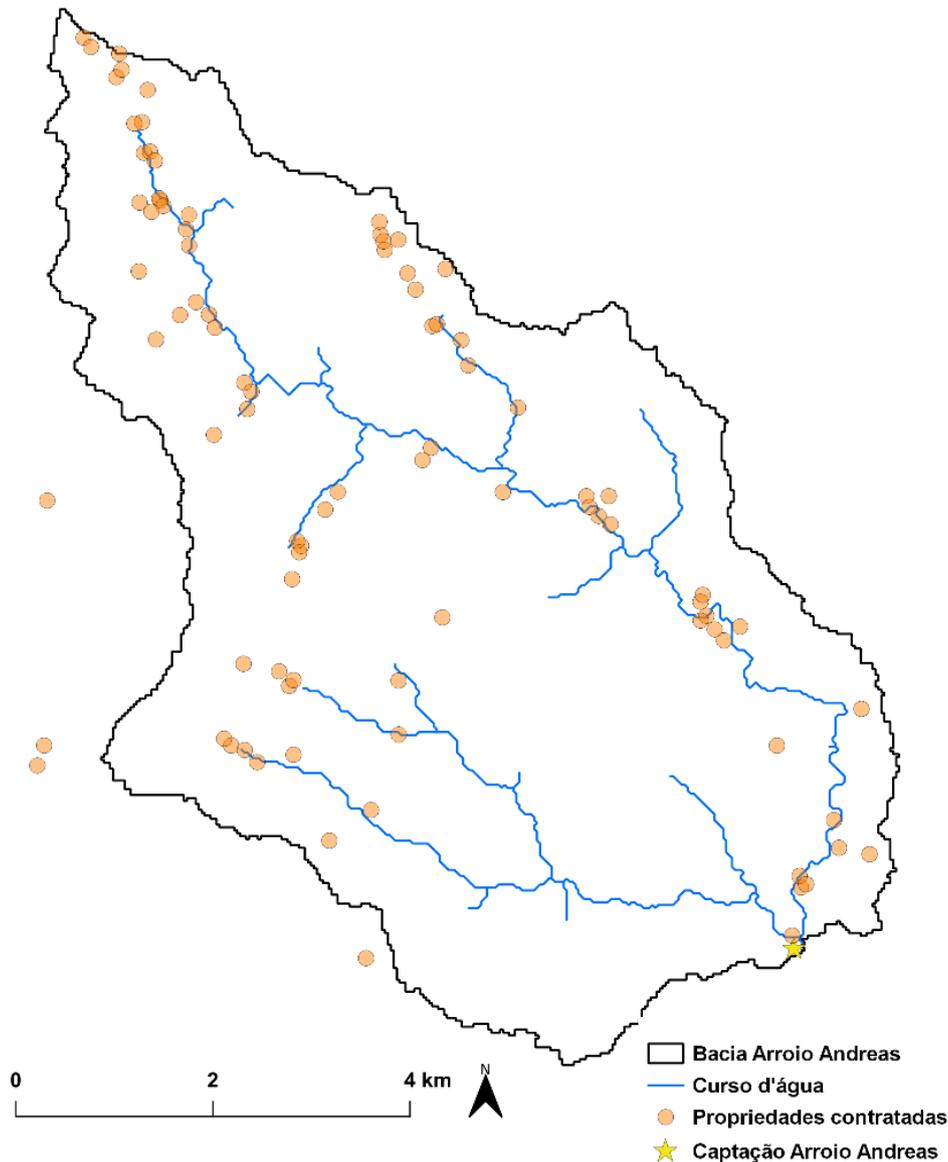


Figura 5: Agricultores contratados pelo Programa Protetor das Águas

Os números atuais de produtores estão sintetizados na tabela 2. Percebe-se que há um número maior de propriedades do que agricultores, isso está associado ao fato de alguns possuírem mais de uma terra incluída no Programa.

Tabela 2: Síntese dos números do Programa Protetor das Águas no ano de 2023

Produtores contratados	Propriedades contratadas	Área total com PSA (Hectares)	Área total das prop. rurais contratadas	Nascentes protegidas
103	106	224	1693	129



De modo a exemplificar a recuperação de algumas das áreas de PSA, ao longo dos 13 anos, é apresentada a figura 6, que mostra o mesmo local, sob o mesmo ponto de vista, antes e após o cercamento. Destaca-se aqui que o efeito da regeneração natural da área, possibilitou uma evolução significativa da vegetação presente.



Figura 6: exemplificação da recuperação da zona ripária em área com PSA.

Os resultados visuais, juntamente com os números obtidos até o ano de 2023, indicam uma evolução significativa do programa, tendo em vista, que no seu período inicial, havia grande resistência dos agricultores na adesão a iniciativa de PSA. Atualmente já existe lista de espera para a adesão de novos produtores, sendo sua inclusão realizada de forma gradativa, conforme disponibilidade de campo da UGP em realizar os diagnósticos. Também destaca-se aqui o uso do cercamento para as áreas de pastagem, como fundamental para a garantia da recuperação do solo e vegetação, onde predominou o uso da regeneração natural, que propiciou uma cobertura significativa de vegetação nativa. Existem problemas associados a presença de espécies exóticas invasoras nessas áreas, especialmente a *Hovenia dulcis*, para qual estão sendo realizadas pesquisas de técnicas de controle atualmente.

Síntese dos resultados de monitoramento da qualidade de água

O monitoramento da qualidade da água, foi dividido em duas fases distintas. A primeira fase, que contempla o período entre 2011 e 2017, indica os resultados iniciais obtidos, destacando que as primeiras análises foram realizadas ainda sem a proteção das áreas de PSA contratadas, durante o período foram coletadas cerca de 1343 amostras em 20 pontos diferentes de monitoramento. Observou-se aumento de 38,0% (de 52% para 90%) de pontos de coleta que foram classificadas como tendo um nível “BOM” (classes de usos do Conama 357/05 1 e 2). Ao mesmo tempo ocorreu redução de 38,0% (de 48% para 10%) de pontos de coleta que foram classificadas como tendo um nível “REGULAR” ou “RUIM” (classe de uso do Conama 357/05 3 e 4).

Alguns parâmetros químicos, podem ser mais sensíveis a variações ao longo do tempo, mesmo em áreas já consolidadas em termos de preservação ou restauração, podendo por condições naturais, como deposição excessiva de folhas e frutos, em áreas com pouca ou nenhuma circulação de água, elevar níveis de DBO₅ e fósforo, e combinada a circulação de animais silvestres pode elevar o número de coliformes. Nessas condições também pode ocorrer a redução do pH e do oxigênio dissolvido.

Evidentemente, esses parâmetros e sua análise histórica são importantes, justamente para observar como podem ocorrer variações suas ao longo do tempo, porém isso não indica que os elementos de proteção associados a vegetação natural não estão resultando em efeitos positivos em relação a qualidade da água. Um parâmetro importante de ser observado é a turbidez, que pode ser definida como uma medida do grau de interferência com a passagem da luz através do líquido. A mudança na penetração da luz na água ocorre na suspensão de partículas sólidas na água, sendo expressa através de unidades de turbidez. A turbidez dos corpos d'água é particularmente alta em regiões com solos erodidos, onde as chuvas podem transportar partículas de argila, silte, areia, fragmentos de rocha e óxidos metálicos do solo. A ausência de vegetação ripária nos cursos de água, combinada a má gestão do solo nas lavouras, potencializa o carreamento de sedimentos para a água, que por consequência, aumentam a sua turbidez. Dessa forma, este parâmetro indica, de forma muito mais precisa, o efeito benéfico que a vegetação ripária traz para os cursos da água, e os serviços ambientais prestados por agricultores que contribuem com sua manutenção e restauração. Dessa forma, uma segunda fase de monitoramento foi iniciada centralizando os pontos de monitoramento em 5 pontos, dos quais três foram selecionados para a elaborar três gráficos com 26 dados analíticos de turbidez, organizados de forma cronológica de 2011 até 2023. Todos os 3 pontos históricos, mostram apesar de variações pontuais, uma clara tendência a redução, tendo em vista que as condições de coletadas foram sempre padronizadas.

Fica evidente que as oscilações pontuais que ocorrem ao longo da série de amostragem claramente perdem intensidade, especialmente quando observados os dados dos pontos P1 e P2. O ponto P5, que representa a integridade da bacia de execução do Programa Protetor das Águas, também apresenta essa tendência, mas ainda sujeita a maiores variações.

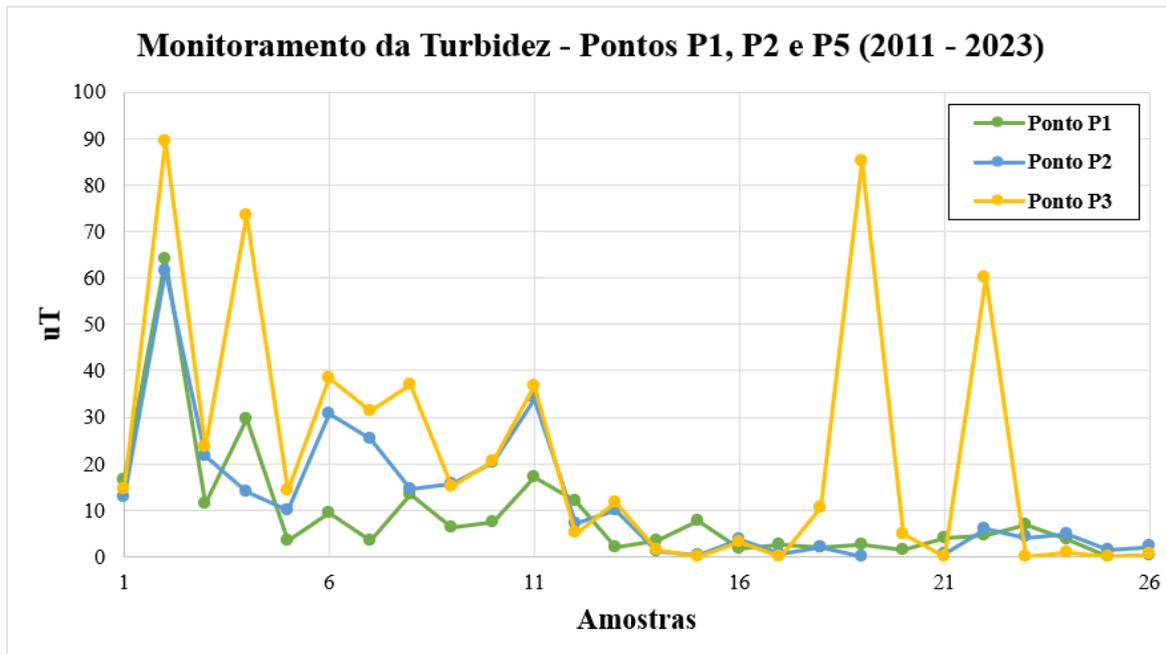


Figura 7: Análise histórica do parâmetro de turbidez (2011-2023) nos Pontos P1, P2 e P5.

Evidentemente que as oscilações observadas são esperadas dentro de uma longa jornada de monitoramento, mas tendo-se em vista que foi mantido um padrão de coletas de amostra de água ao longo de todo o processo, as reduções nos níveis de turbidez são bastante positivas, especialmente nas escalas menores dos cursos de água, onde os efeitos de revegetação são mais evidentes.

Comentários finais

No Brasil, algumas iniciativas que usufruem de esquemas de PSA tem demonstrado ampla relevância em projetos de preservação florestal e no desenvolvimento sustentável. Com base nisso, o Pagamento por Serviços Ambientais através do Projeto Protetor das Águas é uma forma de preservar o meio ambiente, principalmente os recursos hídricos. O caráter preventivo, voluntário e não punitivo deste programa é o que torna diferente dos demais. Tendo em vista esta característica deste programa, espera-se uma grande contribuição de projetos de PSA para as políticas de desenvolvimento sustentável, essencialmente, aquelas que precisam de educação ambiental em bacias hidrográficas. Esses serviços são capazes de favorecer o desenvolvimento sustentável em localidades rurais além de favorecer também a população urbana através do fornecimento de água de boa qualidade.

O programa Protetor das águas, mostra que a articulação entre a academia, setor privado e público pode permitir a realização de ações positivas e perenes, fundamentais quando falamos de conservação e revitalização de uma bacia hidrográfica. A utilização dos dados primários do comitê de bacia, foi fundamental na escolha acertiva da bacia de trabalho, tendo em vista que sua importância para o município de Vera Cruz, e escala, permitiram amadurecer de forma gradativa o projeto até ele se consolidar de fato como um programa. Várias dificuldades básicas que envolveram desde a mobilização dos agricultores, até a definição de um valor adequado de PSA foram vencidas, e com o passar do tempo, o olhar sobre a propriedade rural como um todo passou a ser mais importante do que somente a área ripária protegida.

A recuperação das áreas ripárias teve predominância no uso da regeneração natural, utilizando-se do banco de sementes e espécies da fauna dispersoras mostrou-se adequada a realidade da área de atuação, sendo necessário atualmente o controle de espécies exóticas invasoras.

A utilização de modelagem através de ferramentas computacionais e a inclusão do monitoramento de biodiversidade ao programa, irão permitir a geração de ainda maior de conhecimento associado ao tema de pagamento por serviços ambientais, que ainda tem muito a evoluir no estado do Rio Grande do Sul, estabelecendo cada vez mais uma relação entre a cobertura florestal com vegetação nativa e a água disponível nos mananciais de abastecimento, em termos de qualidade e quantidade. A recuperação de bacias hidrográficas pode ser entendida como fundamental em um mundo em transformação, no qual cada vez mais, incluir a natureza nas soluções de engenharia é fundamental para potencializar seus benefícios, e tornar mais resilientes esses sistemas aos extremos climáticos.

Agradecimentos

Os agradecimentos se estendem a toda as entidades e seus técnicos e colaboradores que compõem a Unidade Gestora do Programa Protetor das Águas e que tornam o desenvolvimento e a expansão deste possível: Philip Morris Brasil, Prefeitura Municipal de Vera Cruz, Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA, Comitê Pardo, Associação dos Fumicultores do Brasil - AFUBRA e Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural



EMATER/RS-ASCAR.

Referências Bibliográficas

Attanasio, Cláudia M.; Lima, Walter De P.; Gandolfi, Sergius; Zákia, Maria J. B.; Júnior, José C. T. V. Método para a identificação da zona ripária: microbacia hidrográfica do Ribeirão São João (Mineiros do Tietê, SP). *Scientia Forestalis*, n. 71. 2006. p. 131-140.

Costanza, R., De Groot, R., Sutton, P., Van Der Ploeg, S., Anderson, S. J., Kubiszewski, I., Farber, S., & Turner, R. K. (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 26(1), 152–158. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>

Hasan, Shaikh S.; Zhen, Lin; Miah, Md. Giashuddin; Ahamed, Tofayel; Samie, Abdus. Impact of land use change on ecosystem services: A review. *Environmental Development*, v. 34. 2020.

Millenium ecosystem assessment. Guide to the millennium assessment report. <https://www.millenniumassessment.org/en/index.html>. 2005.

PNUMA. Relatório anual. Disponível em: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/37946/UNEP_AR2021_PT.pdf.

Vonada, R., Borges, B. (Org). Aprendendo sobre Serviços Ambientais. Manual de orientação para o desenvolvimento dos subprogramas do Sistema de Incentivos a Serviços Ambientais (SISA) do Acre. Forest Trends e The Katoomba Group, 2011. (http://www.forest-trends.org/documents/files/doc_2542.pdf). 2011.

Wunder, S.; Börner J.M.; Rüginitz, T.; Pereira, L. Pagamentos por serviços ambientais: perspectivas para a Amazônia legal. MMA, Série de Estudos 10, Brasília, 2009. ([http://www.mma.gov.br/estruturas/168/_publicacao/168_publicacao17062009123349 .pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/168/_publicacao/168_publicacao17062009123349.pdf)).



PREVISÃO DE SÉRIES TEMPORAIS DE VAZÃO DO RESERVATÓRIO TRÊS MARIAS A PARTIR DE MODELOS HÍBRIDOS DE MÁQUINA DE APRENDIZADO (DWT-RNA) E APRENDIZADO PROFUNDO (VMD-LSTM)

1Luiz Eduardo da Silva Nunes, 2Matheus Henrique Monteiro Silva, 3Pedro Angelo Palagani Neri, 4Pedro Vinícius Correia da Costa, 5Frede de Oliveira Carvalho

1 Universidade Federal de Alagoas, e-mail: luiz.nunes@ctec.ufal.br; 2 Universidade Federal de Alagoas, e-mail: matheus.monteiro@ctec.ufal.br; 3 Universidade Federal de Alagoas, e-mail: pa.pedroangelo@gmail.com; 4 Universidade Federal de Alagoas, e-mail: pedro.costa@ctec.ufal.br; 5 Universidade Federal de Alagoas, e-mail: fredecarvalho@ctec.ufal.br

Palavras-chave: previsão; vazão; inteligência artificial.

Resumo

A previsão de variáveis hidrológicas é crucial para a eficiente gestão hídrica, de modo que pode auxiliar em áreas como o planejamento, operação e estudo de eventos extremos como enchentes e secas. Neste contexto, o objetivo do trabalho foi o estudo da eficiência da previsão de séries temporais das vazões diárias do reservatório Três Marias, Rio São Francisco, Brasil, a partir de dados históricos de 1931 a 2018, e de técnicas de aprendizado de máquina e aprendizado profundo, baseadas em sistemas inteligentes denominados de modelos empíricos em conjunto com a *transformada wavelet discreta* (DWT, do inglês, *discrete wavelet transform*) e a *decomposição de modo variacional* (VMD, do inglês, *variational mode decomposition*). Na modelagem empírica - em sistemas inteligentes para previsões de séries temporais - foram investigadas as máquinas de aprendizado MLP (*multilayer perceptron*), como o tipo de RNA (rede neural artificial) aplicada, e LSTM (*Long-short term memory*), e os modelos híbridos (algoritmo de decomposição com previsão) DWT-RNA e VMD-LSTM desenvolvidos na linguagem *Python*. Conforme indicado pelos resultados, os modelos híbridos DWT-RNA e VMD-LSTM tiveram desempenho relativamente melhor do que as redes RNA e LSTM, respectivamente. O modelo DWT-RNA obteve as seguintes métricas: Coeficiente de Determinação (R^2) = 0,99976; Raiz Quadrada do Erro-Médio (RMSE) = 0,0013954; Erro Absoluto Médio (MAE) = 0,00066366; Raiz do Erro Quadrático Médio padronizado (RSR) = 0,2180; Viés percentual (PBIAS) = - 0,22590; Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) = 0,99975, enquanto o modelo VMD-LSTM obteve Coeficiente de Determinação (R^2) = 0,998 ; Raiz Quadrada do Erro-Médio (RMSE) = 0,002; Erro Absoluto Médio (MAE) = 0,0009; Raiz do Erro Quadrático Médio padronizado (RSR) = 0,062; Percentual de viés (PBIAS) = -0,432; Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) = 0,996. Assim, avaliou-se que a utilização desses dois modelos híbridos permite prever com precisão e qualidade a vazão diária do reservatório, de modo a fornecer valiosa ferramenta para a gestão deste.

Introdução

A utilização de métodos e análises preditivas de séries temporais de vazão em cursos d'água tem sido tratada com ênfase na literatura recente e teve sua eficácia mostrada em diversas situações, principalmente na mitigação de impactos negativos ao meio ambiente, como por exemplo nos estudos de regiões de climas complexos, onde há inúmeras variáveis meteorológicas (CONNOR et al., 2019, Paterson e Godsmark, 2020, Sweeney, 2020). Uma série temporal é caracterizada pela dependência de dados em relação ao tempo, de modo que as informações podem ser energéticas (CHEN et al., 2018; QUAN; SHANG, 2020), econômicas (SIVAPURAPU, 2020), químicas (ZHANG et al., 2019), entre outras (SARAIVA et al., 2021; Bui et al, 2018; Wang e Zhang, 2019; Interdonato et al, 2019).

As previsões de séries temporais de curto e longo prazo de vazão em cursos d'água são de grande interesse na hidrologia (Sahoo et al, 2019), pois são importantes para o planejamento eficiente da gestão e controle sustentável dos recursos hídricos, a exemplo da previsão de períodos mais secos ou chuvosos, os quais impactam diretamente nos projetos de infraestrutura hidráulica e geração de energia elétrica (ZHAO & ZHAO, 2014). No entanto, uma das maiores dificuldades para este tipo de gestão é obter um conhecimento profundo do sistema, uma vez que os sistemas hidrológicos são complexos e a obtenção das informações e dados necessários para uma análise completa pode ser um processo longo (LOUCKS et al., 2017).

Assim, os modelos hidrológicos, que são uma simplificação dos sistemas do mundo real, surgiram como ferramentas importantes que auxiliam na tomada de decisões, uma vez que podem ser utilizados para compreender, prever e gerir os recursos hídricos, desde modelos físicos que utilizam equações e parâmetros para definirem os sistemas meteorológicos, a modelos empíricos baseado em algoritmos, sejam eles lineares ou não, que aprendem a partir do histórico de dados utilizados. Nestas situações, Shortridge et al., (2016) afirmam que os modelos empíricos baseados em histórico de dados são instrumentos bastante úteis em detrimento a modelos físicos, apesar destes ainda serem mais adequados para modelagem de fluxos de água.

É importante destacar que, segundo Shalamu et al (2009), devido a séries temporais de chuva-vazão e fluxo de água não serem lineares e nem estacionários, métodos empíricos lineares como autoregressivo (AR), média móvel autoregressiva (ARMA), média móvel integrada autoregressiva (ARIMA) acabam não conseguindo bons resultados de previsão, devido aos



inúmeros parâmetros que envolvem a modelagem. Porém, segundo Zounemat-Kermani et al (2021), os métodos de aprendizado de máquina se tornaram cada vez melhores, superando modelos como o ARIMA, por conseguirem identificar os padrões inerentes nos dados, e assim, graças ao desenvolvimento da tecnologia, aprimoramento da capacidade dos sensores de realizar medidas de qualidade e do aumento de memória para armazenar dados, esses métodos vêm se destacando nas últimas duas décadas. Este destaque é perceptível no número de trabalhos que relatam o bom desempenho desses métodos, como previsão de produção de reservatórios de petróleo (WANG, 2021), e previsão diária de vazão de reservatório de água (SARAIVA, 2021).

Dentre esses métodos de aprendizagem de máquina, há vários modelos de previsão de vazão de rios, dos quais destaca-se a rede MLP, do inglês multilayer perceptron (Figura 1), uma rede neural artificial (RNA), ou seja, um modelo preditivo baseado no funcionamento do cérebro, constituído por neurônios artificiais, que realizam funções específicas, conectados uns aos outros com pesos cujo ajuste levará ao aprendizado da rede. As MLPs possuem capacidade de modelar sistemas não-lineares sem a necessidade de realizar suposições sobre a interação das variáveis que compõem tais sistemas (RIAD et al., 2004). Entretanto, devido à MLP originalmente trabalhar com dados estáticos, sem dependência temporal, é necessário implementar o atraso do tempo nos dados (lag) para criar as séries temporais.

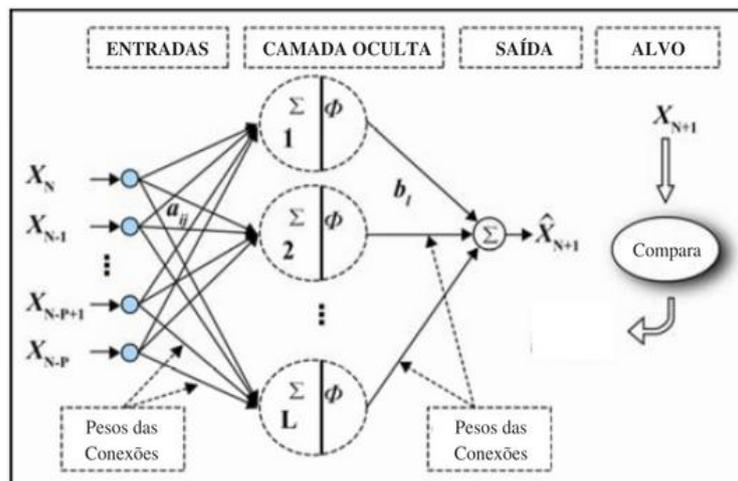


Figura 1: RNA.

Adaptado de: KRISHNA et. al, 2011

Porém, para alguns casos, a complexidade dos dados dificulta o desempenho dos modelos de aprendizado de máquina. Neste contexto, apresenta-se o aprendizado profundo (do inglês, deep learning), uma classe de máquinas de aprendizado robustas de múltiplas camadas que elevam o nível de aprendizado sendo bastante utilizados na resolução de problemas envolvendo a predição de séries temporais (Ciaburro e Iannace, 2021; Torres et al, 2021).

Dentre essas máquinas de aprendizado profundo, encontram-se as redes recorrentes, que tem sua arquitetura baseada na cronologia dos dados, ou seja, na relação com o tempo. A LSTM (do inglês, *Long-short term memory*) é uma rede desenvolvida para lidar com séries temporais, devido a sua capacidade de manter uma memória de curto e de longo prazo (SHRESTHA; MAHMOOD, 2019). Esta memória foi desenvolvida baseada no cérebro humano, criando mecanismos para guardar as informações que são consideradas relevantes durante grandes períodos e descartar aquelas que não forem, enquanto processa novas informações.

A LSTM é formada por blocos de memória (células), representados pela figura 1, os quais são compostos pelos chamados estados ocultos (h , do inglês *hidden state*) responsável pela memória de curto prazo, pelo estado da célula (c , do inglês *cell state*) responsável pela memória de longo prazo e pelos portões de esquecimento (f , do inglês *forget gate*), entrada (i , do inglês *input gate*) e saída (o , do inglês *output gate*) responsáveis pela atualização e manutenção da memória.

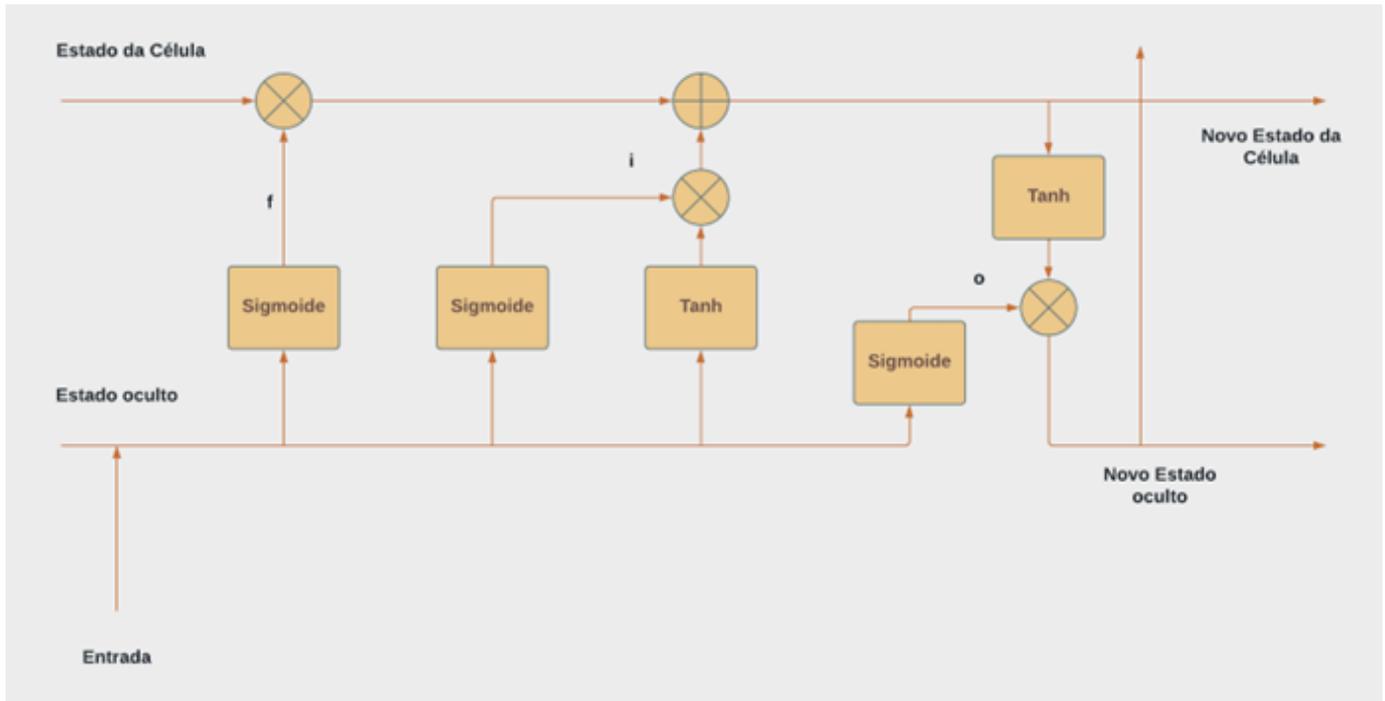


Figura 1: LSTM.

Adaptado de: KRISHNA *et. al.*, 2011

Para assegurar a qualidade dos dados destinados ao processo de treinamento das redes, é fundamental aplicar métodos que eliminem valores que prejudiquem o desempenho dos modelos tais como dados nulos, discrepantes (*outliers*) e ruidosos. Desta maneira, devido a complexidade inerente de certas séries temporais, como por exemplo comportamentos não-lineares e ruidosos, mesmo a aplicação de pré-tratamentos convencionais e conceituados podem falhar em entregar as informações verdadeiras contidas nos dados. Para isso, algoritmos de decomposição, como a transformada wavelet e a VMD podem ser utilizados como métodos de pré-processamento dos dados, pois extraem seus componentes de frequência verdadeiros e, assim, descrevem de forma adequada o comportamento do sinal (SEO *et al.*, 2018; SARAIVA *et. al.*, 2021).

A transformada wavelet pode ser realizada de três formas: DWT, transformada *wavelet packet* (WPT, do inglês, *wavelet packet transform*) e transformada wavelet contínua (CWT, do inglês *continuous wavelet transform*). A análise DWT consiste na divisão dos componentes da frequência do sinal de acordo com sua magnitude, assim, a decomposição do sinal é expressa em dois tipos de coeficientes: aproximação (baixa frequência) e detalhe (alta frequência), os quais atuam como filtros para as frequências do sinal.

Outra técnica de decomposição conhecida é a VMD (do inglês, *variational mode decomposition*), uma abordagem recente (DRAGOMIRETSKIY; ZOZZO, 2014) que vem se destacando por sua abordagem variacional do problema, a partir da otimização de K frequências centradas, chamadas de IMFs (do inglês, *intrinsic mode functions*), para a melhor reconstrução do sinal original sem a presença de fontes de ruído (SHAO; YAN; ZENG, 2022). A VMD é uma análise não recursiva e adaptativa do componente modal, cujo princípio é o uso da transformada de Hilbert para obter, para cada IMF, um sinal unidimensional. Posteriormente, adicionam-se informações sobre a frequência para encontrar os IMF 's que melhor se assemelham aos componentes da série original. É necessário realizar uma otimização nos parâmetros da VMD para evitar duplicação ou ausência de informações e presença significativa de ruídos nos IMF 's (DRAGOMIRETSKIY; ZOZZO, 2014b). Além disso, em vez de uma estrutura única, tem-se que o VMD vai decompor a série em um número K de IMF's, onde cada IMF será um novo conjunto de dados que pode ser considerado uma série temporal.

Deste modo, a combinação dessas técnicas de decomposição de sinais aliadas a técnicas de previsão de séries temporais compõe parte dos chamados modelos híbridos. Estes modelos são denominados deste modo pois combinam os benefícios de mais de um tipo de algoritmo distinto para realização de uma tarefa. Dessa maneira, os modelos híbridos de decomposição-predição utilizam do tratamento de sinais para melhorar a qualidade dos dados fornecidos para os algoritmos de previsão e assim aumentam seu desempenho em relação a outros modelos que não utilizam este tipo de pré-tratamento. (SHAO; YAN; ZENG, 2022; SIBTAIN *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2021).

Dessa forma, este trabalho objetivou estudar a eficiência de modelos de máquinas de aprendizado empíricos não lineares (RNA e LSTM) como também de modelos híbridos (DWT-RNA e VMD-LSTM), em linguagem Python, para a previsão de vazões diárias na bacia hidrográfica do Alto Rio São Francisco, localizada no estado de Minas Gerais, correspondente a 87 anos. Os desempenhos dos modelos foram comparados através das seguintes métricas: Coeficiente de Determinação (R^2); Raiz Quadrada do Erro-Médio (RMSE); Erro Absoluto Médio (MAE); Raiz do Erro Quadrático Médio padronizado (RSR); Viés percentual (PBIAS); Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE).



Material e Métodos

A metodologia do trabalho teve como objetivo comparar o desempenho dos modelos de máquinas de aprendizado empíricos não lineares RNA e LSTM e os dois modelos híbridos, DWT-RNA e VMD-LSTM, para previsão de vazões de reservatório. Os dados utilizados neste estudo foram provenientes do reservatório da Usina Hidrelétrica de Três Marias, fornecidos pelo professor Celso Augusto Guimarães Santos, CT- Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade da Paraíba. A Figura 1 apresenta 87 anos de registros diários de vazões do reservatório Três Marias, entre 1931 e 2018, totalizando 32142 dados, a fim de se obter visão geral da série temporal de vazões diárias.

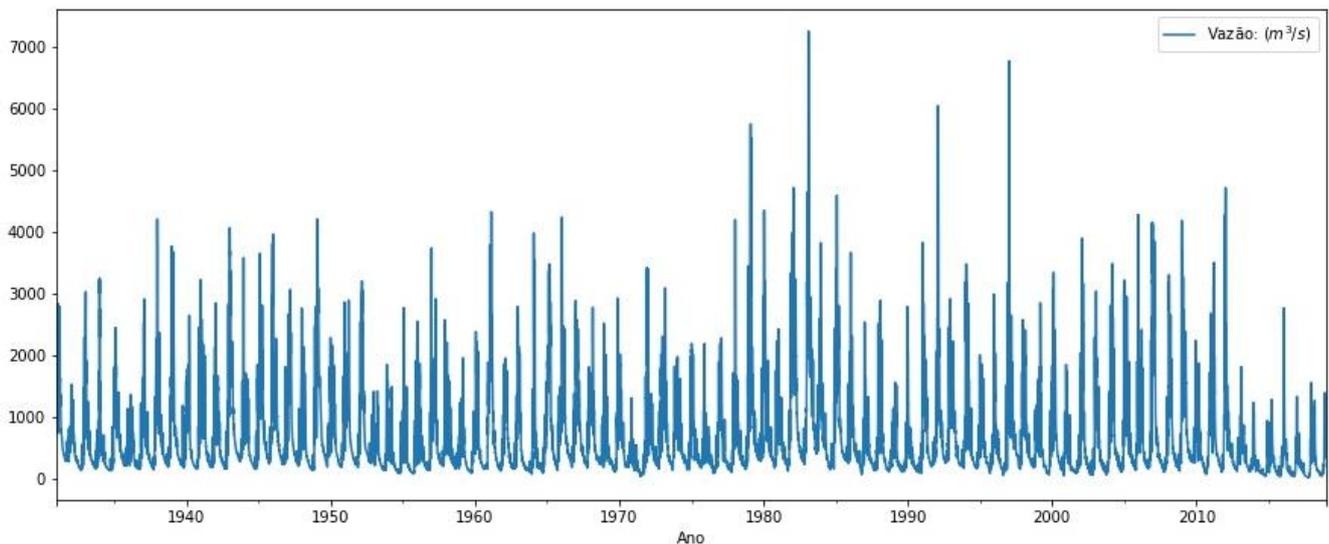


Figura 2: Gráfico da série temporal diária de vazões do reservatório Três Marias.

A fim de eliminar erros grosseiros, aplicou-se, como pré-tratamento dos dados, o filtro de *Hampel* e interpolação linear no preenchimento dos dados removidos da série temporal, como sugerido por Zhang et al. (2019), visto que para métodos monovariáveis, a interpolação linear é a melhor opção (JUNNINEN et al., 2004) e, uma vez que se trata de uma série temporal, a falta de dados inviabilizaria o modelo preditivo. Para utilização do filtro, realizaram-se testes com as estimativas de valores para o tamanho da janela deslizante e o número de desvios que identificam o *outlier* para o filtro de *Hampel*, além da normalização dos dados. Esse método consiste em uma janela deslizante com o comprimento ajustável pela série temporal. Para cada janela, o filtro calcula a média e o desvio-padrão da janela, a partir do desvio médio absoluto (DMA).

DWT-RNA

Construíram-se três modelos preditivos: o primeiro modelo (Figura 2) é uma rede MLP (RNA Autorregressiva Não Linear), na qual implementaram-se atrasos de tempo (*lag*) para a construção da memória de curto prazo da rede. Os dados de entrada foram separados de forma aleatória, 20% para o teste das redes e 80% para o treino. (KABIR et al., 2020).

Os outros dois modelos (Figuras 3 e 4) utilizaram o pré-tratamento com a Decomposição Wavelet Discreta (DWT), com nível de decomposição determinado pelo logaritmo do número total de dados da série temporal (SEO et al., 2018). Assim, como há 32142 dados, o nível de decomposição ideal é 4.

O modelo DWT-RNA 1 (Figura 3) baseou-se no uso da DWT da série temporal original em subséries, as quais foram utilizadas como entradas para o modelo, enquanto o modelo DWT-RNA 2 (Figura 4) consiste em uma combinação de redes MLP para previsão dos coeficientes, os quais são utilizados na reconstrução do sinal, a partir da aplicação da transformada wavelet inversa. Em ambos os modelos, determinou-se o *lag* (atraso) pelo método de tentativa-erro.

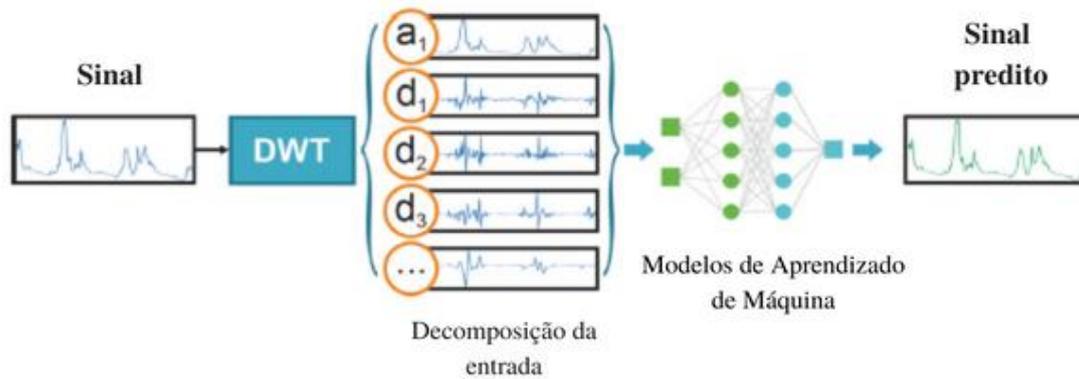


Figura 3: Modelo DWT-RNA 1.
Adaptado de: SARAIVA et al., 2021

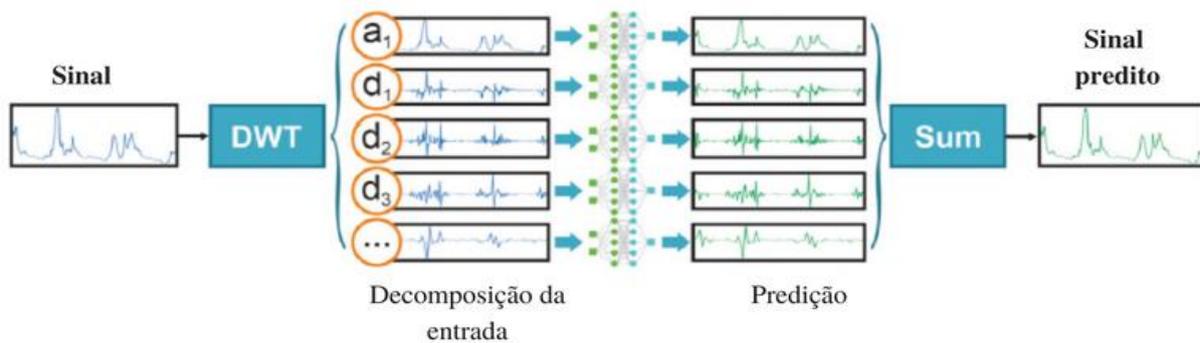


Figura 4: Modelo DWT-RNA 2.
Adaptado de: SARAIVA et al., 2021

VMD-LSTM

Construíram dois modelos: O primeiro modelo (Figura 5) é uma LSTM, cujos dados foram separados em 80 % para treino, 10% para validação e 10% para teste. As informações temporais dos dados são fornecidas ao treinamento da rede através do atraso de tempo (ou lag) que informará a rede uma quantidade de dias atrás para um determinado valor no dia seguinte. A determinação do lag e do número de neurônios foi realizada pelo método de *Random Search* que os varia com objetivo de utilizar os dados de validação para achar o melhor conjunto de parâmetros dentro de um intervalo arbitrado. Como existe uma infinidade de valores possíveis para o lag, este foi restringido a um intervalo menor levando em consideração a capacidade da LSTM de aprender as relações de longas sequências temporais e, portanto, não devendo o valor do lag ser muito pequeno, já que se podem perder informações importantes de longo prazo, ou muito grande já que as informações podem ser redundantes (WANG et al., 2021).

O segundo modelo (Figura 6) é um modelo híbrido entre a LSTM e a VMD, de modo que é possível utilizar a rede LSTM para prever o próximo valor do IMF. Logo, utiliza-se K redes LSTM, uma para cada IMF, prevendo um dia a frente. É importante mencionar que cada rede LSTM utilizada tem seus parâmetros otimizados, sendo apenas o *lag* um valor comum a todas as redes. E por fim, a série é reconstruída realizando a soma dos sinais por instante e foi realizada a otimização da rede.

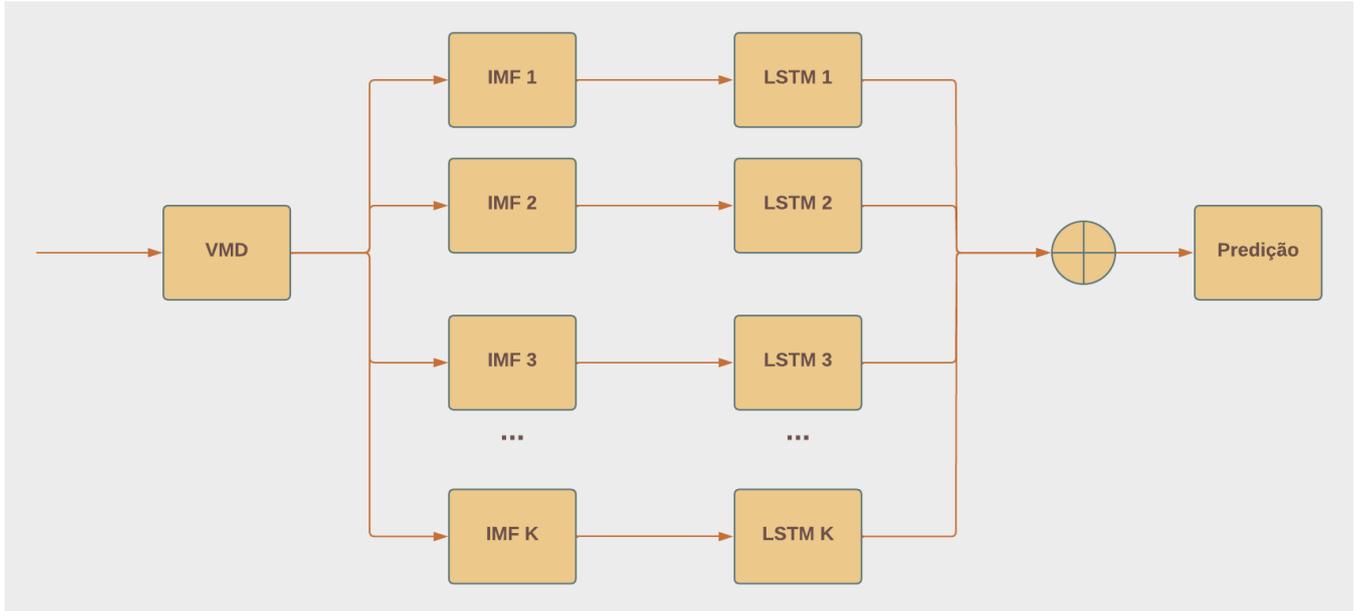


Figura 6: Modelo VMD-LSTM.
Adaptado de: KRISHNA *et. al*, 2011

Os desempenhos dos modelos foram avaliados através das seguintes métricas: Coeficiente de Determinação (R^2); Raiz Quadrada do Erro-Médio (RMSE); Erro Absoluto Médio (MAE); Raiz do Erro Quadrático Médio padronizado (RSR); Viés percentual (PBIAS); Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE). (MORIASI *et al.*, 2007) O NSE é indicado para avaliar quão bem o modelo simula as tendências dos dados, sendo utilizado para diversos tipos de tarefas como vazão de rio, sedimentação entre outros. O RSR é uma medida de erro com fator de escala ou normalização, o que permite comparar diferentes magnitudes. O R^2 é uma métrica amplamente utilizada e determina o grau de colinearidade entre a previsão e os dados reais. PBIAS é utilizado para avaliar o quanto o modelo é capaz de simular a magnitude média da variável prevista, apontando se há ou não uma previsão de valores muito acima (overpredicting) ou muito abaixo (underpredicting). O RMSE e a MAE são métricas comumente utilizadas e retornam a valores que permitem a interpretação da grandeza do erro.

Resultados e Discussão

DWT-RNA

Realizaram-se testes, por método de tentativa-erro, e o conjunto de *outliers* com melhor representatividade estatística obteve o tamanho da janela deslizante = 5 e número de desvios que identificam o outlier = 3, dessa forma, entre os 32142 dados da série temporal de vazão, 687 foram considerados como outliers (2,14% do conjunto total).

Com a rede MLP, por meio do método tentativa-erro, os melhores resultados foram obtidos para $lag = 7$ e, portanto, utilizaram-se 8 neurônios na camada oculta da rede.

Quanto ao modelo 2, através do método tentativa-erro, obteve-se que a melhor “wavelet mãe” (função que melhor se adequa à série temporal) para o modelo foi a função ‘haar’. Para a camada oculta da rede neural, o número de neurônios do modelo híbrido DWT-RNA foi determinado a partir do nível de decomposição (N) aplicado com a DWT, nesse caso $N = 4$, assim, o número de neurônios na camada oculta, dada por $N+1$, tem-se $N = 5$.

Para o modelo 3, assim como no modelo 2, através do método tentativa-erro, a wavelet mãe obtida foi a função biorthogonal reversa. Para a camada oculta da rede neural o melhor desempenho foi obtido com o número de neurônios iguais a 7.

O modelo DWT-RNA 1 apresentou um desempenho relativamente superior (Tabela 1) quando comparado aos outros dois modelos. A Figura 7 ilustra como as vazões previstas por este modelo se ajustaram às vazões reais (observadas).



Tabela 1: Métricas aplicadas nos modelos investigados

Modelo	R ²	RMSE	MAE	RSR	PBIAS (%)	NSE
RNA	0,96619	0,21777	0,092390	0,18985	-1,1778	0,96395
DWT-RNA 1	0,99976	0,0013954	0,00066366	0,015574	-0,22590	0,99975
DWT-RNA 2	0,95230	0,013162	0,0084446	0,21850	0,11010	0,95226

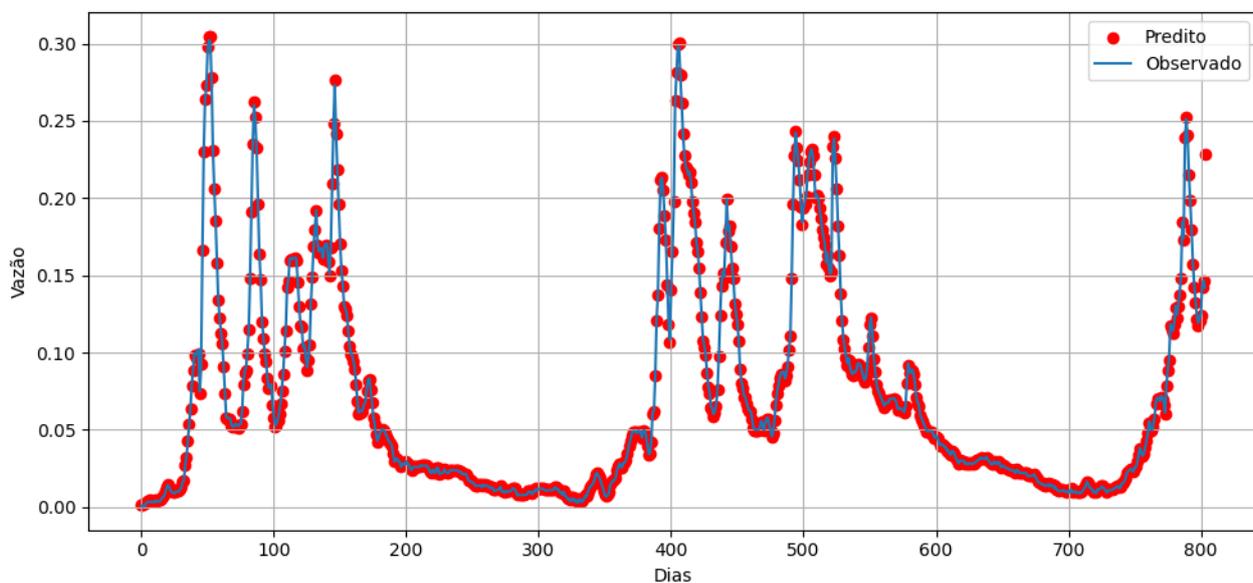


Figura 7: Previsão obtida pelo modelo DWT-RNA 1.

VMD-LSTM

A partir do método de *Random Search*, variando os parâmetros dentro de um intervalo arbitrado, o melhor conjunto de *lag* e número de neurônios encontrado para o modelo LSTM foram, respectivamente 11 e 45.

Para o modelo VMD-LSTM, encontraram-se, através de tentativa e erro, os melhores valores para cada parâmetro: 10 IMF's e $\alpha = 2000$.

Ao avaliar as métricas (Tabela 2), a combinação entre as redes VMD-LSTM resultou em um melhor desempenho em relação ao LSTM, o que já era indicado por Seo et al. (2018). Neste caso, a VMD que decompôs as informações em séries menos complexas, melhorou a capacidade das LSTM de cada IMF de prever os dados, o que causou, após a reconstrução, a melhora na predição da série original (Figura 8).

A desvantagem do modelo VMD-LSTM é o processamento computacional. Em um computador com processador AMD A10-8700P Radeon, o processamento foi de pouco mais de 164 horas. Isso se deve ao fato do modelo necessitar realizar diversas otimizações atreladas ao número de IMF 's (K), uma vez que, para cada IMF haverá a otimização de uma rede LSTM que irá realizar a previsão do mesmo. Ou seja, para o caso de dez IMF 's, haverá dez otimizações de redes LSTM utilizadas no modelo. E, por isso, a busca por um K ótimo dentro de um intervalo se torna demorada. Sendo esta situação uma motivação para futuras investigações.



Tabela 2: Métricas dos modelos

Modelo	R ²	RMSE	MAE	RSR	PBIAS (%)	NSE
LSTM	0,985	0,009	0,0041	0,128	-0,613	0,983
VMD-LSTM	0,998	0,002	0,0009	0,062	-0,432	0,996

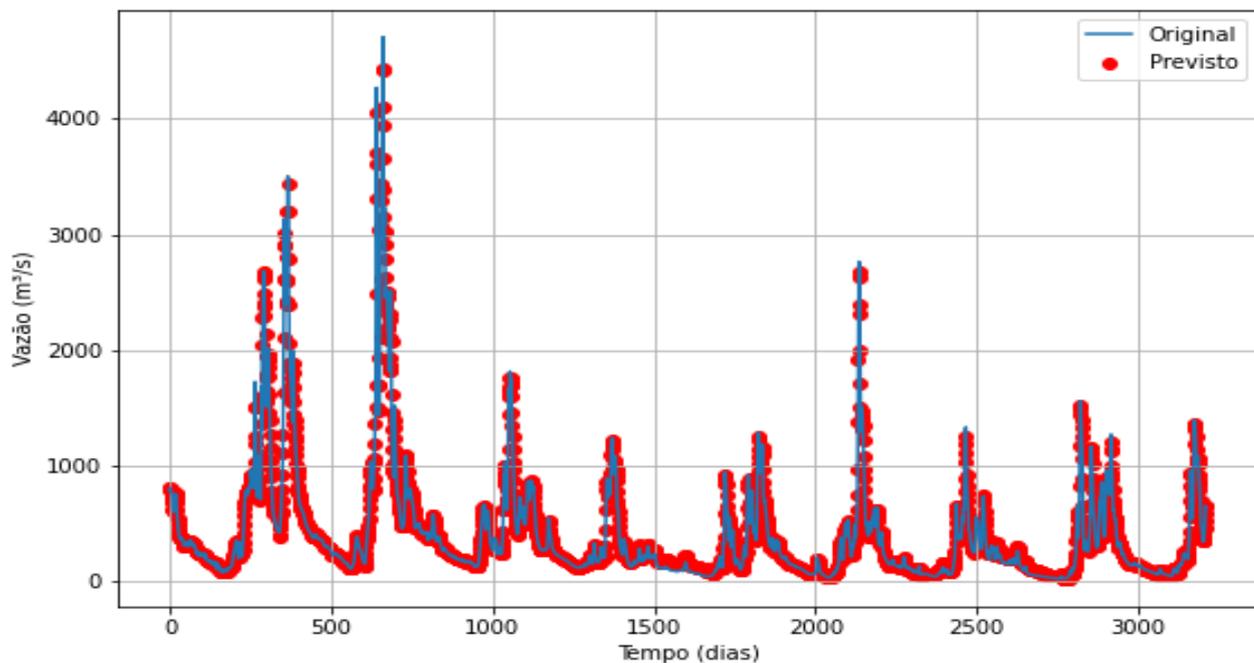


Figura 8: Comparação da série predita e a série original.

Considerações Finais

Modelos de previsão de séries temporais de vazão são essenciais para uso eficiente dos recursos hídricos de uma região. No presente trabalho, foram avaliadas metodologias para a aplicação de diferentes máquinas de aprendizado para a realização da previsão de vazão do reservatório Três Marias, Rio São Francisco, Brasil. Nesse contexto, utilizou-se as redes RNA e LSTM, as quais estão presentes em estudos mais recentes na bibliografia consultada, para a realização das análises. Os modelos foram avaliados da seguinte forma: realização do pré-tratamento com DWT para redes RNA e, para redes LSTM, aplicou-se o pré-tratamento com VMD. Os principais resultados obtidos foram:

Para as redes RNA, os modelos DWT-RNA, apresentaram relativa superioridade, em especial o modelo DWT-RNA 1, quanto ao desempenho do modelo que utiliza apenas RNA, o que evidencia a importância da realização do pré-tratamento dos dados;

Para as redes LSTM, analogamente às redes RNA, o modelo VMD-LSTM, também apresentou relativa superioridade quando comparado ao modelo que utiliza somente redes LSTM;

Alta aplicabilidade das rotinas computacionais disponíveis em linguagem *Python*, o que representa uma facilidade para aqueles que buscam realizar uma aplicação similar a esse artigo, assim como em diversas outras áreas.

De forma geral, ambas as metodologias, modelos híbridos DWT-RNA e VMD-LSTM, mostraram-se capazes de apresentar métricas de desempenho significativo como proposto por Morasi *et al.* (2007). Portanto, a partir da série temporal de vazão, observou-se que as metodologias avaliadas são promissoras no que tange o desenvolvimento de uma ferramenta de previsão de vazão diária em um dia à frente, de modo a fornecer uma significativa contribuição na gestão dos recursos hídricos. Além disso, tais metodologias também podem ser potencialmente implementadas em diversas séries temporais tais quais: precipitação, temperatura e sedimentação.



Agradecimentos

Os Autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas (FAPEAL) e à Universidade Federal de Alagoas pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

- BUI, C; PHAM, N; VO, A; TRAN, A; NGUYEN, A; LE, T. 2018. Time series forecasting for healthcare diagnosis and prognostics with the focus on cardiovascular diseases. In: Proceedings of the International Conference on the Development of Biomedical Engineering in Vietnam. USA. p. 809–818.
- CIABURRO, G; IANNACE, G. 2021. Machine Learning-Based Algorithms to Knowledge Extraction from Time Series. p. 6 - 55.
- CHEN, J. 2018. Wind speed forecasting using nonlinear-learning ensemble of deep learning time series prediction and extremal optimization. *Energy Conversion and Management*, [s. l.], v. 165 p. 681–695.
- DRAGOMIRETSKIY, K; ZOSSO, D. 2014. Variational mode decomposition. *IEEE Transactions on Signal Processing*, [s. l.], v. 62, n. 3, p. 531–544.
- INTERDONATO, R; IENCO, D; GAETANO, R; et al. 2019. DuPLO: A DUal view Point deep Learning architecture for time series classificatiOn. *ISPRS J Photogramm Remote Sens.* p. 91–104.
- JUNNINEN, H; NISKA, H; TUPPURAINEN, K; RUUSKANEN, J; KOLEHMAINEN, M. 2004. Methods for imputation of missing values in air quality data sets. *Atmospheric Environment*, v.38, p.2865-2907.
- KABIR, S PATIDAR, S; PENDER, G. 2020. Investigating capabilities of machine learning techniques in forecasting stream flow. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*. v.173, n 2, .69-86.
- KRISHNA, B; YR SATYAJI, R; PC, N. 2011. Time series modeling of river flow using wavelet neural networks. *Journal of Water Resource and Protection*, v. 2011.
- MORIASI, D. N et al. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, [s. l.], v. 50, n. 3.
- QUAN, J; SHANG, L. 2020. Short-term wind speed forecasting based on ensemble online sequential extreme learning machine and Bayesian optimization. *Mathematical Problems in Engineering*, [s. l.], v. 2020.
- SARAIVA, S. V et al. 2021. Daily streamflow forecasting in Sobradinho Reservoir using machine learning models coupled with wavelet transform and bootstrapping. *Applied Soft Computing*, v. 102, p. 107081.
- SEO, Y; KIM, S; SINGH, V. P. 2018. Machine learning models coupled with variational mode decomposition: A new approach for modeling daily rainfall-runoff. *Atmosphere*, v. 9, n 7, p. 251.
- SHAO, B; YAN, Y; ZENG, H. 2022. VMD-WLSLSTM Load Prediction Model Based on Shapley Values. *Energies*, [s. l.], v. 15, n. 2.
- SHRESTHA, A.; MAHMOOD, A. 2019. Review of Deep Learning Algorithms and Architectures. *IEEE Access*, v. 7, p. 53040–53065.
- SIBTAIN, M et al. 2021. Applicability of a three-stage hybrid model by employing a two-stage signal decomposition approach and a deep learning methodology for runoff forecasting at swat river catchment, Pakistan. *Polish Journal of Environmental Studies*, [s. l.], v. 30, n. 1.
- SIVAPURAPU, S. 2020. Comparative study of time series and deep learning algorithms for stock price prediction. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, [s. l.], v. 11, n. 6, p. 460–470.
- TORRES, JF; HADJOUT, D; SEBAA, A; MARTÍNEZ-ÁLVAREZ, F; TRONCOSO, A. 2021. Deep learning for time series forecasting: a survey. *Big Data* 9:1. p. 3–21.



WANG, F. et al. 2021. Reservoir Production Prediction Based on Variational Mode Decomposition and Gated Recurrent Unit Networks. IEEE Access, [s. l.], v. 9.

WANG, H; LEI Z; ZHANG, X et al. 2019. A review of deep learning for renewable energy forecasting. Energy Conv Manage. 198:111799.

ZHANG, Q; LI, Z; SNOWLING, S; SIAM, A; EL DAKHAKHNI, W. 2019. Predictive models for wastewater flow forecasting based on time series analysis and artificial neural network. Water Science & Technology, v. 80, n.2, p. 243-253.

ZHAO, T.;ZHAO, J. 2014. Joint and respective effects of long-and short-term forecast uncertainties on reservoir operations. Journal of hydrology, v. 517, p, 83-94.

ZOUNEMAT-KERMANI, M; MAHDAVI-MEYMAND, A; HINKELMANN, R. 2021. A comprehensive survey on conventional and modern neural networks: application to river flow forecasting. Earth Sci Inform 14, p. 893-911.