

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO  
AMBIENTAL

FLAVIO FAGUNDES DE PAULA

**MUDANÇAS NA COR DA ÁGUA RELACIONADAS A MINERAÇÃO EM RIOS DA  
AMAZÔNIA SUL OCIDENTAL OBSERVADAS POR SATÉLITE**

PORTO ALEGRE

2024

FLAVIO FAGUNDE DE PAULA

**MUDANÇAS NA COR DA ÁGUA RELACIONADAS A MINERAÇÃO EM RIOS DA  
AMAZÔNIA SUL OCIDENTAL OBSERVADAS POR SATÉLITE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestre.

Orientador: Dr. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva.

PORTO ALEGRE  
2024

### CIP - Catalogação na Publicação

Fagundes de Paula, Flavio  
MUDANÇAS NA COR DA ÁGUA RELACIONADAS A MINERAÇÃO EM  
RIOS DA AMAZÔNIA SUL OCIDENTAL OBSERVADAS POR SATÉLITE  
/ Flavio Fagundes de Paula. -- 2024.  
62 f.  
Orientador: Rodrigo Cauduro Dias de Paiva.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,  
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e  
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2024.

1. Recursos Hídricos. 2. Amazônia. 3. Mineração. 4.  
Garimpo. 5. Sensoriamento Remoto. I. Cauduro Dias de  
Paiva, Rodrigo, orient. II. Título.

FLAVIO FAGUNDES DE PAULA  
MUDANÇAS NA COR DA ÁGUA RELACIONADAS A MINERAÇÃO EM RIOS DA  
AMAZÔNIA SUL OCIDENTAL OBSERVADAS POR SATÉLITE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação  
em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como  
requisito parcial à obtenção do grau de mestre.

Porto Alegre, 20 de março de 2024.

---

Prof. Dr. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva – IPH/UFRGS  
Orientador

---

Prof. Dr. Fernando Mainard Fan – UFRGS  
Examinador

---

Prof. Dr. Hugo Oliveira Fagundes – Unicamp  
Examinador

---

Prof. Dr. Felipe de Lucia Lobo – UFPel  
Examinador

## **Agradecimentos**

Ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela oportunidade de aprender e colaborar com o Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo auxílio financeiro.

Ao programa de acessibilidade incluir/UFRGS, pela assistência e suporte.

A doutoranda do PPGRHSA/IPH/UFRGS Jéssica Fontoura pela contribuição com rotinas, materiais, métodos, e colaboração no desenvolvimento do trabalho.

A todos os professores durante a vida acadêmica que me permitiram chegar até aqui, em especial a professora Tatiane Emílio Checchia por ter me apresentado à hidrologia e recursos hídricos.

Ao professor Rodrigo, e aos companheiros Stéfany e Arthur, por tornarem mais que especial este período intenso.

“Não importa o que aconteça, continue a nadar.”

(WALTERS, GRAHAM; **PROCURANDO NEMO**, 2003).

## Resumo

FAGUNDES DE PAULA, Flavio. Mudanças Na Cor Da Água Relacionadas A Mineração Em Rios Da Amazônia Sul Ocidental Observadas Por Satélite. 2024. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) — Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande Sul, Porto Alegre, 2024.

Diante da relevância dos recursos hídricos, é fundamental o seu monitoramento. Considerando as dimensões das bacias brasileiras, principalmente as amazônicas, torna-se viável o uso de ferramentas de sensoriamento remoto, que permitem o acompanhamento de qualidade das águas superficiais, particularmente características de cor e sólidos totais. Os componentes presentes na água alteram a sua reflectância, de acordo com suas características, permitindo um estudo e rastreamento das qualidades. O trabalho teve objetivo principal identificar alterações na cor da água em rios da Amazônia Sul Ocidental, nas sub-bacias dos Rio Ji-Paraná, Canumã e Amaná, mapeando as evidências das interações e os impactos da mineração e garimpo. Por meio dos ângulos de refletância e comprimento de onda dominante, para duas sub-bacias do Rio Madeira, Rio Ji-Paraná e Canumã (controle), e sub-bacia do Trombetas Rio Amaná, e seus afluentes com mais de 30 metros de largura. Compreendendo a formação da cor das águas da bacia e a influência de atividades mineiras, e antrópicas. Como metodologia, foram utilizadas as ferramentas de sensoriamento remoto Qgis e *Google Earth Engine - GEE*, associadas à dados de satélite Landsat 5, 7 e 8. Códigos e rotinas foram elaborados no GEE e RStudio para obtenção das bandas RGB, ângulos e coordenadas cromáticas (*hue angle*), os dados após tratados no Qgis, foram elaborados cartogramas com os principais resultados de cor em escala Forel-Ule (FU). Os dados fornecidos pelo MapBiomias foram utilizados para compreender o cenário atual da mineração na região. Foram obtidas condições de solo exposto para os anos entre 1994 e 2020, por meio da equação BSI onde as áreas de solo nu podem ser distintas das áreas de floresta. Foi realizada uma análise estatística dos valores médios dos comprimentos de onda dominantes, e nos dados de material em suspensão fornecidos pela ANA, para verificar se as variações são significativas entre 1994 e 2021. Como resultados foram observadas alterações de comprimentos de onda médios (cor), para maior nas bacias do Ji-paraná, e Amaná, as séries históricas elaboradas mostraram as tendências dos valores médios observadas para as sub-bacias, apresentando crescimento na bacia do Ji-Paraná e Amaná. A espacialização das atividades mineradoras demonstrou presença na sub-bacia do Ji-Paraná, presença substancial na bacia do Amaná, e pouco significativa na sub-bacia do Canumã. Os resultados das equações de solo exposto, demonstraram um BSI considerável na bacia do Ji-Paraná que passou por um processo de consolidação da antropização no período analisado entre 1994 e 2021. Para a área do Canumã e Amaná a antropização ainda é pequena, porém presente na bacia. Por meio das análises estatísticas, ficaram demonstradas alterações significativas para maiores comprimentos médios de onda dominante na maioria dos trechos da bacia do Ji-Paraná e Amaná, enquanto que para o Rio Canumã as alterações foram para menores comprimentos e sua maioria. A metodologia e ferramentas empregadas mostraram-se adequadas para atingir o objetivo, foram observadas as alterações ocorridas nas bacias, uso e ocupação, atividades econômicas existentes, e as relações possíveis destas com as alterações das qualidades dos recursos hídricos, principalmente dos volumes de sedimentos inorgânicos presentes nos corpos d'água.

**Palavras-chave:** Águas amazônicas, mineração, cor.

## Abstract

FAGUNDES DE PAULA, Flavio. Satellite-Observed Water Color Changes Related to Mining in Southwestern Amazon Rivers. 2024. Master's thesis (Water Resources and Environmental Engineering) — Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2024

Given the relevance of water resources, their monitoring is fundamental. Considering the dimensions of Brazilian basins, especially the Amazonian ones, the use of remote sensing tools becomes viable, allowing for the monitoring of surface water quality, particularly color and total solids characteristics. The components present in water alter its reflectance according to their characteristics, enabling a study and tracking of qualities. The main objective of the work was to identify changes in water color in rivers of the Southwest Amazon, in the sub-basins of the Ji-Paraná, Canumã, and Amaná Rivers, mapping evidence of interactions and impacts of mining. Through reflectance angles and dominant wavelength, for two sub-basins of the Madeira River, Ji-Paraná and Canumã (control), and the Trombetas River Amaná sub-basin, and its tributaries with widths exceeding 30 meters. Understanding the formation of water color in the basin and the influence of mining and anthropogenic activities. As methodology, the remote sensing tools QGIS and Google Earth Engine (GEE) were used, associated with Landsat 5, 7, and 8 satellite data. Codes and routines were developed in GEE and RStudio to obtain RGB bands, angles, and chromatic coordinates (hue angle). After processing in QGIS, cartograms were developed with the main color results in Forel-Ule (FU) scale. Data provided by MapBiomas were used to understand the current mining scenario in the region. Conditions of exposed soil were obtained for the years between 1994 and 2020, through the BSI equation where bare soil areas can be distinguished from forest areas. A statistical analysis of the mean values of dominant wavelengths and suspended material data provided by ANA was performed to verify if the variations are significant between 1994 and 2021. As results, changes in average wavelengths (color) were observed, mostly increasing in the Ji-Paraná and Amaná basins. Historical series showed trends in average values observed for the sub-basins, presenting growth in the Ji-Paraná and Amaná basins. The spatialization of mining activities demonstrated presence in the Ji-Paraná sub-basin, substantial presence in the Amaná basin, and little significance in the Canumã sub-basin. The results of exposed soil equations showed a considerable BSI in the Ji-Paraná basin, which underwent a process of anthropization consolidation in the analyzed period between 1994 and 2021. For the Canumã and Amaná areas, anthropization is still small but present in the basin. Through statistical analyses, significant changes were demonstrated for higher mean dominant wavelengths in most stretches of the Ji-Paraná and Amaná basins, while for the Canumã River, the changes were mostly towards smaller wavelengths. The methodology and tools employed proved adequate to achieve the objective, observing changes in the basins, land use and occupation, existing economic activities, and their possible relationships with changes in water resource qualities, especially inorganic sediment volumes present in water bodies

**Keywords:** Amazonian waters, mining, color.



## Índice de Ilustrações

Figura 1 - Região da Amazônia Legal e Internacional. ....	14
Figura 2 - Atividade Garimpeira em área protegida da Terra Indígena Munduruku. ....	15
Figura 3 - Adjacências e Planta de lavagem do garimpo do Bom Futuro, Rondônia. ....	17
Figura 4 - Atividade mineradora na Terra Indígena Munduruku, estado do Pará. ....	17
Figura 5 - Área afetada pela mineração no estado do Pará. ....	18
Figura 6 - Mineração ilegal com máquinas e bombas na Terra Indígena Munduruku. ....	19
Figura 7 - A) Trecho ocupado pela mineração no Rio Cabitutu, B) e C) Trecho observado em 2019 e 2020 respectivamente. ....	23
Figura 8 - Escala FU adotada atualmente com 21 cores e 1 tubo de água destilada. ....	24
Figura 9 - Dragas típicas para exploração de minérios de aluvião no Rio Madeira. ....	25
Figura 10 – Bacia e hidrografia do Rio Madeira, Trombetas, sub-bacias dos Rios Ji-Paraná, Canumã e Amaná. ....	33
Figura 11 – Trecho garimpado na sub-bacia do Rio Ji-Paraná 2024. ....	35
Figura 12 – Garimpo na sub-bacia do Rio Amaná 2024. ....	35
Figura 13 – Trecho garimpado na sub-bacia do Rio Amaná 2024. ....	36
Figura 14 - Diagrama de cromaticidade (esq), escala de cores FU (dir). ....	37
Figura 15 - Fluxograma para obtenção da cor na escala FU. ....	39
Figura 16 – Comprimentos médios dominantes por ano na bacia do Rio Canumã. ....	42
Figura 17 – Comprimentos médios dominantes por ano na bacia do Rio Ji-Paraná. ....	43
Figura 18 – Comprimentos médios dominantes por ano na bacia do Rio Amaná. ....	43
Figura 19 - Gráfico dos valores médios para as duas subséries do Canumã. ....	44
Figura 20 - Gráfico dos valores médios da diferença entre as subséries do Canumã. ....	44
Figura 21 - Gráfico dos valores médios para as duas subséries do Ji-Paraná. ....	45
Figura 22 - Gráfico dos valores médios da diferença entre as subséries do Ji-Paraná. ....	45
Figura 23 - Gráfico dos valores médios da diferença entre as subséries do Amaná. ....	46
Figura 24 – Série histórica de sedimentos, estação (15560000). ....	47
Figura 25 – Valores médios observados de material em suspensão. ....	47
Figura 26 - Índice BSI para a bacia do Rio Canumã. ....	48
Figura 27 - Índice BSI para a bacia do Rio Ji-Paraná. ....	49
Figura 28 - Índice BSI para a bacia do Rio Amaná. ....	50
Figura 29 - Escala de cor para a bacia do Rio Canumã. ....	51
Figura 30 - Escala de cor para a bacia do Rio Ji-Paraná. ....	52
Figura 31 - Escala de cor para a bacia do Rio Amaná. ....	53

## Sumário

<b>1 – APRESENTAÇÃO</b> .....	10
<b>1.1 Introdução</b> .....	10
<b>1.2 Objetivos</b> .....	13
1.2.1 Geral .....	13
1.2.2 Específicos.....	13
<b>2 - ESTADO DA ARTE</b> .....	14
<b>2.1 Região amazônica</b> .....	14
<b>2.2 Mineração e recursos hídricos</b> .....	16
<b>2.3 Monitoramento via sensoriamento remoto</b> .....	21
<b>2.4 Monitoramento da cor da água</b> .....	23
<b>2.5 Monitoramento de atividades de mineração</b> .....	25
<b>2.6 Monitoramento de uso e cobertura do solo (BSI)</b> .....	26
<b>2.7 Monitoramento e modelagem hidrológica</b> .....	28
<b>2.8 Considerações do Estado da Arte</b> .....	31
<b>3 - MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	33
<b>3.1 Materiais</b> .....	33
3.1.1 Area de estudo .....	33
3.1.2 Dados .....	34
<b>3.2 Métodos</b> .....	34
3.2.1 Dados de mineração.....	34
3.2.2 Série de comprimento médio de onda dominante e <i>Forel-Ule scale</i> (Scala FU) ...	36
3.2.3 Estatística.....	39
3.2.4 Material em suspensão <i>in loco</i> .....	41
3.2.5 <i>Bare Sooil Index</i> – BSI .....	41
<b>4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	42
<b>4.1 Análise Estatística</b> .....	42
<b>4.2 Dados de sedimentos <i>in loco</i></b> .....	46
<b>4.3 <i>Bare Soil Index</i> - BSI</b> .....	48
<b>4.4 Análise das alterações de cor da água</b> .....	50
<b>5 – CONSIDERAÇÕES</b> .....	55
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	57

## 1 – APRESENTAÇÃO

### 1.1 Introdução

A região Amazônica é fascinante, seja em suas dimensões e números (ESPINOZA-VILLAR et al., 2018), na sua importância ambiental, no ciclo terrestre, ou nos cenários científico, e econômico mundial (LOBO et. al., 2018). Desde o século XVII apesar de períodos de abandono, e com muitos desafios, despertou interesse de exploradores, e passou por “ondas” de ocupação e impulsos desenvolvimentistas (NASCIMENTO; SILVA; SANTOS, 2014; VINCENT; VASCONI, 2016).

A bacia hidrográfica do Rio Amazonas representa o maior sistema fluvial do mundo, ocupando mais de 6 milhões de km<sup>2</sup> (FASSONI-ANDRADE et al., 2021; VILLAR et al., 2012), a Amazônia legal ocupa quase 60% do território brasileiro, e a Amazônia internacional abrange 9 dos 13 os países da América do Sul com exceção do Chile, Paraguai, Uruguai e a Argentina.

Atualmente a Amazônia brasileira é afetada pelas mudanças de uso e cobertura do solo, onde as grandes áreas de florestas são substituídas pelas atividades agrícolas, agropecuárias, e pelas atividades da indústria da mineração e garimpos de extração de ouro e outros minerais. A supressão de áreas florestais para a mineração tem causado degradação do solo, e aumento na produção de partículas sedimentares, que potencialmente podem conter metais pesados, entre outros contaminantes, que alteram as características e condições de qualidades de suas águas. Esta dissertação teve como tema principal, as alterações na cor das águas amazônicas, relacionadas à mineração, principalmente de atividade garimpeiras (ABE et al., (2019).

Conforme Lobo et al., (2018), a atividade garimpeira tem importância econômica na Amazônia, mas atualmente pouco se sabe sobre suas características, como: as áreas abrangidas, o tipo de atividade, a escala de atuação ou seus impactos socioambientais. Uma das razões apontadas para o problema destas lacunas de informações, é a ausência de um mapeamento preciso das regiões em atividade, destacando a grande heterogeneidade dos empreendimentos variando em escalas territoriais, técnicas empregadas e níveis de industrialização.

Bacias com grandes dimensões como a amazônica, são de fundamental monitoramento, já que são importantes componentes do ciclo hidrológico global. Sendo também as primeiras a demonstrar os impactos e mudanças sofridas pelas alterações climáticas, ou atividades introduzidas por ações antrópicas. Em geral, estas regiões são pouco monitoradas, por razões de custo, logísticas etc. Práticas alternativas de monitoramento de qualidade da água, como concentração de sólidos, podem ser adotadas para complementar e/ou validar os registros existentes (VILLAR et al., 2012).

Considerando a importância da região da Amazônia para os meios econômicos e científicos (LOBO et al., 2018), monitorar suas condições é mais que necessário. Esta necessidade vai de encontro com o problema das dificuldades impostas por um ambiente muitas vezes inacessível, e/ou impraticável para campanhas *in loco*, o que abre possibilidades para o uso das ferramentas remotas (FASSONI-ANDRADE et al., 2021; ESPINOZA-VILLAR et al., 2018).

Demandando técnicas e ferramentas que permitam estudos contínuos e economicamente viáveis, neste cenário o uso e desenvolvimento de mecanismo de sensoriamento remoto, se apresenta como uma possibilidade de aplicação viável. Com novas missões, como Landsat, Sentinel entre outros, que ofereçam um bom volume de imagens em boa resolução com acesso livre, permitindo estudos regulares de condições florestais, de solo e hidrológicas (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019).

As vantagens do uso do sensoriamento remoto ficam ainda mais evidentes, quando se monitoram grandes áreas, onde a obtenção de dados da paisagem é caro, demorada e trabalhosa. Nestas condições, o SR e SIG podem fornecer informações sobre mudanças geológicas, produção e cobertura vegetal e dinâmica de inundações, de forma rápida, precisa e econômica. Assim como, os dados de satélite podem auxiliar na detecção gradual de mudanças abruptas na paisagem (DE CARVALHO NASSER, et al., 2024).

Associadas aos métodos de sensoriamento, também tem se desenvolvido aplicações de geoprocessamento, como aplicativos GIS, em “nuvem” como o *Google Earth Engine* (GEE), permitindo que estas tecnologias e seus avanços sejam utilizados para o desenvolvimento científico do ciclo hidrológico terrestre (LOBO; NOVO; TELMER, 2016; BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019).

De acordo com FASSONI-ANDRADE et al. (2021), é essencial para as pesquisas sobre clima, ecologia e gestão dos recursos naturais na Amazonia, conhecermos a dinâmica hidrológica desta região, sendo necessários monitoramentos constantes e abrangentes. Compreendendo espaço-temporalmente o ciclo da água, e as interações deste com a variabilidade das condições climáticas e atividades antropológicas. Em bacias desta dimensão e condição remota, observações *in loco* são dificultadas, sendo as ferramentas de sensoriamento oportunidades para avaliar e rastrear os componentes e condições do ciclo hidrológico.

Ainda de acordo com FASSONI-ANDRADE et al. (2021), estamos passando pela era do florescimento do Sensoriamento Remoto (SR) por satélite, com avanços, em primeiro lugar uma nova geração de sensores (Landsat-8, Sentinel-2 e CBERS-04A). Em segundo lugar, temos

um considerável aumento das capacidades computacionais e de armazenamento, aumentando nossa capacidade de processar um grande volume de imagens.

Informações obtidas por Sensoriamento Remoto (SR) na Amazônia, permitiram a avaliação de impactos da mineração artesanal de ouro em sub-bacias do Rio Amazonas, como a bacia do Rio Tapajós (LOBO et al., 2015, 2017). Assim como mapeamento da “presença de sedimentos nas águas claras, brancas e negras dos rios amazônicos” (FASSONI-ANDRADE; PAIVA, 2019).

Fontoura e Paiva (2021) utilizaram, imagens da missão Landsat 8, para estimar os constituintes opticamente ativos, COAs (sedimentos, clorofila e matéria orgânica dissolvida colorida), dos principais corpos hídricos brasileiros. Dentre as características principais, a cor foi utilizada para estimar indiretamente, a qualidade da água. Os autores analisaram o padrão de cores dos rios brasileiros, no período entre 2010 e 2020, adaptando a metodologia de Gardner et al., (2021), e Wang et al., (2014).

Os valores dos comprimentos de ondas das reflectâncias foram classificados em vermelho, verde e azul, dos maiores para os menores respectivamente. Determinando as cores em padrão RGB para a hidrografia do Brasil, onde mais de 50% dos corpos hídricos apresentaram tons amarelados, quase 45% na cor verde, e apenas 3% apresentaram comprimentos de ondas no azul. Rios como Madeira e Amazonas, conhecidos por grande volume de sedimentos, apresentaram tons de amarelo, enquanto o Rio Negro, rico em matéria orgânica apresentou a cor verde. O trabalho a partir de imagens de satélite demonstrou desempenho satisfatório e promissor em caracterizar e compreender a dinâmica da qualidade dos recursos hídricos (FONTOURA; PAIVA, 2021).

Diante da importância da região Amazônica, e dos desafios para o seu monitoramento, considerando as dimensões da região, dificuldades de acesso e custo. As ferramentas de sensoriamento remoto se apresentam como uma alternativa economicamente viável, para o monitoramento das condições de qualidade de suas águas. Assim como a relação das características destas, com as atividades econômicas desenvolvidas na região, principalmente os impactos causados pelas indústrias de mineração.

Esta dissertação teve como objetivo principal, identificar alterações na cor da água em rios da Amazônia sul ocidental, onde foram utilizadas três sub-bacias, entre elas, dos Rio Ji-Paraná, Canumã e Amaná, mapeando as interações e os impactos da mineração e do garimpo, na cor de suas águas. Para concretização do objetivo foram utilizadas metodologias que permitiram relacionar os comprimentos médios dominantes de ondas, e uma escala de cor que variou azul ao vermelho. A execução da metodologia permitiu elaborar uma série de dados de

cor e comprimentos médios de onda dominante, de 1994 até 2021, permitindo análise estatística da significância das variações.

O trabalho busca contribuir para o conhecimento das relações entre as atividades antrópicas, principalmente relacionadas à mineração, e as condições de qualidade relacionadas a cor da água. Busca explicar por meio de escala de cor e, estatisticamente se as alterações são significativas nos períodos observados.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Geral**

Identificar alterações na cor da água em rios da Amazônia sul ocidental, nas sub-bacias dos Rio Ji-Paraná, Canumã e Amaná, mapeando as evidências das interações e os impactos da mineração na cor da água.

### **1.2.2 Específicos**

- Documentar a série de cor baseadas em comprimento de onda dominante no período de 1994 e 2021 para as sub-bacias do Ji-Paraná, Canumã e Amaná.
- Conhecer as condições de solo exposto e grau de antropização nas sub-bacias.
- Avaliar a relação entre as alterações da cor da água dos rios e as atividades antrópicas.

## 2 - ESTADO DA ARTE

### 2.1 Região amazônica

Data de meados do século XVII a presença de bandeirantes como Raposo Tavares, que em busca de ouro, madeiras, drogas do sertão e mão de obra indígena, realizou expedições no vale do Guaporé. Hoje localizado na região entre os estados de Rondônia, Mato Grosso e a república da Bolívia. Por mais de dois séculos a região ficou isolada do mercado de consumo do país, recebendo mais atenção no século XIX com a implantação da Estrada de Ferro Madeira Mamoré (1872-1912), com as redes telegráficas e a BR 364 já no século XX (NASCIMENTO; SILVA; SANTOS, 2014).

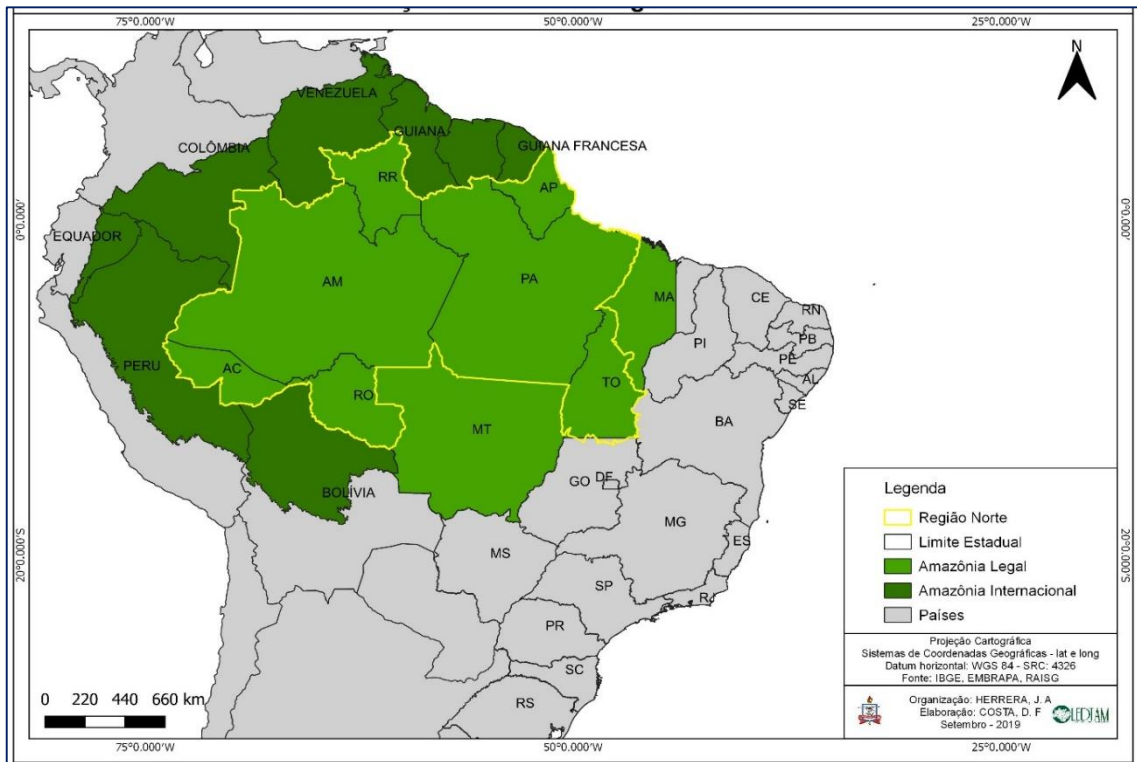


Figura 1 - Região da Amazônia Legal e Internacional.

Fonte: Costa Herrera (2019).

Seguindo ondas de valorização em escalas e mercado internacional, a exploração de matérias-primas foi se alternando na região, nos anos de 1950 com o fim da II guerra mundial, o preço da borracha se desvalorizou, e os trabalhadores se direcionaram a mineração fluvial de ouro e cassiterita (VINCENT; VASCONI, 2016).

De acordo com ABE et al. (2019), na região da Amazônia brasileira (Figura, 1), as áreas mais afetadas pela de exploração de ouro e outros minerais, são as sub-bacias do Madeira, Tapajós, Xingu e Trombetas. No Rio Tapajós a atividade se iniciou pelos anos de 1950, em razão semelhante da intensificação da exploração no Rio Madeira, onde a mineração substituiu

o extrativismo de borracha, se tornando a principal atividade econômica da região no contexto do pós II guerra.

De acordo com Nascimento, Silva e Santos (2014), historicamente a Amazônia recebeu uma condição periférica na análise econômica regional, recebendo atividades extrativistas como função principal. Seguindo padrões de ocupação aliados a exploração de suas reservas naturais, mesmo que os ciclo minero-vegetal estejam presentes, isso não refletiu em um setor de transformação e agregação de valor, e as atividades de processamento industrial permanecem incipientes.

O garimpo na Amazônia reflete o modelo econômico historicamente adotado na região, uso intensivo e predatório dos recursos naturais, onde a floresta é removida para que se expanda a produção. Mesmo que de início ou em números apresente desenvolvimento econômico, a devastação não reflete desenvolvimento humano efetivo, onde persistem os efeitos negativos da atividade, com baixo valor agregado aos recursos extraídos (Figura 2) (ENRIQUEZ, 2014).



Figura 2 - Atividade Garimpeira em área protegida da Terra Indígena Munduruku.

Fonte: Greenpeace/Batata (2021).

De acordo com Ribeiro, Almeida e Nunes (2019), a mineração é um dos setores de base da economia brasileira, associada a grandes reservas de minerais metálico e não-metálicos, a atividades resulta em significativos impactos ambientais. Os empreendimentos ocupam grandes áreas, realizando intervenções nas superfícies, trazendo impactos negativos aos biomas, com considerável desmatamento e poluição.



Recentemente tem ganhado força empreendimento neo extrativistas, com o ressurgimento da atividade, apoiada por uma política econômica neoliberal, articulada em escala internacional (VINCENT; VASCONI, 2016). Seguindo este modelo o Decreto n.º 16.966 de fevereiro de 2022, “Institui o Programa de Apoio ao Desenvolvimento da Mineração Artesanal e em Pequena Escala e a Comissão Interministerial para o Desenvolvimento da Mineração Artesanal e em Pequena Escala” (BRASIL, 2022).

O Programa denominado Pró-mape, tem por objetivo, segundo o governo, de estimular melhores práticas, formalizar as atividades, integrando e fortalecendo as políticas sociais e ambientais (BRASIL, 2022).

A bacia do Rio Amazonas detém números bastante significativos, possui uma área de mais de 6 milhões de km<sup>2</sup>, vazão média de 200.000 m<sup>3</sup>/s em sua foz. Sendo lançadas no Atlântico entre 600 e 1200 milhões de toneladas de sedimentos por ano, justificando o título de maior sistema fluvial do mundo. O volume do material sedimentar vem principalmente de duas sub-bacias, dos Rios Solimões e Madeira, naturalmente o transporte destes componentes é controlado por características geomorfológicas da bacia, clima, condições hidrológicas, entre outras condições naturais. Podendo também ser influenciado por conjunturas antrópicas, como alterações de uso e cobertura do solo, supressão da vegetação, atividades e ambientes urbanos, atividades da mineração e garimpo, instalação de estruturas de aproveitamento hidráulico entre outros (FASSONI-ANDRADE et al., 2021; ESPINOZA-VILLAR et al., 2018).

## **2.2 Mineração e recursos hídricos**

Além das repercussões socioeconômicas, os empreendimentos mineradores provocam significativas consequências ambientais, especialmente no meio hídrico. Em função dos métodos empregados, como uso de escavadeiras hidráulicas, bombas, dragas e outros equipamentos erosivos. Que produzem grandes quantidades de sedimentos que são lançados ou revolvidos no leito dos rios (ENRIQUEZ, 2014).

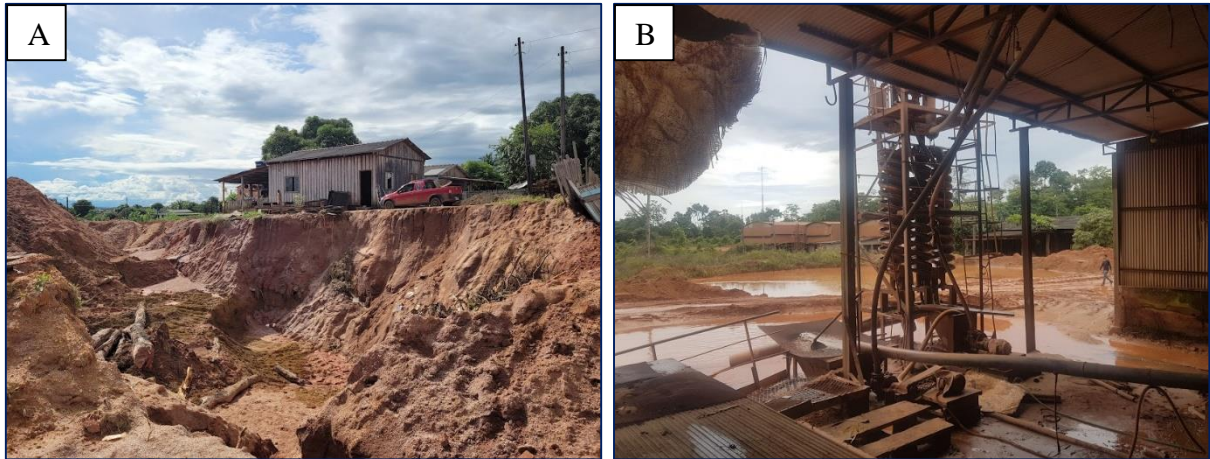


Figura 3 - Adjacências e Planta de lavagem do garimpo do Bom Futuro, Rondônia.  
Fonte: CHECCHIA, 2022.

As atividades mineradoras são fontes de substâncias que contaminam, ou alteram as condições dos ambientes aquáticos, essas alterações podem ocorrer por meio da lixiviação dos rejeitos, erosão, ou rompimentos de barragens, ou depósitos. Uma vez nos corpos hídricos, estes materiais sedimentares podem se depositar ou serem transportados, degradando o ambiente de maneira difusa distante da fonte de poluição (MELO, 2012).

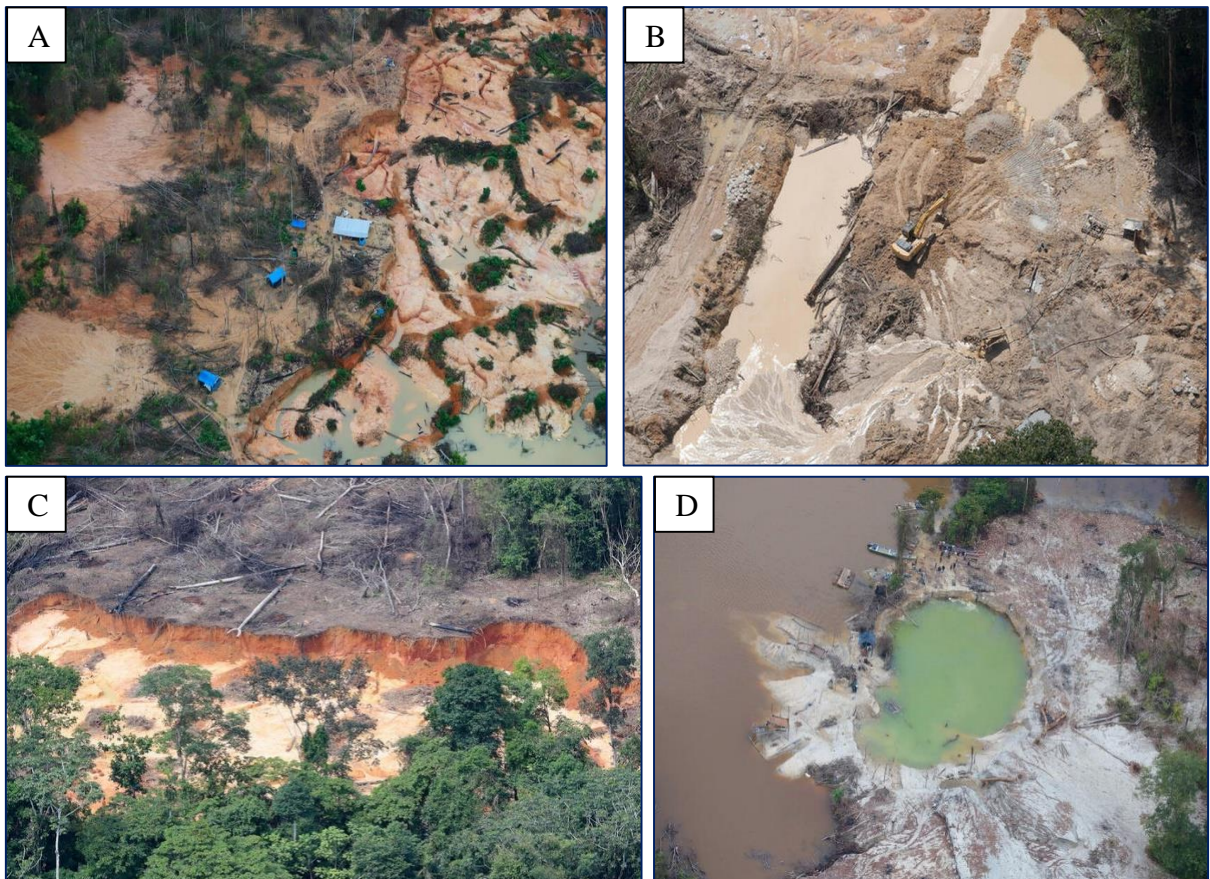


Figura 4 - Atividade mineradora na Terra Indígena Munduruku, estado do Pará.  
Fonte: A e C, Greenpeace/Batata (2021); B e D, Greenpeace/Amend (2020).

A exploração mineral possui intensa relação com os recursos hídricos, são consumidos grandes volumes de água, seja na pesquisa, exploração, beneficiamento ou transporte dos produtos. São utilizadas sondas rotativas, bombas e equipamentos de desmonte hidráulico, britagem, moagem, lixiviação entre outros processos, que impactam na qualidade da água. Alterando níveis de turbidez devido ao volume dos sedimentos, oscilações de pH, contaminação por graxas, combustíveis, metais pesados, etc. Associada a degradação da paisagem, ocorrem processos erosivos, movimentos de massa de solo e rocha, causando assoreamento de vales, alterações topográficas, fatores que trazem prejuízos as condições hidrológicas, (Figura 4) (PORTELLA, 2015; MILANEZ, 2017; DE CARVALHO NASSER, et al., 2024).

Mesmo quando aplicadas de maneira artesanal, ou em pequenas escalas, ocorrem alterações na paisagem, que incluem desmatamento, e remoção de solo para acesso aos depósitos de ouro. Causando assoreamento de rios e lagos pela descarga de sedimentos, na exploração de ouro aluvião, os rejeitos de água e sedimentos são lançados na rede de drenagem, ou em lagoas impactando na qualidade da água, afetando a penetração da luz, (Figura 5) (LOBO; NOVO; TELMER, 2016).



Figura 5 - Área afetada pela mineração no estado do Pará.

Fonte: National Geographic/Alcântara, 2019.

A atividade de mineração se baseia em dois principais modos de operação: a pequena lavra, que necessita da Permissão de Lavra Garimpeira (PLG) e do licenciamento ambiental junto ao estado; e a mineração de larga escala, processo mais complexo que inclui Autorização de pesquisa, que avalia as viabilidades técnicas e econômicas. Em paralelo a mineração ocorrem as atividades do garimpo ilegal, que não seguem as legislações, sejam elas, ambientais ou trabalhistas. Em 2013 foram emitidas pelo DNPM quase 10 mil autorizações de pesquisa, e

mais de 15 mil pedidos de PLG, “com exceção do Acre, o garimpo está presente em todos os estados da Amazônia Legal (AML)” (ENRIQUEZ, p. 161, 2014).

De acordo com Milanez (2017), socialmente existe um discurso de que a mineração é uma atividade vantajosa, onde a mina se comporta como uma fábrica, com impactos pontuais, limitados no tempo e que os impactos podem ser mitigados ou deixariam de existir com o fim da operação. Para o autor as alterações “não são simples, nem espacialmente limitadas, ou temporalmente restritas”, tendo um comportamento bem diferente do discurso, sendo os danos “ecologicamente complexos, espacialmente amplos, irreversíveis e temporalmente permanentes” (MILANEZ, p. 2, 2017).



Figura 6 - Mineração ilegal com máquinas e bombas na Terra Indígena Munduruku.  
Fonte: Greenpeace/Batata, (2021).

Para Portella (2015), é consenso que a mineração é uma atividade predatória ao meio ambiente (Figura 6), que inicialmente pode apresentar benefícios econômicos a região. Porém, inúmeros estudos apresentam um cenário que a longo prazo, o que permanece são prejuízos ao desenvolvimento futuro, e danos ambientais irreversíveis. Ambientalmente os efeitos das atividades mineradoras são de difícil reparação. Considerando o mérito dos minerais sejam eles metálicos ou não, e os seus usos econômicos, para a construção civil, ou bens industriais e tecnológicos, é de fundamental importância conhecer a relação destes empreendimentos com os recursos naturais, especialmente os hídricos que são bastantes sensíveis à alteração.

As atividades sejam de mineração ou de garimpo ilegal, apresentam diferenças e similaridades. Quanto diferenças, na mineração as atividades são legalizadas, possuem licenças e autorizações emitidas por órgãos competentes, como o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) e órgãos ambientais. Atuam em escala industrial, empregando técnicas avançadas e máquinas pesadas, com alto investimento de capital. Geram impactos ambientais que precisam ser mitigados através de planos e medidas de controle ambiental rigorosos. Geração de impostos e empregos, contribuindo para a economia local e nacional. Cumprem de normas trabalhistas (BRASIL, 1989, 2008, 2018; CAMPOS, 2017).

No garimpo ilegal, as atividades são clandestinas, sem licenças ou autorizações, operando fora da lei. Utilizam métodos rudimentares e ferramentas manuais, com baixo investimento de capital. Causam degradação ambiental severa, como desmatamento, contaminação de rios e destruição do solo. Está frequentemente associado a crimes como tráfico de drogas, violência e trabalho escravo. Os garimpeiros geralmente trabalham em condições precárias e sem os direitos trabalhistas básicos (BRASIL, 1989, 2008; ENRIQUEZ, 2014).

Nas similaridades, a mineração e o garimpo ilegal, produzem desmatamento onde a abertura de minas e a construção de infraestrutura associada à atividade minerária podem levar ao desmatamento de grandes áreas, com perda de biodiversidade, erosão do solo e alterações no ciclo hidrológico. Contaminação da água pelo uso de produtos químicos no processo de mineração e o descarte inadequado de rejeitos. Emissão de poeira e gases durante a extração e o processamento do minério (PORTELA, 2015; MILANEZ, 2017).

A remoção do solo para a extração do minério e o acúmulo de rejeitos podem levar à degradação do solo, com perda de fertilidade e impacte na produção agrícola. Impactos sociais como: Reassentamentos onde a instalação de minas pode levar ao reassentamento de comunidades locais, com perda de terras, casas e meios de subsistência. Conflitos sociais onde disputa por recursos minerais e os impactos da mineração podem gerar conflitos entre comunidades locais, empresas mineradoras e o governo. Riscos de acidentes e desastres ambientais, esgotamento dos recursos minerais e gases do efeito estufa (PORTELA, 2015; MILANEZ, 2017).

A principal diferença está no fato de que na mineração, com o fim das atividades, inicia-se o processo de recuperação das áreas antes mineradas. O processo envolve a restauração, e monitoramento da paisagem, o tratamento do solo para apoiar a revegetação e o ajuste e monitoramento de águas superficiais e áreas sujeitas a inundações sazonais ou permanentes. O monitoramento das mudanças em um ambiente causadas pela mineração ao nível da superfície, é essencial para proteger o meio ambiente e mitigar impactos ambientais negativos. Além disso,

as mudanças na produção da vegetação na paisagem podem fornecer um importante indicador para avaliar as mudanças geológicas e pedológicas em minas ativas e recuperadas (DE CARVALHO NASSER, et al., 2024).

### **2.3 Monitoramento via sensoriamento remoto**

Em estudos na região da Amazônia oriental no trecho do Rio Tapajós, Novo e Telmer (2016), utilizaram um período de 4 décadas de arquivos *Landsat* para construir a série temporal. Observando as alterações no uso da terra para o Tapajós e seus principais afluentes, avaliando o nível de assoreamento dos rios. Destacando a importância da correlação entre o início da série de imagens e o período das atividades analisadas, para serem abrangidas a condição inicial, anterior, as alterações e as condições mais recentes (degradadas).

Entre as muitas aplicações do sensoriamento remoto, em hidrologia são observadas principalmente, as concentrações, variabilidade temporal e espacial de parâmetros como: sedimentos, sólidos em suspensão, matéria orgânica, clorofila etc. Estas propriedades interferem na interação entre a luz e/ou radiação eletromagnética e a água, permitindo que os sensores captem estas alterações, permitindo o estudo das áreas desejadas em determinada série temporal (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019).

Considerando a relevância econômica e ambiental das atividades mineradoras ao nível mundial e em especial para a região da Amazônia. Se faz necessário desenvolvimento e aperfeiçoamento de métodos rápido e acurados, para monitoramento e classificação das áreas mineradas, e as consequências destas interações em escala regional (LOBO et. al., 2018).

O uso do sensoriamento remoto em hidrologia tem por objetivo monitorar as condições e a variabilidade espacial de diversos parâmetros de qualidade como: clorofila, sólidos em suspensão, matéria orgânica, entre outros (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019). As partículas e componentes presentes na água interagem com a radiação eletromagnética, alterando o sinal que é refletido para o satélite. Os Componentes Opticamente Ativos (COAs), como sólidos em suspensão, fitoplânctons, algas e matéria orgânica são os que mais interferem na reflectância (LOBO et. al., 2012).

Os componentes opticamente ativos nos ambientes aquáticos são aqueles com capacidade de comprometer as propriedades ópticas da água. Como sua cor e transparência, alterando os processos de espalhamento e absorção da energia eletromagnética. São os particulados totais como os sedimentos minerais e orgânicos, a matéria orgânica colorida, e água pura (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019).

A reflectância é resultado das interações entre os componentes presentes na água que tem sua magnitude variável, conforme com a concentração, tipo do elemento, profundidade que se encontra, e comprimentos de onda específicos. Essas características permitem monitoramento da sazonalidade dos COAs, o monitoramento de outras características pode ser dificultado, uma vez que os efeitos dos sedimentos tendem a se sobrepor a outras condições de qualidade (LOBO, et. al., 2012).

Em estudo da cor da água na região amazônica, Lobo et. al. (2012), classificou as águas em 10 classes, indo da 1 como sendo a mais transparente, poucos sedimentos e/ou matéria orgânica. Para a classe 2 as águas negras pobres em sedimentos, porém com presença de matéria orgânica. As faixas de 3 a 7 foram denominadas águas brancas ricas em COAs inorgânicos (sedimentos), o grupo de 8 a 10 se associou a prevalência de material algal.

Com a evolução das ciências ambientais, das preocupações ecológicas, e da importância da compreensão das questões hidrológicas na Amazônia. Também se desenvolveu com o avanço das capacidades técnico científicas, o campo de estudos por sensoriamento remoto do ciclo hidrológico. Devido as condições das grandes bacias, o que era uma necessidade ou desafio, se tornou um laboratório, para o desenvolvimento de novas técnicas de observação e monitoramento da terra, clima e condições ambientais (FASONI-ANDRADE et al., 2021).

O sensoriamento permite uso de altímetros e gravímetros, para quantificar níveis de águas superficiais e volumes armazenados, as dimensões do Rio Amazonas permitiu melhor compreensão das variações espaço temporais da água doce. Técnicas mais atuais, como micro-ondas, radares e interferômetros, permitem uma especialização das inundações, dinâmica sedimentológica, estudos de turbidez e cor da água, entre outras condições (FASONI-ANDRADE et al., 2021).

Nesse sentido, os dados do Sensoriamento Remoto (SR) facilitam o estudo e monitoramento de áreas de influências de minas, o monitoramento de mudanças nos corpos d'água e vegetação devido a inundações e as observações das variações de umidade do solo. O Sensoriamento Remoto, assim como os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), possuem vantagens sobre as técnicas tradicionais, no monitoramento da dinâmica da paisagem em áreas mineradas ativas e inativas, tanto a longo quanto a curto prazo (DE CARVALHO NASSER, et al., 2024).



Figura 7 - A) Trecho ocupado pela mineração no Rio Cabitutu, B) e C) Trecho observado em 2019 e 2020 respectivamente.

Fonte: A, Arquivo IBAMA: *In* Diniz et al., (2021); B e C, Diniz et al, (2021).

Caso recente que recebeu atenção da mídia e da comunidade científica foi a alteração na coloração (turbidez) das águas do Tapajós no estado do Pará, na região próxima à foz é natural a presença de canais com água de elevada turbidez vindos do Rio Amazonas. Nas regiões mais a montante, uma provável fonte de movimentação do material sedimentar é a presença da atividade mineradora, nos principais afluentes do Tapajós como Rio Cabitutu. Imagens obtidas por sensoriamento remoto, foram utilizadas no monitoramento do fluxo de sedimentos, auxiliando na fiscalização de atividades que alterem as características do corpo hídrico, (Figura 3) (DINIZ, et al., 2022).

## 2.4 Monitoramento da cor da água

De acordo com Wernand e Woerd (2010), desde o final do século XIX já havia uma introdução de estudos e representação da cor das águas dos oceanos. Na década de 1890 François Alphonse Forel propôs um padrão de cores variando do azul ao verde, com uma



combinação de percentuais de cianômetro (azul) e xantômetro (amarelo). Em 1892 Wilhelm (*Willi*) Ule expandiu a escala, com cores indo do azul ao marrom, passando pelo azul-esverdeado, com Forel a escala inicialmente partia do 1 a 11. Ule acrescentou do 12 a 21, formando a escala Forel-Ule escala combinada de 1 a 21, da água mais azul a mais marrom-avermelhada, (Figura 8).



Figura 8 - Escala FU adotada atualmente com 21 cores e 1 tubo de água destilada.  
Fonte: Wernand, Woerd (2010).

As condições do olho humano nos permitem distinguir as cores em comprimentos de onda variando entre 380 e 780 nm, do azul ao vermelho, respectivamente, as cores no espectro do visível são constituídas de uma combinação do padrão RGB, *red*, *green* e *blue*. Considerando o conceito de “mistura” e o advento das ferramentas de sensoriamento remoto, calcula-se os ângulos de reflectância, nos eixos X, Y e Z para a obtenção de um comprimento de onda resultante. Que é representado dentro do espectro visível, variando desde o azul escuro, nos comprimentos menores, ao vermelho escuro nos comprimentos de maior dimensão (WERNAND; WOERD, 2010).

Na década de 1930 as observações de cor da água, baseadas na escala Forel-Ule passaram a ser aplicadas a corpos hídricos continentais (WERNAND; WOERD, 2010). Sendo a cor da água um uma consequência da interação entre a radiação solar e os COAs (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019). O percentual de material presente na água, vai co-determinar a cor resultante na superfície observada, com base na absorção e retroespalhamento das ondas

eletromagnéticas. Onde na água pura se espera comprimentos menores, e que o comprimento de ondas resultantes seja diretamente proporcional a concentração de sedimentos (WANG et al., 2015).

A observação das águas naturais é uma atividade complexa, considerando heterogeneidade da composição, e a multiplicidade das fontes dos COAs. O estudo e monitoramento das relações entre as cores e componentes dos corpos hídricos, são vínculos difíceis de esclarecer (WANG et al., 2015).

## 2.5 Monitoramento de atividades de mineração

Atividades mineiras já são consideráveis na Amazônia desde a década de 1950, com oscilações conforme o preço dos minerais, devido ao crescimento atual do preço e esgotamento das minas tradicionais, a região tem vivido uma fase de “corrida do ouro” (LOBO; COSTA; NOVO, 2015). Seguindo um movimento internacional neo extrativistas, com apoio institucional, que tem se expandido na Ásia, África e América do Sul (VINCENT; VASCONI, 2016; BRASIL, 2020, 2022).

Em estudos na bacia do Rio Tapajós, Lobo, Costa e Novo (2015), e Diniz et al., (2021), relacionaram as atividades de exploração mineral com o aumento da concentração de sedimentos nas águas. A remoção do solo, escavações, usos de jatos de água, balsas, dragas, resultam em lançamento em grandes volumes de massas inorgânicas, lançadas ou reviradas nos rios em que atuam, (Figura 9) (PORTELLA, 2015; MILANEZ, 2017).

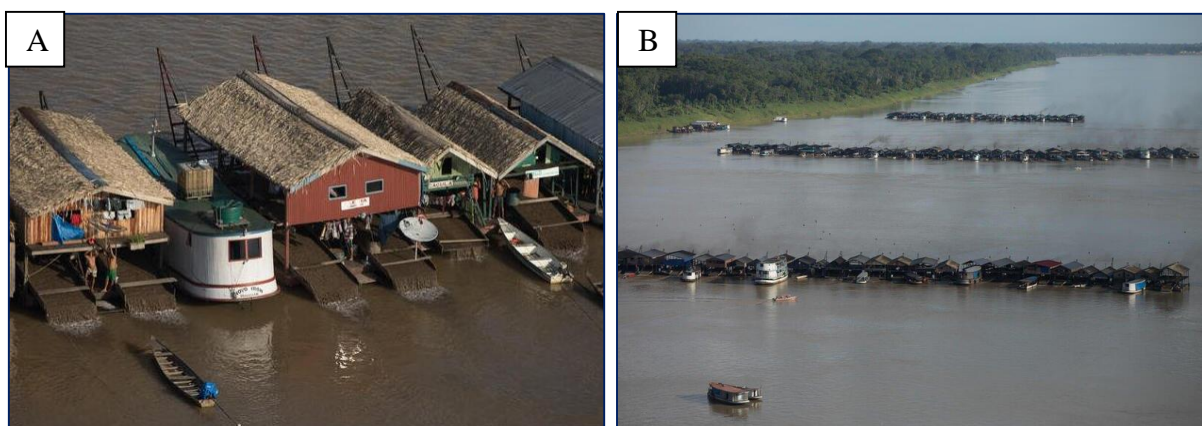


Figura 9 - Dragas típicas para exploração de minérios de aluvião no Rio Madeira.  
Fonte: Greenpeace/Kelly, (2021).

Considerando o monitoramento das áreas atingidas pelas atividades humanas como os empreendimentos mineradores, é importante a quantificação dos sedimentos. Estes alteram o espalhamento e absorção da luz de acordo com seu tamanho e forma, suas propriedades ópticas variam conforme a proporção orgânico e inorgânico. Estas partículas inorgânicas não absorvem

tão significativamente a luz, porém seu maior efeito está no espalhamento, permitindo identificação e monitoramento (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019).

Muitas das atividades de mineração realizadas na região amazônica ocorrem de maneira informal, dentro de áreas protegidas, como as Terras Indígenas, ou em locais remotos e inacessíveis. Desta forma é difícil a compreensão das alterações ocorridas historicamente, as ferramentas de sensoriamento remoto demonstram boas possibilidades para a compreensão destas interações (LOBO; NOVO; TELMER, 2016).

De acordo com Lobo et. al. (2018), o mapeamento com áreas de mineração e suas interferências são atualmente elaborados de maneira esporádica, para melhorar o cenário diversos trabalhos tem sido desenvolvidos para mapear esta atividade. Usando dados de sensoriamento e métodos de classificação, trabalhos apontam que o uso de imagens de alta resolução como (Sentinel-2A). Métodos modernos como aprendizado de máquina e programação orientada ao objeto, como *Google Earth Engine* – GEE (GOOGLE, 2024), fornecem dados com alto nível de acurácia, e possibilidades variadas.

As atividades mineradoras causam impactos significativos no meio ambiente, exigindo esforços de restauração ambiental. Em estudo realizado na Floresta Amazônica Brasileira, dentro da Floresta Nacional do Jamari (FLONA), De Carvalho Nasser, et al. (2024). Quantificaram e mapearam áreas anteriormente utilizadas para mineração, e afetadas por inundações sazonais utilizando uma combinação de ferramentas geofísicas, geotecnologia e soluções digitais para aquisição de dados.

Utilizaram imagens de satélite para adquirir bandas hiper espectrais na faixa Vis-NIR-SWIR, levantamentos com georadar para análise do subsuperfície e sensores digitais de campo para monitorar características do solo, como a umidade do solo, temperatura e fertilidade (DE CARVALHO NASSER, et al., 2024).

## **2.6 Monitoramento de uso e cobertura do solo (BSI)**

As alterações no uso e cobertura da terra são consideradas como variável mais importante da mudança global, que afeta ecossistemas com um impacto no ambiente que seja pelo menos tão grande como o associado às mudanças climáticas. Atualmente os estudos têm se voltados para detectar com mais acurácia, dados que descrevem a espacialização da cobertura atual da terra. Foram feitos esforços para torna mais simples os processos de criação de mapas de maneira automatizada, com o uso de ferramentas e conceitos do geoprocessamento e sensoriamento remoto (LI; CHEN, 2014).

Para monitoramento por meio de ferramentas de geoprocessamento das características de uso e cobertura do solo, as equações de BSI (*Bare Soil Index*) possuem diversas aplicações, com a utilização de 2, 3, 4 ou mais bandas, sendo as principais, infravermelho próximo (SWIR), vermelho (*red*), infravermelho (NIR) e azul (*blue*), sendo extraídas as regiões em que o solo se encontra sem a presença de vegetação (ARIZA et al., 2021).

Considerando que as bandas de infravermelho termal do Landsat medem a emissão de energia da superfície terrestre, e sendo essa um resultado das suas condições de sua superfície. Essas bandas podem ser utilizadas como determinantes das características de cobertura do solo. Seguindo este princípio foram desenvolvidos índices de diferença normalizada de solo exposto (IDNSE/NDBSI) índice baseado na diferença entre reflexão e absorção de comprimentos de onda infravermelho por solo nu, facilitando a distinção das áreas expostas (LI; CHEN, 2014).

O solo exposto ou com baixa cobertura vegetal, apresenta uma maior reflectância das bandas do vermelho e infravermelho. Os cálculos de BSI nas áreas analisadas funcionam como rastreio de regiões com atividades antropogênicas e alterações ambientais, essa análise associada as características da mineração com a remoção da cobertura vegetal, movimentação de massas de solo (PORTELLA, 2015; MILANEZ, 2017). Permitem o monitoramento das interações destas atividades com o ambiente natural (MA, et al., 2016; ARIZA et al., 2021).

O rastreamento do solo nu é importante na compreensão do ecossistema regional, suas alterações espaciais e temporais são indicadores de atividades antropogênicas, sinais de avanço urbano, atividades econômicas e industriais. Contribuindo para entendimento dos efeitos ecológicos e ambientais destas alterações nas áreas afetadas pelas alterações. Neste contexto, a tecnologia de sensoriamento remoto, tem demonstrado boa eficiência no monitoramento e quantificação destas áreas de solo descoberto, fornecendo um acesso facilitado ao uma abundância de dados. Onde ao analisar as reflectâncias, calcular os índices de diferença normalizada (IDNSE), podem ser analisados quantitativa e qualitativamente as condições de uso e cobertura do solo (LIU et al. 2022).

Diversos índices podem ser resultados por meio da composição de bandas oferecidas por diferentes satélites, por meio de equações são derivados dos comprimentos de espectrais, informações das características de uma área, separando o solo descoberto de outras coberturas. O NDVI, NDWI, MDWI entre outros, podem ser calculados independente ou com poucas variações das condições climáticas e características geográficas. Por sua vez, os índices de solo exposto são sensíveis à composição do solo, graus de umidade e vegetação circundante, tendo desempenho variado nas áreas úmidas e áridas, sendo mais eficientes em áreas e períodos secos (NGUYEN et al., 2021).

De acordo com Nguyen et al. (2021), O cálculo de solo exposto pode ser prejudicado em áreas com grandes percentuais urbanos, onde a presença de telhados e pavimentos “frios”, outras arquiteturas e infraestruturas urbanas podem influenciar negativamente na precisão dos cálculos. Em estudos no Sudeste da Ásia, as equações mais adequadas e com melhores resultados na diferenciação de solos (secos e úmidos), foram os índices de solo baseados nas bandas de comprimentos de ondas NIR, SWIR1 e SWIR2 (NGUYEN et al., 2021).

Para Ariza et al. (2021), um indicador de condições de solo pode ser obtido por meio de combinação numérica das bandas do visível e infravermelho, bandas do azul, vermelho, infravermelho próximo e ondas curtas do espectro do infravermelho para registrar as variações do solo sendo essas bandas espectrais são usadas de maneira normalizada.

O infravermelho de onda curta e as bandas espectrais vermelhas, são usadas para quantificar a composição mineral do solo, enquanto o azul e as bandas espectrais do infravermelho próximo são usadas para aumentar a presença de vegetação. O índice *BSI* pode ser usado com muita aplicabilidade nos trabalhos desenvolvidos com sensoriamento remoto, desde o mapeamento de solo, identificação de culturas, podendo estar ou não associados aos índices de vegetação NDVI (ARIZA et al., 2021).

De acordo com ABE et al. (2019), a quantificação de zonas de solos nus é significativa, já que o aumento das regiões desflorestadas impactam em um aumento significativo nos índices de erosão do solo. Que podem ser mais substanciais dependendo do grau de declividade dos terrenos, sendo mais intensa a erosão em solos declivosos e desprotegidos, regiões com altos volumes de precipitação anual, também podem ter o grau de erodibilidade aumentado quando tem seus solos expostos. Já que a alta pluviosidade fornece energia que impulsiona processo erosivos naquela região.

## **2.7 Monitoramento e modelagem hidrológica**

Os dados e imagens oferecidos pelas missões de satélite são uma importante fonte para reconstrução de registros históricos e monitoramento dos índices de turbidez de rios, estuários e regiões águas costeiras. Rudorff et al. (2018), utilizaram as ferramentas de sensoriamento para analisar os impactos dos rejeitos rompimento da barragem na turbidez do Rio Doce, e nas águas litorâneas adjacentes. Elaborando séries temporais de mapas de turbidez, por meio do uso de imagens alta resolução com satélites Landsat e Aqua.

Foram utilizadas imagens do Landsat-5 de maior resolução espacial (TM) e imagens Landsat-8 (OLI), com resoluções de 30 m para quantificar e espacializar a turbidez das águas

superficiais na Foz do Rio Doce. Capturando a variabilidade com arquivos desde os anos 1980, monitorando as descargas de sedimentos impulsionadas pelo rio (RUDORFF et al., 2018).

Por meio de imagens obtidas por meio espectrorradiômetro de média resolução (MODIS) (250 m) foram analisadas a variabilidade das águas superficiais ao longo do interior costa do Espírito Santo. Os fluxos de águas superficiais foram modelados usando um algoritmo semi-analítico para águas globais e costeiras. Com ajustes para taxas de fluxo mais altas necessárias para eventos de alta carga de sedimentos após um desastre de mineração. Para a calibração pré-desastre as relações entre o fluxo do rio e a variabilidade foi analisada com dados históricos de satélite e *in situ*, e simulados, para o período pós-desastre para se referir aos níveis de água observados em níveis esperados. Isso foi feito para avaliar o impacto do desastre na erosão do Rio Doce e acompanhar a recuperação do sistema. A distribuição e densidade de sedimentos estuarinos no mar foram plotadas para diferentes condições marítimas para avaliar a extensão das áreas costeiras afetadas pelo desastre (RUDORFF et al., 2018).

Rudorff et al. (2018) também analisaram as condições dos trechos do Rio Doce e outros afetados pelo rompimento. Foram utilizados dados de estações de medições operados pela Agência Nacional de Águas (ANA) na cidade de Colatina - ES, a 122 km da foz do rio. Foram produzidos mapas de satélite para analisar a dispersão da pluma de turbidez das águas superficiais do Rio Doce ao longo da plataforma continental do litoral do Espírito Santo. Imagens Landsat obtidas antes e depois do desastre, foram usadas para mapear as áreas potencialmente afetadas por detritos, em diferentes teores de erosão e turbidez *Formazin Nephelometric Units* (FNU), desde alto com teores maiores que 20 FNU, médio 10-20 FNU, ao teor baixo com valores menores que 5 FNU.

De acordo com ABE et al. (2019), as atividades de extração de ouro, e outros minerais têm acelerado os processos de produção, e condução destes sedimentos aos leitos dos corpos hídricos amazônicos. Onde a sedimentação nos rios perturba o equilíbrio dos sistemas aquáticos, limita o campo de luz subaquático disponível para a produção primária, além de afetar atividades, como a redução da vida útil de reservatórios e turbinas. Aumentando assim os custos de manutenção de usinas hidrelétricas e estações de tratamento de água e aumentar a concentração de sedimentos no rio.

O rio Tapajós e seus afluentes foram originalmente definidos como rios de águas claras (transparentes), com teores de concentração de sólidos tão baixas quanto 1,6 mg/L em áreas intocadas da bacia. No entanto, com base em dados de campo e/ou métodos de sensoriamento remoto, vários estudos relataram concentrações de até 500 mg/L no rio Tapajós e alguns de

seus afluentes a jusante das minas de ouro. Descrevendo a relação entre o aumento de atividades mineiras e concentrações de sedimentos nos rios (ABE et al., 2019; LOBO et al., 2015; 2017).

Ainda de acordo com ABE et al. (2019), estimar os balanços de sedimentos por áreas de mineração e distinguir as manchas de sedimentos de erosão por precipitação, fornecerá informações sobre mercúrio e outras poluições químicas relacionadas à mineração em rios e sedimentos. Tais análises podem ajudar a melhorar o entendimento das emissões e transporte de metais, e outros contaminantes.

O aumento do volume de chuvas é inversamente proporcional a intensidade da exploração dos recursos minerais na estação chuvosa. Como resultado, a erosão por precipitação é amplificada e os sedimentos que chegam ao canal aumentam. Desta forma sazonalmente, a dinâmica de concentração de sólidos simulada é inversa à dinâmica estimada/medida induzida pela mineração de ouro. Onde os maiores volumes vindos das atividades mineiras são durante a estiagem que estas atividades são fortalecidas, facilitando a identificação da fonte origem dos sedimentos (ABE et al., 2019).

Para Villar et al. (2012), monitoramento do transporte de sedimentos nos sistemas fluviais é uma boa maneira de avaliar os processos de erosão e sedimentação que ocorrem nas bacias hidrográficas. O Conselho Intergovernamental do Programa Hidrológico Internacional (IHP), destacou os significativos impactos socioeconômicos e ambientais, desses processos na gestão de bacias hidrográficas, e que sua aplicação prática ainda é pouco compreendida. Um entendimento mais completo do transporte de sedimentos é fundamental em áreas onde o monitoramento permanece inadequado, como as principais bacias hidrográficas do mundo, na região dos trópicos (VILLAR et al., 2012).

Em estudos na Amazônia peruana, os dados do MODIS foram usados para completar uma rede de monitoramento, na região. A Autoridade de Águas do Peru (SENAMHI) monitora os níveis de água dos principais rios há mais de 20 anos, mas as informações sobre parâmetros básicos de qualidade da água não estavam disponíveis até alguns anos atrás.

O programa Hidrogeodinâmica da Bacia Amazônica (HYBAM), em colaboração com o SENAMHI, instalou uma rede de monitoramento de cinco estações no oeste do Peru que monitorará a concentração de SSS do rio. Bem como de outras águas da bacia, nível e limites. Usando medições globais, os dados de satélite foram calibrados e usados para avaliar as áreas de Descarga de Sedimentos do Marañon, Ucayali e Rio Amazonas. A acurácia do método foi discutida, assim como a integração de medições convencionais de solo com técnicas espaciais, obtendo bons resultados com variações menores que 10% (VILLAR et al., 2012).

Fagundes et al., (2021), desenvolveram por meio das ferramentas Modelo de

Sedimentos (MGB-SED) e Modelo Hidrológico-Hidrodinâmico da América do Sul (MGB-AS), um modelo de sedimentos para a América do Sul (MGB-SED-AS). A aplicação permitiu estimar em vários pontos da América do Sul os fluxos sedimentares, que foram validados e calibrados com dados *in situ* de agências reguladoras do Brasil, Argentina e Colômbia, obtendo bons valores de concordância.

Nos estudos, o Rio Amazonas foi o principal a lançar grandes volumes de sedimentos no oceano com  $4,36 \cdot 10^8$  t/ano, seguido pelas bacias do *Magdalena*  $3,26 \cdot 10^8$  t/ano, Orinoco  $1,37 \cdot 10^8$  t/ano, e *La Plata*  $1,11 \cdot 10^8$  t/ano, representando 72% do volume lançado pelo subcontinente. O trabalho também estimou volumes depositados nas áreas de várzeas e alagados, onde a região do *Banado La Estrela* foi o mais representativo com  $4 \cdot 10^7$  t/ano, seguido pelos *Llanos de Moxos*, várzea da Amazônia central e várzeas interfluviais do Peru com  $2 \cdot 10^7$  t/ano, somando quase 60% da disposição total (FAGUNDES et al., 2021).

## 2.8 Considerações do Estado da Arte

Esta dissertação por meio do seu estado da arte, buscou situar o leitor, sobre localização, dimensão (COSTA HERRERA, 2019), importâncias econômicas, ambientais e científicas da Amazônia, um pouco de história, uso e ocupação atuais (NASCIMENTO; SILVA; SANTOS, 2014; VINCENT; VASCONI, 2016; ABE et al., 2019; ENRIQUEZ, 2014; FASSONI-ANDRADE et al., 2021; ESPINOZA-VILLAR et al., 2018).

Apresentou a relação da região Amazônica com as atividades antrópica e econômicas, com foco nas atividades, de mineração e garimpo, como também a relação das atividades de exploração mineral com os recursos hídricos, e os impactos destas nas características de qualidade das águas (ENRIQUEZ, 2014; MELO, 2012; PORTELLA, 2015; MILANEZ, 2017; DE CARVALHO NASSER, et al., 2024; LOBO; NOVO; TELMER, 2016; CAMPOS, 2017).

Trouxe as possibilidades do sensoriamento remoto, aplicado ao monitoramento de grandes áreas, e/ou áreas remotas, carente de estudos como o norte brasileiro, o sensoriamento remoto também permite estudos mais específicos, como observar a qualidade da água, em especial condições de cor (WERNAND; WOERD, 2010; WANG et al., 2015; BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019; FONTOURA; PAIVA, 2021), como as atividades de mineração desenvolvidas nos leitos e margens de seus rios (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019; LOBO; NOVO; TELMER, 2016; DE CARVALHO NASSER, et al., 2024).

Ressaltou a importância da compreensão das mudanças de uso e cobertura do solo, e as possibilidades do uso de ferramentas de sensoriamento, para estimar estas condições, por meio de matemáticas de bandas de refletâncias, do SWIR, vermelho, NIR e azul, como as equações



de BSI, NDSI e outros índices (LI; CHEN, 2014; ARIZA et al., 2021; MA, et al., 2016; ARIZA et al., 2021; LIU et al. 2022; NGUYEN et al., 2021).

A importância e aplicações do monitoramento com a coleta e análise de dados, estudos de turbidez e sedimentos (RUDORFF et al., 2018; ABE et al., 2019; LOBO et al., 2015; 2017). E da modelagem hidrológica, com simulações de condições climáticas, criação de séries de dados, reconstrução de registros históricos e construção de séries temporais (VILLAR et al., 2012; FAGUNDES et al., (2021).

### 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

##### 3.1.1 Área de estudo

As bacias hidrográficas do Rio Madeira e Trombetas, são sub-bacias do Rio Amazonas, cortando longitudinalmente a bacia, desde o extremo norte brasileiro, nas fronteiras com o Suriname e Guiana, até o extremo oeste, nas fronteiras com Bolívia e Peru (Figura, 10).

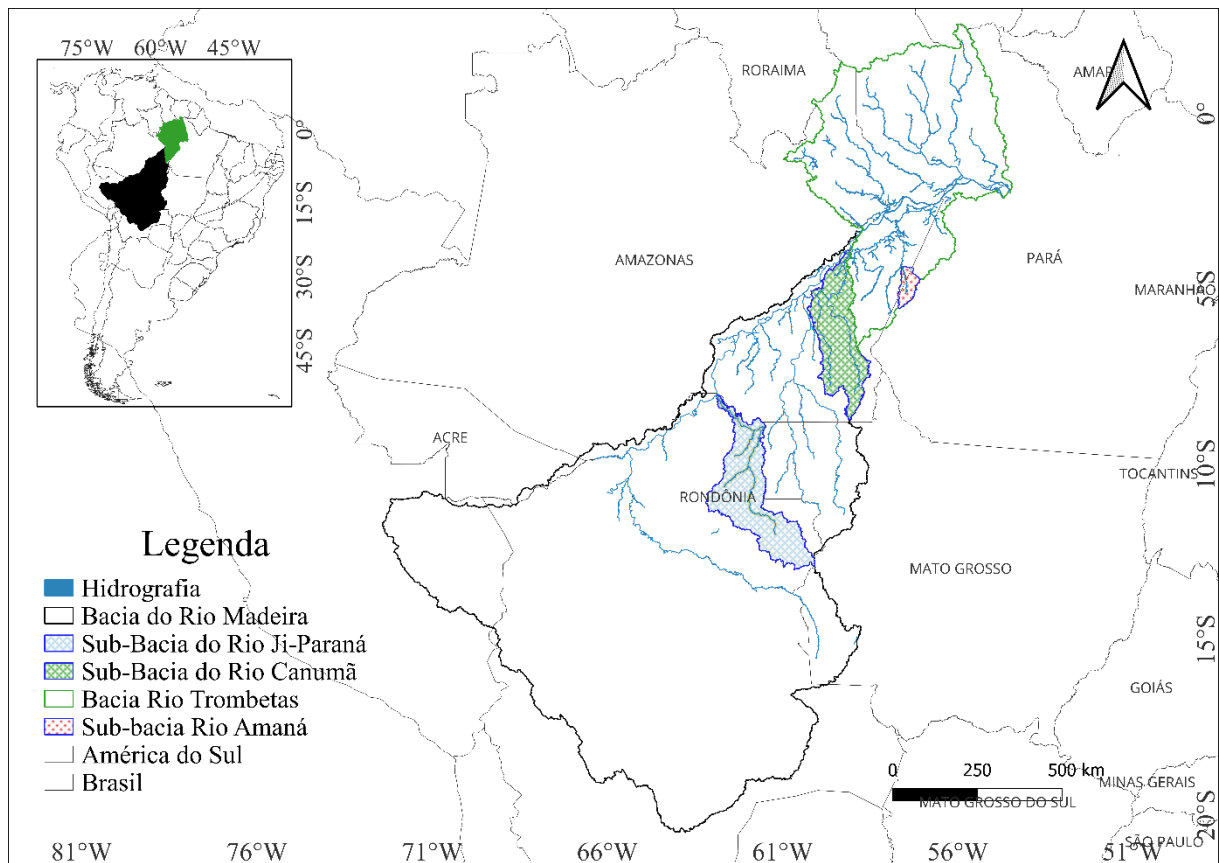


Figura 10 – Bacia e hidrografia do Rio Madeira, Trombetas, sub-bacias dos Rios Ji-Paraná, Canumã e Amaná.

Como objeto de estudo foram adotadas as sub-bacias do Madeira, Rios Ji-Paraná e Canumã, e sub-bacia do Trombetas, Rio Amaná (Figura 10), onde foram analisados dados de cor da água entre os anos de 1994 e 2021. A bacia do Canumã foi adotada por se apresentar consideravelmente mais preservada, e com pouca presença de atividades de mineração em funcionamento e foi utilizada como bacia de controle. A bacia do Ji-Paraná foi escolhida considerando o seu elevado grau de antropização, e presença de atividades de mineração. A bacia do Amaná, foi escolhida por atualmente apresentar intensa atividade garimpeira.

### 3.1.2 Dados

Foram utilizadas imagens da série Landsat quadro 1, devido ao tamanho do pixel de 30 metros, foram analisados e classificados corpos hídricos com dimensões acima deste limiar, melhores resultados são obtidos em rios mais largos que abrangem mais pixels.

Quadro 1 – Satélites utilizados.

<b>Série Landsat – Landsat Missions (USGS)</b>					
<b>Satélite</b>	<b>Orbita</b>	<b>Altitude</b>	<b>Ciclo</b>	<b>Operação</b>	<b>Nº das Bandas, R, G, B, NIR</b>
L. S - 5	Sol-síncrona, quase polar, 98°, de 99 minutos	705 km	16 dias	1992-1999	3, 2, 1, 4
L. S - 7				1999-2022	3, 2, 1, 4
L. S - 8				Desde 2013	4, 3, 2, 5

Considerando o objetivo principal de monitorar a cor das águas e presença de sedimentos, foram escolhidas imagens do período seco, de junho a setembro, para que a sazonalidade das chuvas e a erosão difusa não prejudicasse a análise (LOBO et al., 2017; ABE et al., 2019).

### 3.2 Métodos

Para obtenção das características de cor das águas foram utilizados o ângulo e coordenadas cromáticas, para utilização da cor como *proxy* de sedimentos. Onde as águas com poucos sedimentos apresentam coloração mais azulada, enquanto as ricas em sedimentos apresentam cores avermelhadas (WANG et al., 2014; GARDNER et al., 2021).

Foram analisados dois períodos 1994/2005 e 2006/2021, a série estudada de 1994 até 2021 foi subdividida em duas. Conforme o período de maior crescimento das atividades mineradoras, com aumento significativo a partir de 2005 (BRASIL - ANM, 2022).

Foi utilizada a hidrografia com corpos hídricos maiores que 30 metros de largura (GARDNER et al., 2021). Os pixels foram selecionados na sobreposição entre a camada de hidrografia e as imagens de satélite. Os valores médios dos pixels foram utilizados em cada trecho, obtendo um comprimento de onda médio dominante por trecho.

#### 3.2.1 Dados de mineração

Foram selecionadas bacias em diferentes graus de antropização, e também com diferentes status de ocupação pela atividade de mineração/garimpo. A bacia do Canumã, apresenta pequeno grau de antropização, e mineração insignificante.

Na região do Ji-Paraná, a antropização é muito significativa, com presença de mineração (Figura, 11).



Figura 11 – Trecho garimpado na sub-bacia do Rio Ji-Paraná 2024.  
Fonte: GOOGLE EARTH, 2024.

Na bacia do Anamá, a antropização é insignificante, porém a presença de garimpo é significativa nas margens de seus rios (Figuras, 12 e 13).



Figura 12 – Garimpo na sub-bacia do Rio Amaná 2024.  
Fonte: MAPBIOMAS, Souza, et. al., 2020.



Figura 13 – Trecho garimpado na sub-bacia do Rio Amaná 2024.  
Fonte: GOOGLE EARTH, 2024.

Após a escolha das sub-bacias, estas foram selecionadas em arquivo vetorial, da coleção de bacias Ottocodificadas da Agencia Nacional de Águas e Saneamento (ANA, 2017). Esses vetores foram utilizados com áreas de recorte, nas rotinas elaboradas no GEE, em que foram recortados os rios com larguras maiores que 30 metros (GARDNER, et. al., 2021), para elaboração das escalas FU (WANG et al., 2014). Assim como também foram utilizadas como áreas de cálculo das equações de solo exposto.

### 3.2.2 Série de comprimento médio de onda dominante e Forel-Ule *scale* (Scala FU)

Para o método adotado para determinar a cor da água, utilizou-se além das cores visíveis, o ângulo de reflectância de cada uma das bandas RGB. Na primeira etapa utilizou-se o GEE para cálculo dos ângulos X, Y e Z, por meio das equações de Wang et al., (2014).

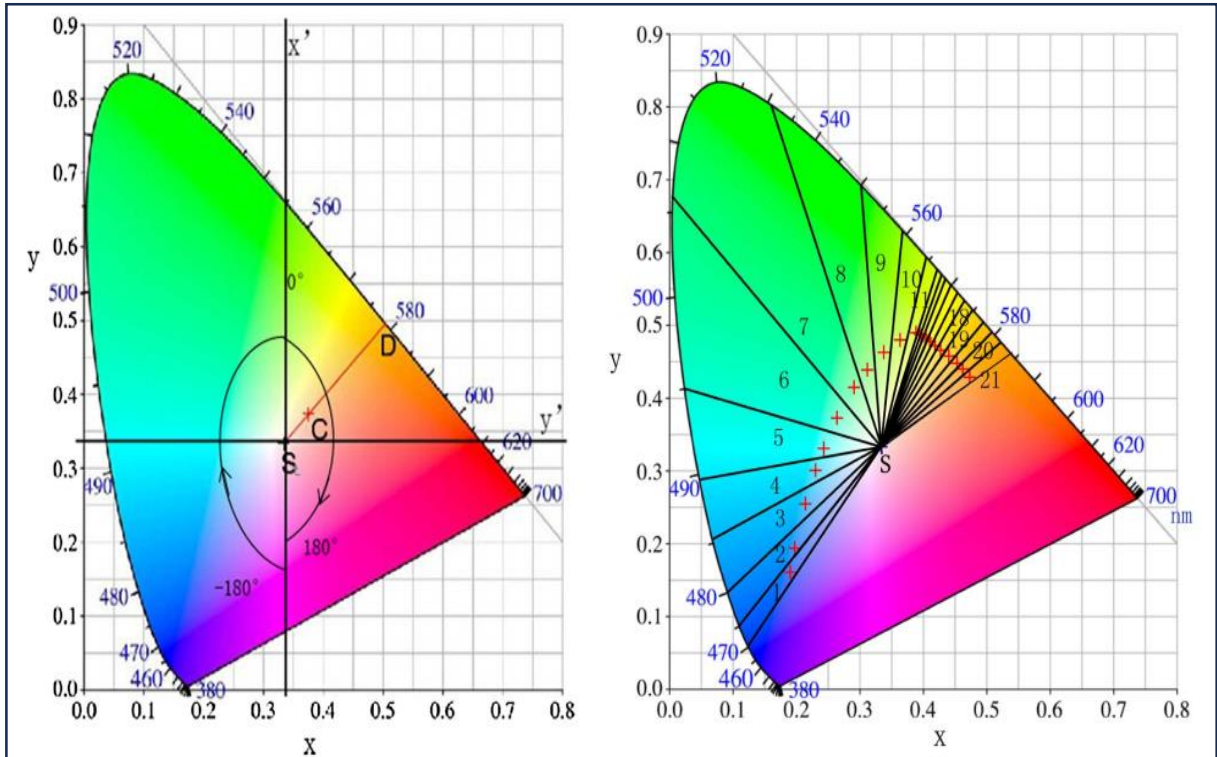


Figura 14 - Diagrama de cromaticidade (esq), escala de cores FU (dir).

Fonte: Wang et al., (2014).

$$X = 2.7689R + 1.7517G + 1.1302B \quad (01)$$

$$Y = 1.0000R + 4.5907G + 0.0601B \quad (02)$$

$$Z = 0.0565G + 5.5943B \quad (03)$$

Onde:

$X$ ,  $Y$  e  $Z$ : ângulos de reflectância em cada um dos eixos.

$R$ : comprimento da banda *red* (vermelha).

$G$ : comprimento da banda *green* (verde).

$B$ : comprimento da banda *blue* (azul).

Para obtenção das coordenadas cromáticas foram utilizadas equações adaptadas para rios por Gardner et al., (2021).

$$x = X/(X + Y + Z) \quad (04)$$

$$y = Y/(X + Y + Z) \quad (05)$$

$$z = Z/(X + Y + Z) \quad (06)$$

Onde:

$x$ ,  $y$  e  $z$ : coordenadas cromáticas.

$X$ ,  $Y$  e  $Z$ : comprimentos de onda dominante.

O valor do *hue angle* ( $\alpha$ ) foi calculado por meio das coordenadas cromáticas de acordo com o comprimento de onda, utilizado pela *International Commission on Illumination* (CIE) (Figura 12), de acordo com (WANG et al., 2014; GARDNER et al., 2021).

$$\alpha = (\arctan2((x - 0.33)/(y - 0.33)))(\frac{180}{\pi}) \quad (07)$$

Onde:

$\alpha$ : *hue angle* (CIE).

$x$  e  $y$ : coordenadas cromáticas.

As equações foram adaptadas em códigos para GEE e RStudio (RS), por Fontoura e Paiva (2021) (Figura, 15). Foram selecionados para a coleta das imagens de satélites o período de junho a setembro de 1994 e 2021, estação de seca na região, após o processamento foi exportado para o Google Drive uma planilha em arquivo “CSV”. Esta foi processada no aplicativo RS onde um algoritmo foi elaborado para converter ângulos em comprimentos de onda, e por meio desta obter uma cor (CIE) no espectro visível (Figura 14).

Após tratamento no RS gerou-se uma tabela, mesclada por meio do QGIS à tabela de atributos do arquivo com os corpos hídricos, com trechos de larguras maiores que 30 metros. A simbologia foi tratada de forma que cada trecho recebesse a cor predominante, foi utilizada como parâmetro a FU-class (WERNAND, 2010; WERNAND e HOMMERSOM, 2011) apresentada por Wang et al., (2014) quadro 2.

Quadro 2 – Esquema de cor FU-scale, por faixa de comprimento de onda (W. L.).

FU	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
WL	471	476	481	486	490	495	510	531	550	560	564	568	569	570	571	572	574	576	578	580	582
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	475	480	485	489	495	509	530	549	590	564	567					573	575	577	579	581	583

Fonte: Adaptado de Wang et al., (2014).

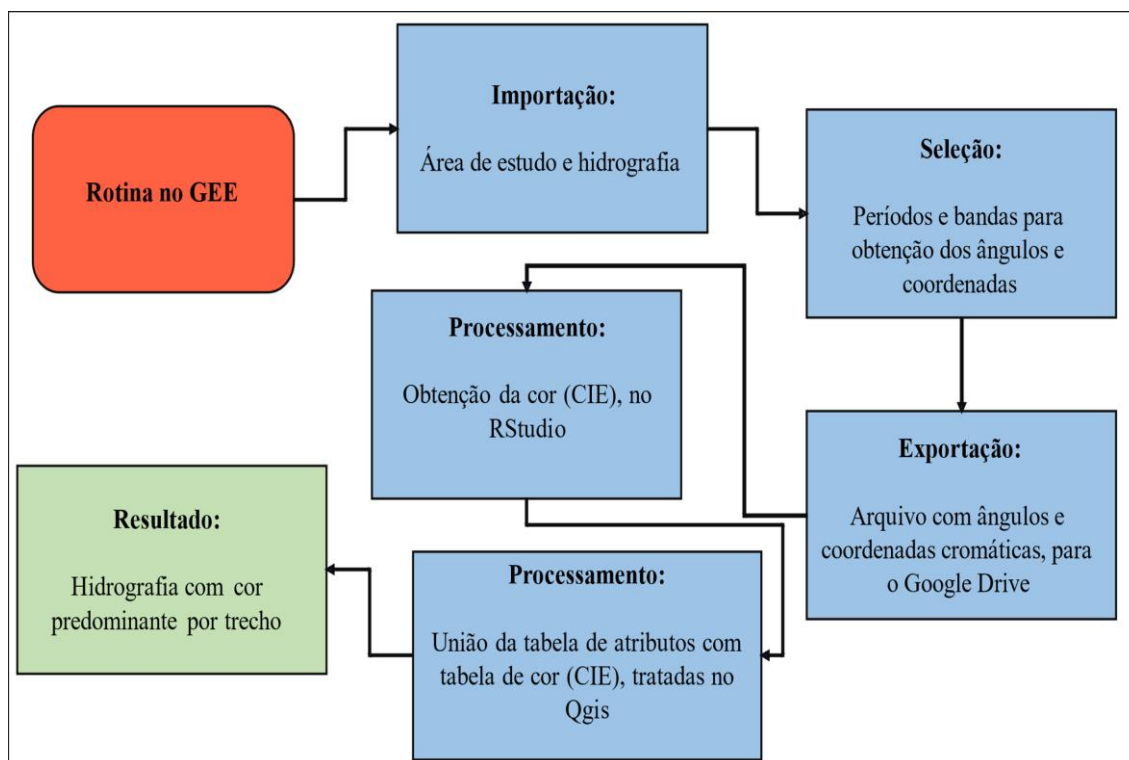


Figura 15 - Fluxograma para obtenção da cor na escala FU.

### 3.2.3 Estatística

As ferramentas estatísticas possibilitam admitir ou descartar uma hipótese, verificando se os dados apoiam ou não a hipótese formulada, para o trabalho foi considerada hipótese:

$H_0$ : Onde não há diferenças significativas entre as séries analisadas, e.

$H_1$ : Onde há diferenças significativas ou para mais ou para menos (SALAS, 1993; WILKS, 2011).

Para considerar ou não a significância de  $H_0$ , o valor numérico resultado do teste deve ser comparado com valores críticos, onde cada teste possui seus valores limites tabelados. “Essas tabelas geralmente associam dois parâmetros, que permitem localizar o valor crítico tabelado: nível de probabilidades (usualmente 5% [ $\alpha$ : 0,05], ou 1% [ $\alpha$ : 0,01]), e o número de graus de liberdade das amostras comparadas” (CAMPOS, 2000).

Valores inferiores que os apresentados pelas tabelas indicam “que ele não pode ser considerado diferente do que se obteria se as amostras comparadas fossem iguais” (CAMPOS, 2000). Desta forma se configura o que se chama de não-significância estatística, ou de aceitação da hipótese zero, ou de nulidade ( $H_0$ ).

Dentre os muitos testes possíveis de aplicação, estes podem ser divididos em dois grupos principais, os paramétricos e não paramétricos. Onde os paramétricos são indicados para amostras que seguem a distribuição normal, e os não paramétricos oferecem melhores resultados para as amostras que não se encaixam na normalidade distributiva. Os testes



paramétricos, em geral apresentam melhores resultados que os não paramétricos, devendo ser observadas as suas particularidades (SALAS, 1993; CAMPOS, 2000; WILKS, 2011).

O teste t de Student, considerado um teste paramétrico, compara os valores médios e de variância das amostras. Onde o valor de t é definido pela diferença entre as médias das amostras dividida pela variância combinada de ambos os grupos. A hipótese considerada nula ( $H_0$ ) é rejeitada se o valor de t obtido for maior em módulo, do que o inverso da probabilidade bicaudal para o nível de significância adotado ( $\alpha$ : 0,05) e graus de liberdade (Tamanho da série +1) (SALAS, 1993; WILKS, 2011).

O teste de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1948), é uma métrica utilizada para verificar se há tendência e se esta é significativa em uma série temporal. Quando não se conhece qual a distribuição da série, o uso de um método não paramétrico é o mais indicado. Neste contexto que se insere o teste de Mann-Kendall, onde:

$H_0$  (Hipótese nula): Não há tendência significativa.

$H_1$  (Hipótese alternativa): Há tendência significativa (MANN, 1945; KENDALL, 1948; WILKS, 2011).

O teste de Mann-Whitney baseia-se na diferença das medianas, é um teste considerado não-paramétrico, usado para comparar amostras não relacionadas, é uma alternativa para o teste t-Student quando as amostras não seguem distribuição normal. Portanto, o teste de Mann-Whitney é usado para testar se as medianas das amostras são iguais nos casos em que a suposição de normalidade não é satisfeita ou quando não for possível checar essa suposição (WILKS, 2011).

As análises estatísticas para verificar se as alterações nas cores dos trechos estudados são significativas, foram realizados por meio do Excel, utilizando como ferramenta o suplemento *Real Statistics* (ZAIONTZ, 2023).

Inicialmente a série foi dividida em dois períodos, o primeiro entre 1994/2005, o segundo entre 2006/2021. Os intervalos foram escolhidos observando os dados fornecidos sobre mineração (ANM, 2022b; MapBiomias, Souza, et. al., 2020), onde se observa uma intensificação da atividade mineradora a partir de 2005.

Com os trechos separados foram obtidas as médias das duas subséries, com o suplemento *Real Statistics* (ZAIONTZ, 2023). Foram observadas, a normalidade da série e também a normalidade da diferença entre as séries, com os testes de Shapiro-Wilk (GONZÁLEZ-ESTRADA, 2019; WILKS, 2011), e D'Agostino-Pearson (D'AGOSTINO; BELANGER; D'AGOSTINO JR, 1990).

Considerando as séries normais foram realizados os testes paramétricos (CAMPOS, 2000; SALAS, 1993; WILKS, 2011), como o Teste t Student (SALAS, 1993). Quando as amostras não corresponderam a normalidade foram utilizados os testes de Mann-Whitney (SALAS, 1993) e o de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1948).

### 3.2.4 Material em suspensão *in loco*

Por meio de dados fornecidos no portal Hidroweb da Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA, 2024). Foram extraídos da estação n.º 15560000, leituras de material em suspensão realizadas *in loco* no período entre 1994 e 2021. Foram filtrados dados compatíveis com as dadas observadas nas imagens de satélites, entre junho e setembro do ano hidrológico. As informações foram tratadas estatisticamente por meio do Excel e plugin *Real Statistics* (ZAIONTZ, 2023).

Primeiro foi verificada a normalidade da série de dados obtidos, posteriormente escolhido o teste estatístico mais adequado. Após a realização do teste verificou-se a significância dos testes realizados. Também foi elaborado um gráfico, com os valores médios dos sedimentos em mg/l, assim como a média da série selecionada.

### 3.2.5 *Bare Soil Index* – BSI

Para visualização do percentual de solo exposto nas regiões observadas, foram utilizadas equações apresentadas por Nguyen et. al. (2021) e Ariza (2017). A equação que apresentou um melhor resultado visual, foi com a utilização das bandas SWIR2, R, NIR e B, eq. 08, o processo foi realizado com os dados dos satélites Landsat 5 para os anos entre 1995 e 2010, e Landsat 8 para os anos de 2015 e 2020, em rotina elaborada no GEE.

$$BSI = ((SWIR2 + R) - (NIR - B)) / ((SWIR2 + R) + (NIR + B)) \quad (08)$$

Foi elaborada uma rotina no GEE, onde foram selecionados os vetores das sub-bacias do Canumã, Ji-Paraná e Amaná. No código foram selecionados os anos de, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 e 2020, para que se fosse obtido o BSI das médias anuais. O arquivo raster obtido, foi exportado para o Google Drive, e tratados no Qgis, para configuração do estilo de cor. Posteriormente foram gerados no Qgis cartogramas para as áreas selecionadas, com as imagens obtidas em cores para os métodos e parâmetros BSI apresentados anteriormente.

## 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Análise Estatística

Após a execução dos códigos e rotinas, os dados tratados no Excel, forneceram uma série de dados de cor, em comprimentos médios de onda dominante para cada uma das sub-bacias.

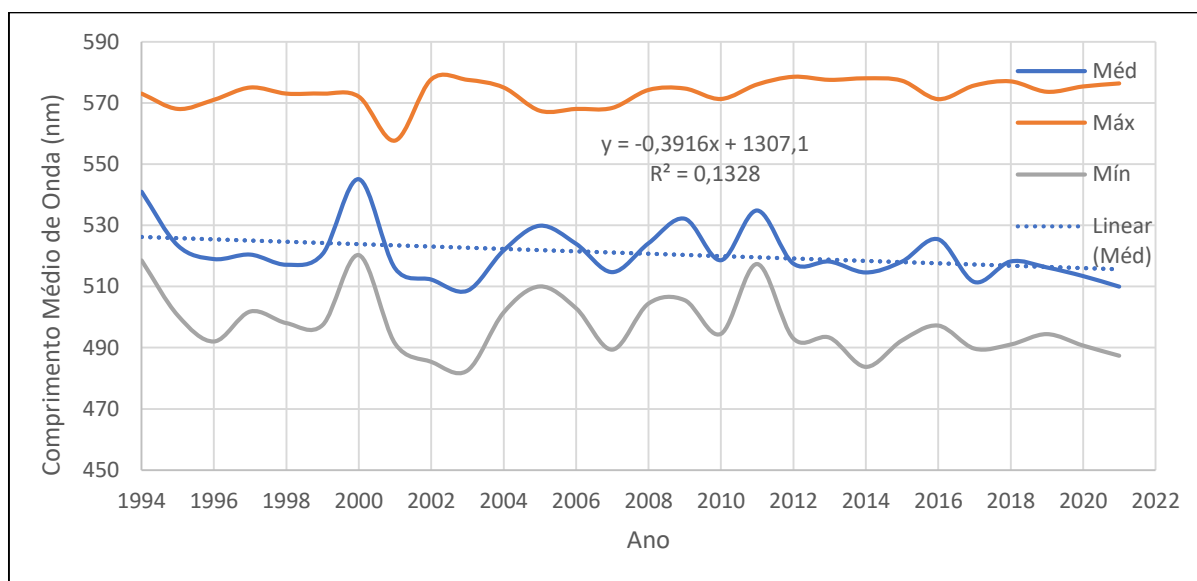


Figura 16 – Comprimentos médios dominantes por ano na bacia do Rio Canumã.

Com a obtenção das séries de comprimento médio de onda dominante, entre 1994 e 2021 para as três sub-bacias estudadas, podemos observar o comportamento destas quanto aos valores máximo, médio e mínimo. Na bacia do Canumã, os valores foram de 579, 521 e 483 nanômetros respectivamente (Figura, 16).

Quadro 3 – Resumo estatístico das séries obtidas.

Bacia	Max	Méd.	Min	Des. P.
<b>Canumã</b>	579	521	483	9
<b>Ji-Paraná</b>	576	555	494	9
<b>Amaná</b>	577	568	492	17

Para o Rio Ji-Paraná o valor máximo foi de 576, com média de 555 e mínimo de 494 nanômetros (Figura, 17). Par a bacia Amaná, os valores foram, máximo de 577, média de 568 e um mínimo de 492 nanômetros, apresentando valores médios e máximos maiores que as anteriores (Figura, 18), (quadro 5).

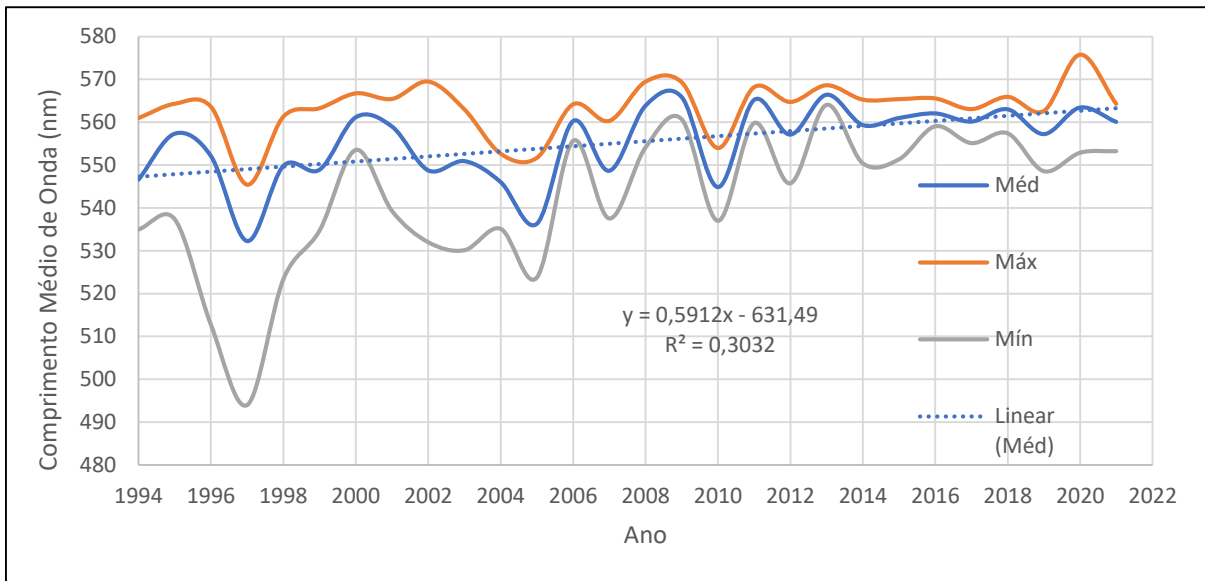


Figura 17 – Comprimentos médios dominantes por ano na bacia do Rio Ji-Paraná.

As linhas de tendência dos gráficos das três regiões apresentam comportamentos distintos, nas sub-bacias do Ji-Paraná e Amaná, apresenta um movimento de aumento dos valores médios. Enquanto que a sub-bacia do Canumã apresenta um cenário de redução, ou estabilidade, dos valores médios dos comprimentos de onda dominantes no período analisado (Figuras, 16, 17 e 18).

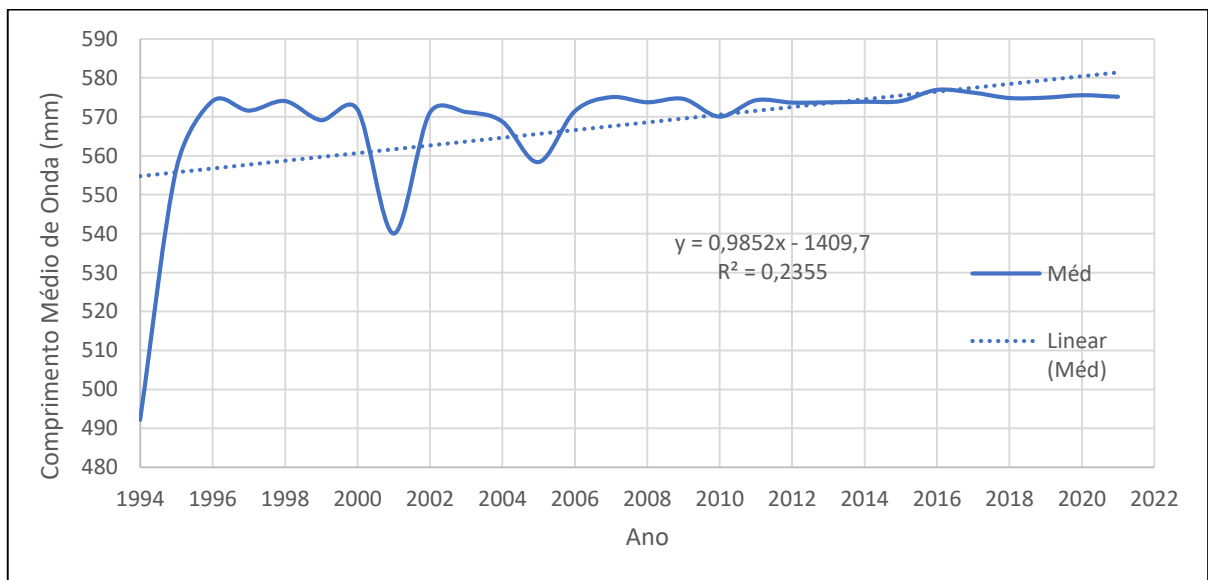


Figura 18 – Comprimentos médios dominantes por ano na bacia do Rio Amaná.

Foram analisados estatisticamente os valores médios de comprimento de onda dominante obtidos para a elaboração da escala de cor FU (WANG et al., 2014). Como ferramenta foi utilizado o *Real Statistics* (ZAIONTZ, 2023) e suas pré-configurações para realização dos testes.

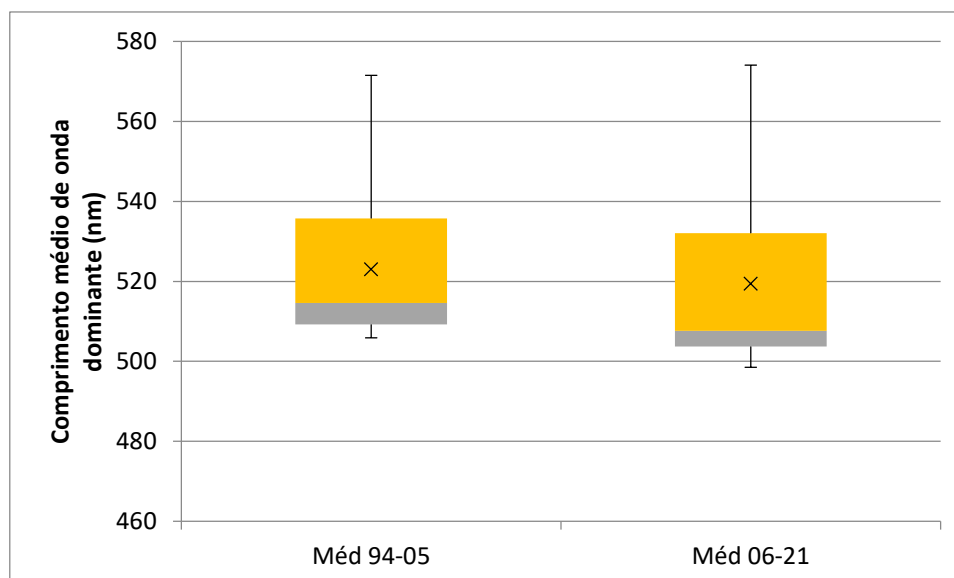


Figura 17 - Gráfico dos valores médios para as duas subséries do Canumã.

Inicialmente verificou-se a normalidade das subséries, 1994/2005 e 2006/2021 para as três bacias analisadas. Verificou-se também a normalidade da diferença entre os dois períodos, (Figuras 19 a 23).

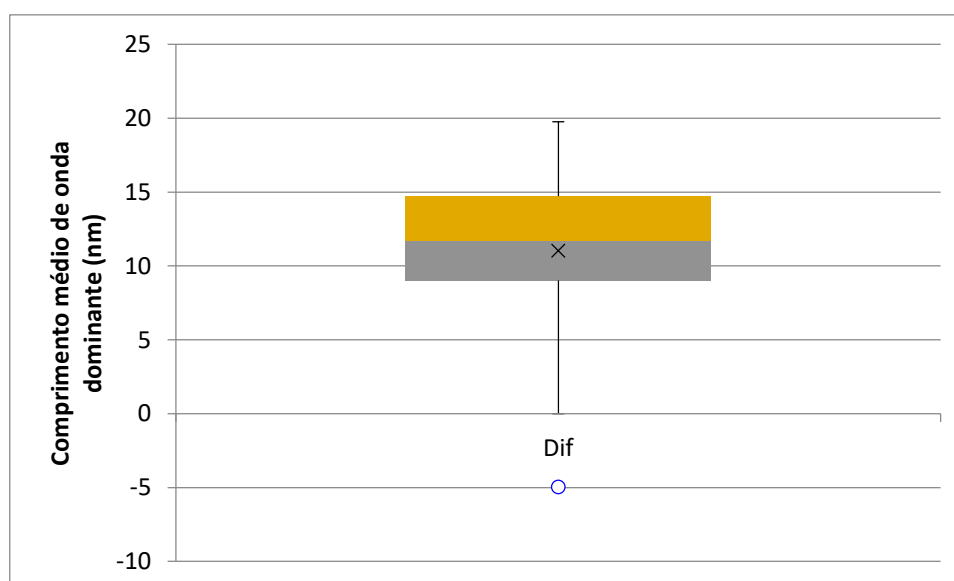


Figura 18 - Gráfico dos valores médios da diferença entre as subséries do Canumã.

Conforme os testes de Shapiro-Wilk (GONZÁLEZ-ESTRADA, 2019; WILKS, 2011) e D'Agostino-Pearson (D'AGOSTINO; BELANGER; D'AGOSTINO JR, 1990), as séries das bacia do Canumã não possui características de normalidade, com um valor p menor que  $\alpha: 0,05$ , sendo indicado um teste não paramétrico. A bacia do Ji-Paraná apresentou valores de p maiores que  $\alpha: 0,05$ , admitindo-se a normalidade, sendo um teste paramétrico como mais adequado. Para a bacia do Amaná, a série apresentou um valor p menores que  $\alpha: 0,05$ , sendo mais indicado um teste não paramétrico (SALAS, 1993; WILKS, 2011).

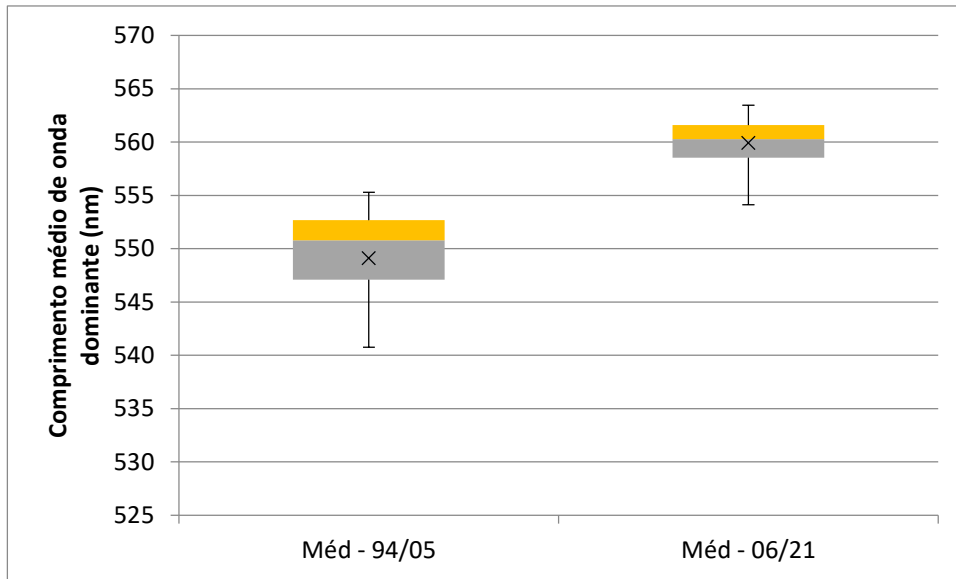


Figura 19 - Gráfico dos valores médios para as duas subséries do Ji-Paraná.

Para as bacias do Rio Canumã e Amaná, foram analisadas duas subséries vinculadas, porém não correspondendo a normalidade, desta forma foi realizado o teste de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1948). Para a bacia do Rio Ji-Paraná foi considerada análise para duas subséries vinculadas, consideradas normais. Desta forma foi utilizado o teste paramétrico Teste t Student (SALAS, 1993).

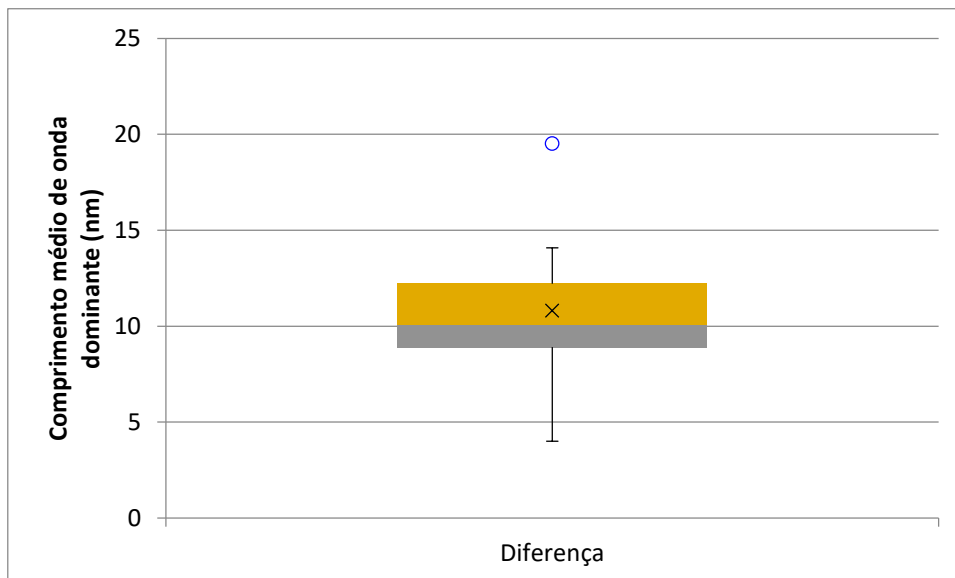


Figura 20 - Gráfico dos valores médios da diferença entre as subséries do Ji-Paraná.

Os dados obtidos em valores médios para as séries são bastante consistentes, apresentando poucos *outliers* nas séries (Figuras 19, 21 e 23), e apenas um em cada subsérie, quando se analisa a diferença entre os períodos de 1996/2005 e 2006/2021 (Figuras 20 e 22), sendo possível a utilização dos testes t e Mann-Kendall, e da ferramenta *Real Statistics* (ZAIONTZ, 2023).

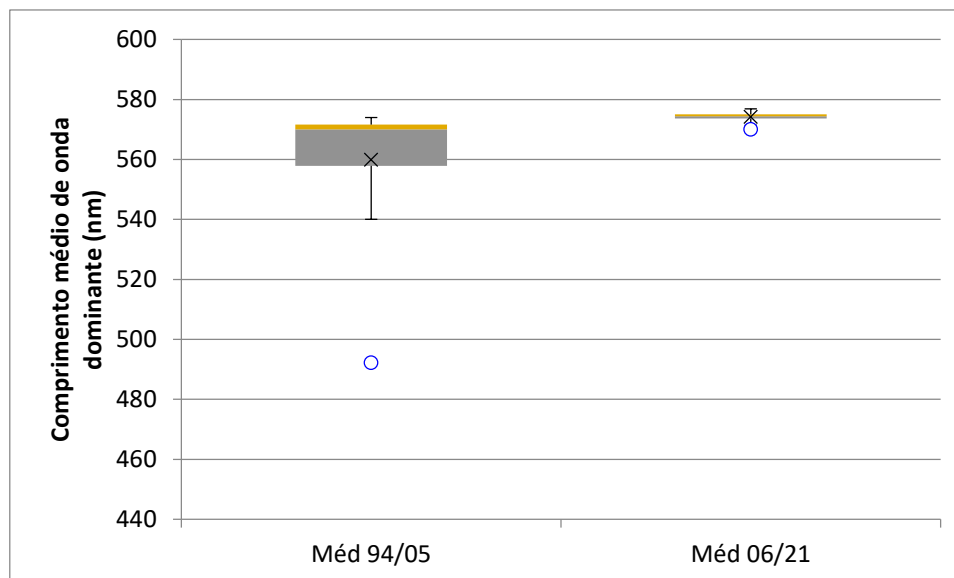


Figura 21 - Gráfico dos valores médios da diferença entre as sub-séries do Amaná.

Na sub-bacia do Canumã o teste não paramétrico de Mann-Kendall, demonstrou que o valor de  $p$ : 0,0002 é menor que o nível de significância adotado de  $\alpha$ : 0,05, indicando que a diferença entre as duas sub-séries é significativa. Com tendência de valores médios menores no período de 2006/2021 que no anterior de 1994/2005 (Figura, 19) (MANN, 1945; KENDALL, 1948).

Para a sub-bacia do Ji-Paraná, o teste  $t$  demonstrou que existe diferença significativa entre os dois períodos analisados, nas sub-séries de 1994/2005 e 2006/2021, onde o valor de  $p$ : 0,000036 é menor que o nível de significância adotado de  $\alpha$ : 0,05. Na bacia do Ji-Paraná a sub-série de 2006/2021 apresentou valores médios maiores que o período anterior (Figura, 19) (SALAS, 1993; WILKS, 2011). O teste de Mann-Kendall, demonstrou que o valor de  $p$ : 0,003 é menor que o nível de significância adotado de  $\alpha$ : 0,05, indicando que a diferença entre as duas sub-séries é significativa. Observa-se que a diferença é para mais, indicando um ganho de comprimento médio de onda dominante nos trechos da bacia do Ji-Paraná (Figura 21).

Quanto a sub-bacia do Amaná, o teste de Mann-Kendall, demonstrou que o valor de  $p$ : 0,0012 é menor que o nível de significância adotado de  $\alpha$ : 0,05, indicando que a diferença entre as duas sub-séries é significativa. Com tendência de valores médios maiores no período de 2006/2021 que no anterior de 1994/2005 (Figura, 23) (MANN, 1945; KENDALL, 1948).

#### 4.2 Dados de sedimentos *in loco*

Para a bacia do Rio Ji-Paraná, foram extraídos dados de material em suspensão da estação ANA n.º 15560000, localizada no município de Ji-Paraná (Figura 24).

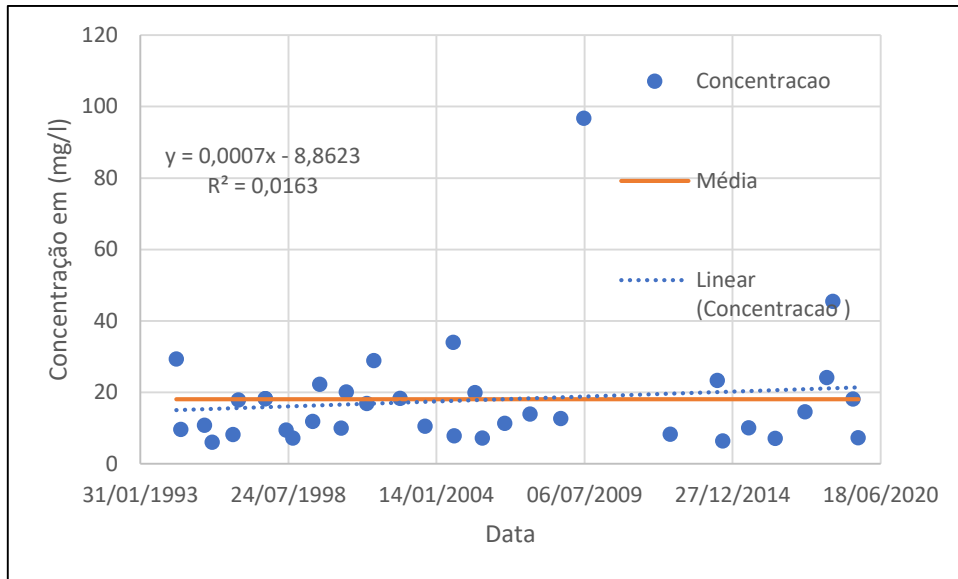


Figura 22 – Série histórica de sedimentos, estação (15560000).

Quadro 4 – Resumo estatístico do material em suspensão em (mg/l).

Bacia	Max	Méd.	Min	Des. P.
Ji-Paraná	96.71	18.08	5.95	16.04

Após uma primeira análise com o *Real Statistis* (ZAIONTZ, 2023) foram verificadas as características da série quanto à normalidade (Figura, 25). A série apresentou uma média 18,08 mg/l de material em suspensão, com um máximo de 96,71, e um mínimo de 5,95 mg/l (Quadro 4).

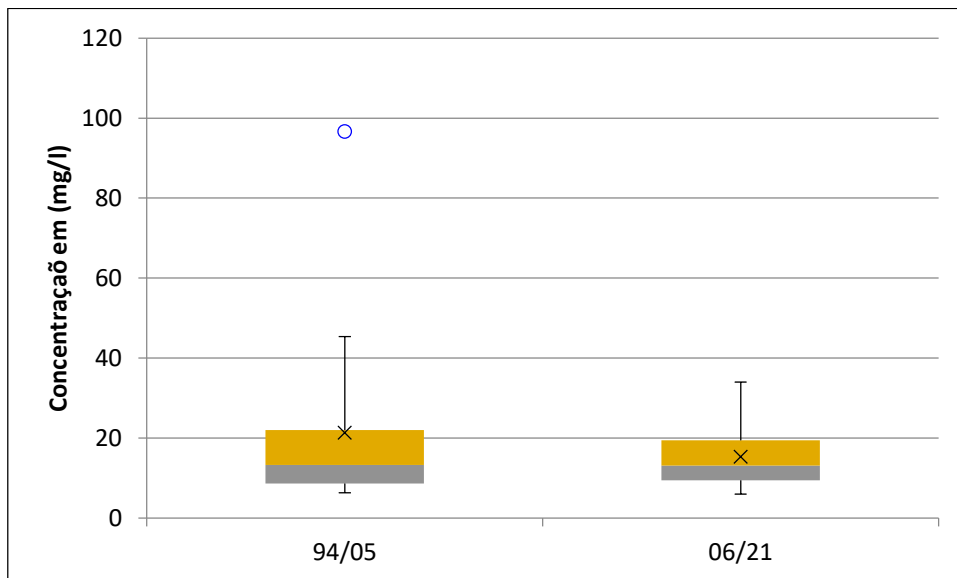


Figura 23 – Valores médios observados de material em suspensão.

Estatisticamente a série não atendeu aos critérios de normalidade (SALAS, 1993), com os testes de Shapiro-Wilk (GONZÁLEZ-ESTRADA, 2019; WILKS, 2011) e D'Agostino-Pearson (D'AGOSTINO; BELANGER; D'AGOSTINO JR, 1990), sendo mais indicado um



teste não paramétrico (CAMPOS, 2000), sendo utilizado o de Mann-Kendall. Para o teste Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1948), após a análise das medianas, este resultou na não significância das variações entre 1994 e 2021, ou variação entre as subséries de 1994/2005 e 2006/2021, onde o valor p: 0,58 é maior que o nível de significância  $\alpha$ : 0,05. Para o teste t, o resultado de p: 0,28, maior que  $\alpha$ : 0,05, indicou a não significância das variações, quanto aos dados de sedimentos.

### 4.3 Bare Soil Index - BSI

Após o processamento das imagens de satélite, foram obtidos dados de solo exposto (NDSI e BSI), e outras informações por meio da matemática de bandas espectrais. Separando o solo nu de outras características da cobertura da terra, principalmente diferenciação entre solo descoberto e áreas de floresta (LI; CHEN, 2014; NGUYEN et al., 2021).

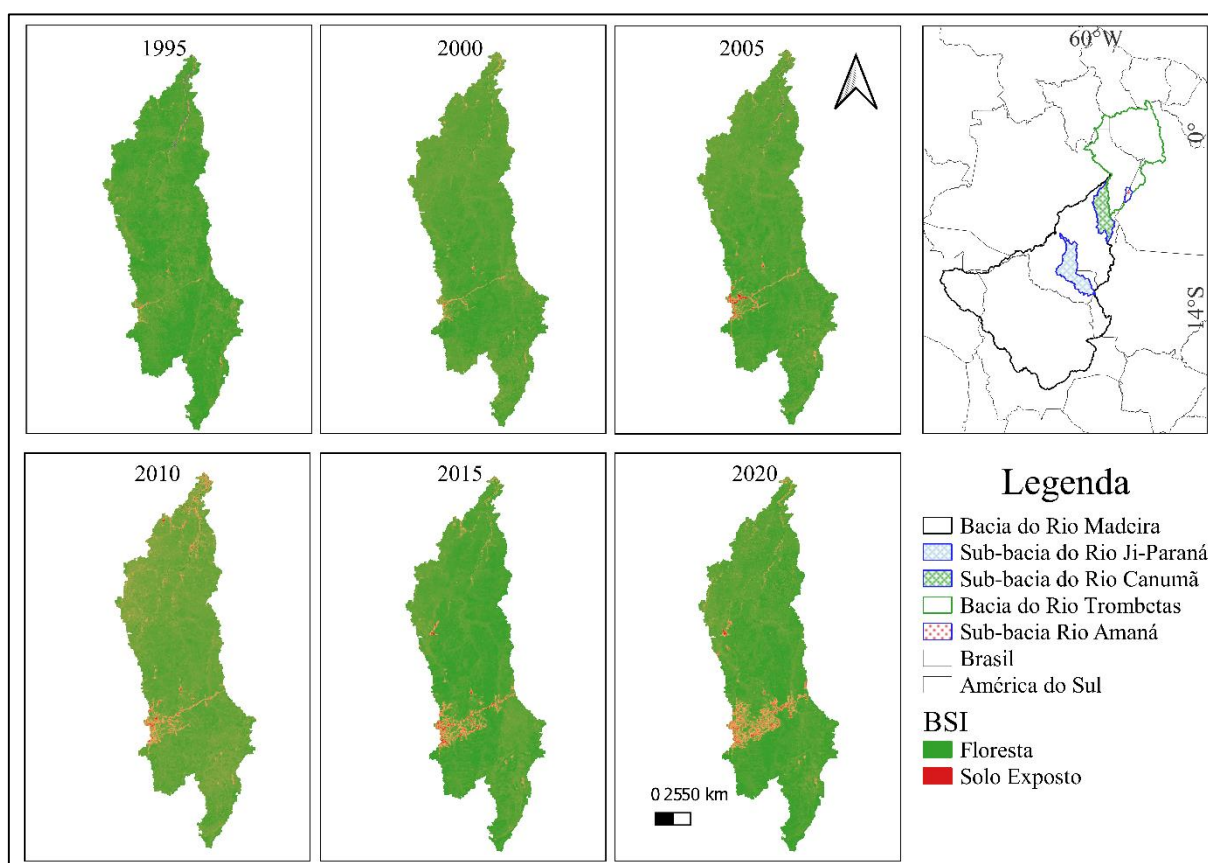


Figura 24 - Índice BSI para a bacia do Rio Canumã.

Como demonstrado na figura 26 as áreas de valores médios de BSI variaram na bacia do Canumã, em 1995 a área ocupada ainda era pouco significativa, com grande parte da bacia em bom estado de preservação. Em 2005 observa-se um início das atividades antrópicas, que tem crescido na região centro-sul da bacia.

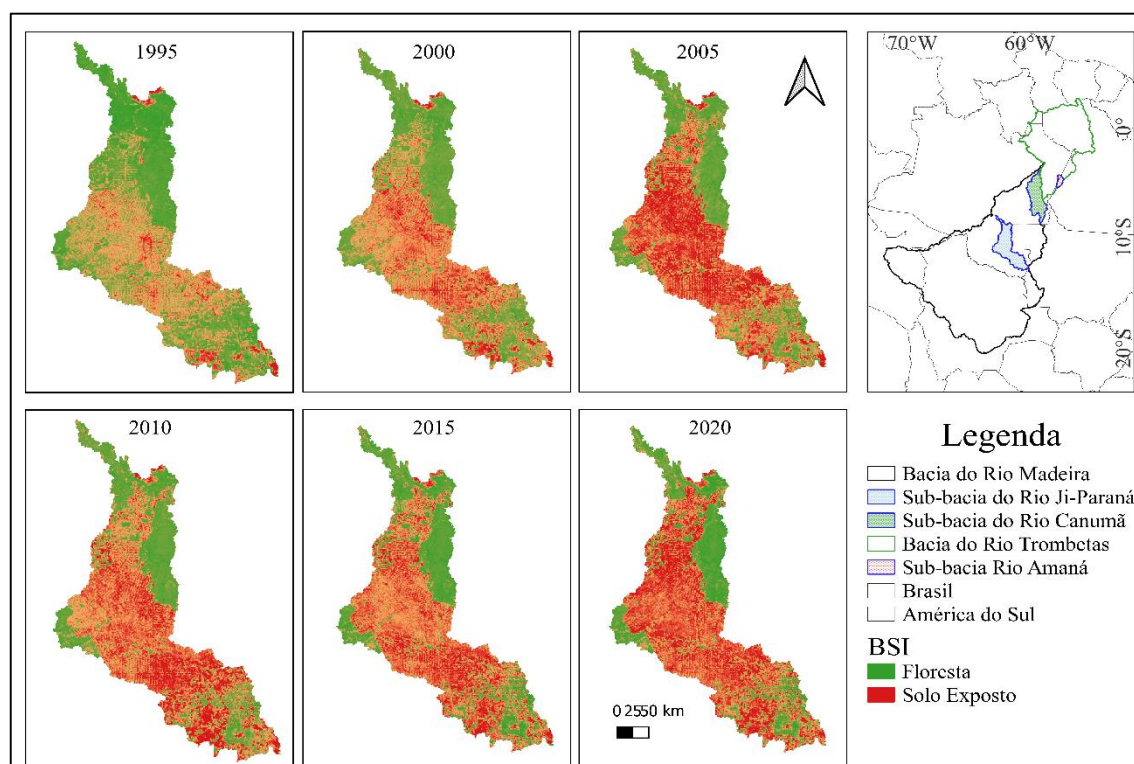


Figura 25 - Índice BSI para a bacia do Rio Ji-Paraná.

Na bacia do Ji-Paraná, observam-se alterações entre 1995 e 2021, demonstrando uma região atualmente bastante antropizada, com ocupação e áreas de solo expostos bem significativas desde o início dos anos 2000 (Figura 27). A bacia do Ji-Paraná encontra-se bastante antropizada, altamente afetada pela ocupação rondoniense, implantada entre nos anos de 1960 e 1980, intensificada nas últimas décadas com a consolidação das atividades econômicas na região (RONDÔNIA, 2018).

Na bacia do Amaná (Figura, 28), a preservação de suas florestas se mantém, com pouca ou nenhuma presença de atividade mais extensiva como a pecuária e a agricultura. De 2015 a 2020 é possível observar supressão das florestas no entorno dos seus igarapés, como apresentado na Figura 12.

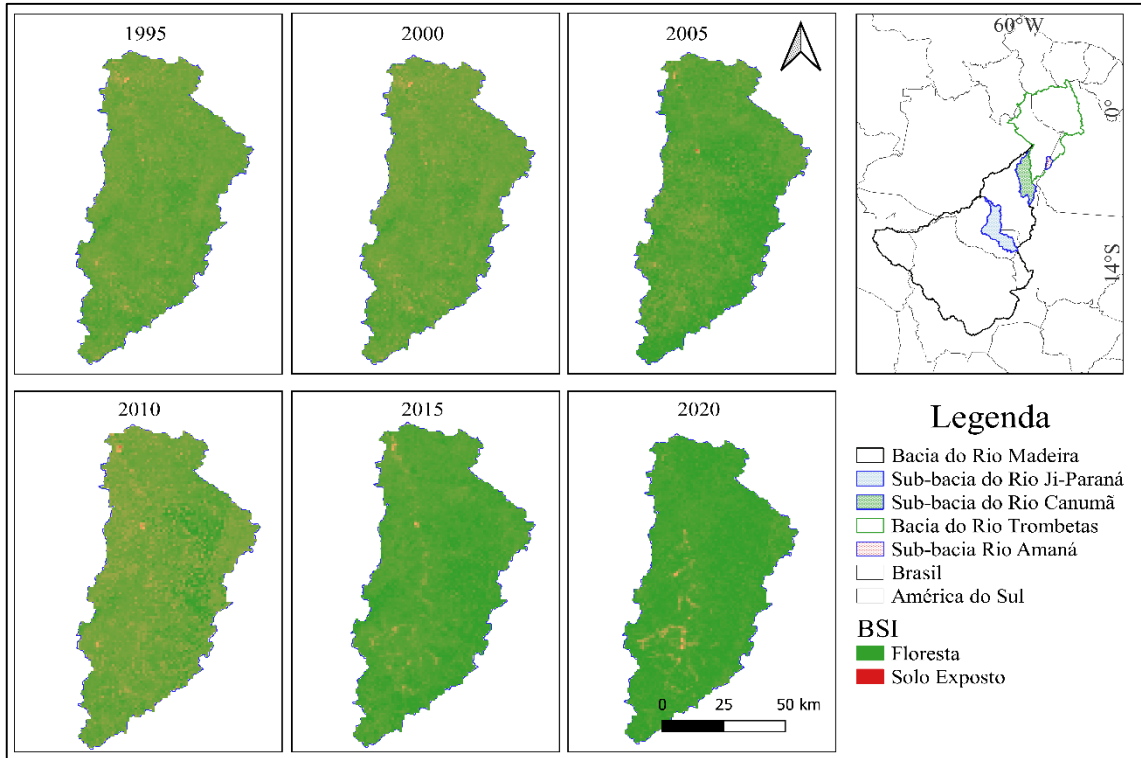


Figura 26 - Índice BSI para a bacia do Rio Amaná.

Os dados para cálculo do BSI, as bandas NIR, SWIR1 e SWIR2, podem ser afetadas por condições do solo e cobertura (NGUYEN et al., 2021), para contornar a sazonalidade foram utilizados valores médios anuais, devido ao tamanho da área dos trechos analisados, características dos perímetros urbanos como as ruas e telhados são pouco significativos, assim como a altura da vegetação no entorno pouco representativa para a escala utilizada (LI; CHEN, 2014).

As condições de solo exposto, podem afetar as características dos corpos hídricos. Onde solos expostos permitem um maior transporte de sedimentos, principalmente em períodos chuvosos, sendo pouco significativas em períodos secos. Ao contrário, as atividades mineradoras se intensificam em períodos de seca, favorecendo o lançamento de material inorgânicos nas águas (ABE, et al., 2019).

#### 4.4 Análise das alterações de cor da água

Três séries de cor foram obtidas entre 1994 e 2021, uma para cada sub-bacia estudada, para a escala de cor FU. Variando do azul FU1 para as águas transparentes e com poucos sedimentos, para o vermelho FU21 representando as águas mais avermelhadas com maior presença de sedimentos (WANG et. al., 2014; GARDNER et. al., 2021).

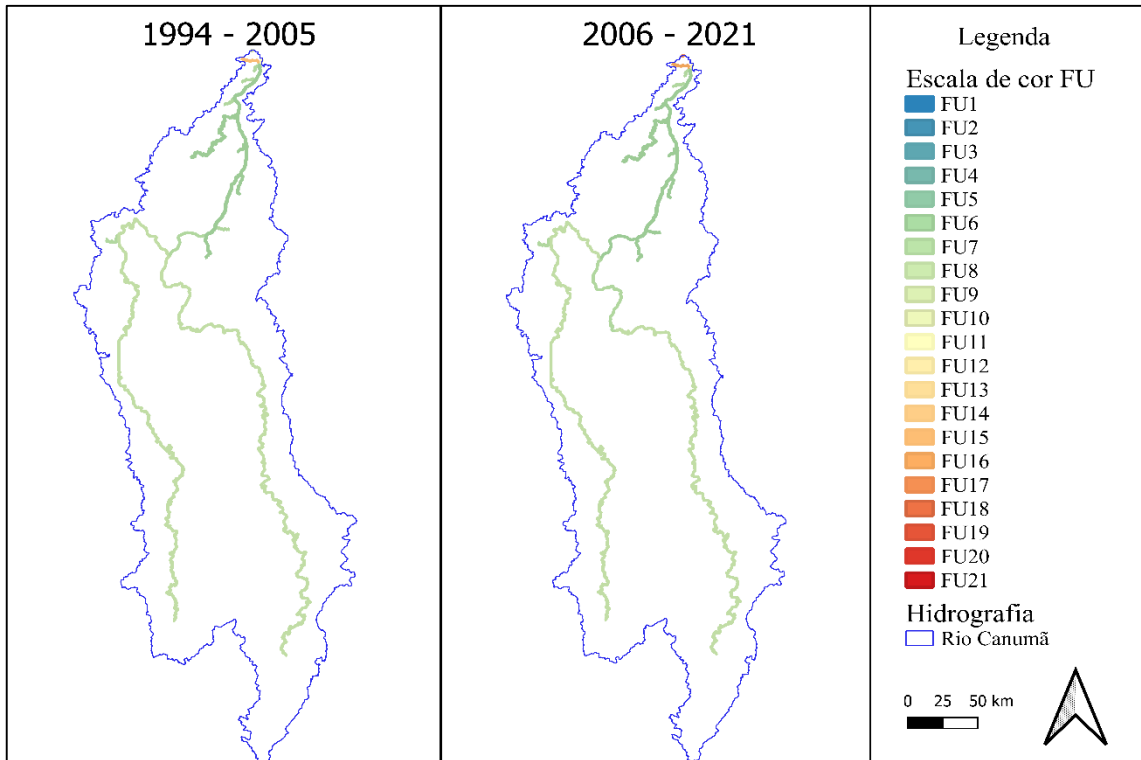


Figura 27 - Escala de cor para a bacia do Rio Canumã.

A sub-bacia do Canumã (Figura, 29), apresentou em seus 27 trechos maiores que 30 metros de largura, valores médios menores no período entre 2006/2021, do que no período entre 1994/2005 (Quadro 5). Considerando as escalas de cor FU, o período inicial possuía 9 classes variando entre FU6 à FU15, enquanto que no intervalo final variou entre a FU6 e a FU17 com 11 classes.

Considerando a figura 29 observam-se poucas diferenças na escala de cores (WERNAND, 2011; WANG et al., 2014; GARDNER et al., 2021). Com exceção do último trecho no extremo norte da bacia, com uma cor mais avermelhada com FU17, próximo à foz com o Rio Madeira, fenômeno comum em afluentes de Rios de elevada turbidez como o Amazonas e Madeira (DINIZ, et al., 2022).

Quadro 5 – Resumo de comprimentos de ondas observados na bacia do Canumã.

Ano	Trechos	Max	Méd.	Min	Des. P.	FU
<b>94-05</b>	27	572	523	506	19	6-15
<b>06-21</b>	27	574	519	499	23	6-17

A sub-bacia do Ji-Paraná apresentou em seus 11 trechos maiores que 30 metros de largura, valores médios, máximo e mínimos, maiores no período entre 2006/2021 que no período entre 1994/2005. Considerando as escalas de cor FU o período inicial possuía 2 classes

variando entre FU8 à FU9, enquanto que no intervalo final variou entre a FU8 e a FU10 com 03 classes, (quadro 06).

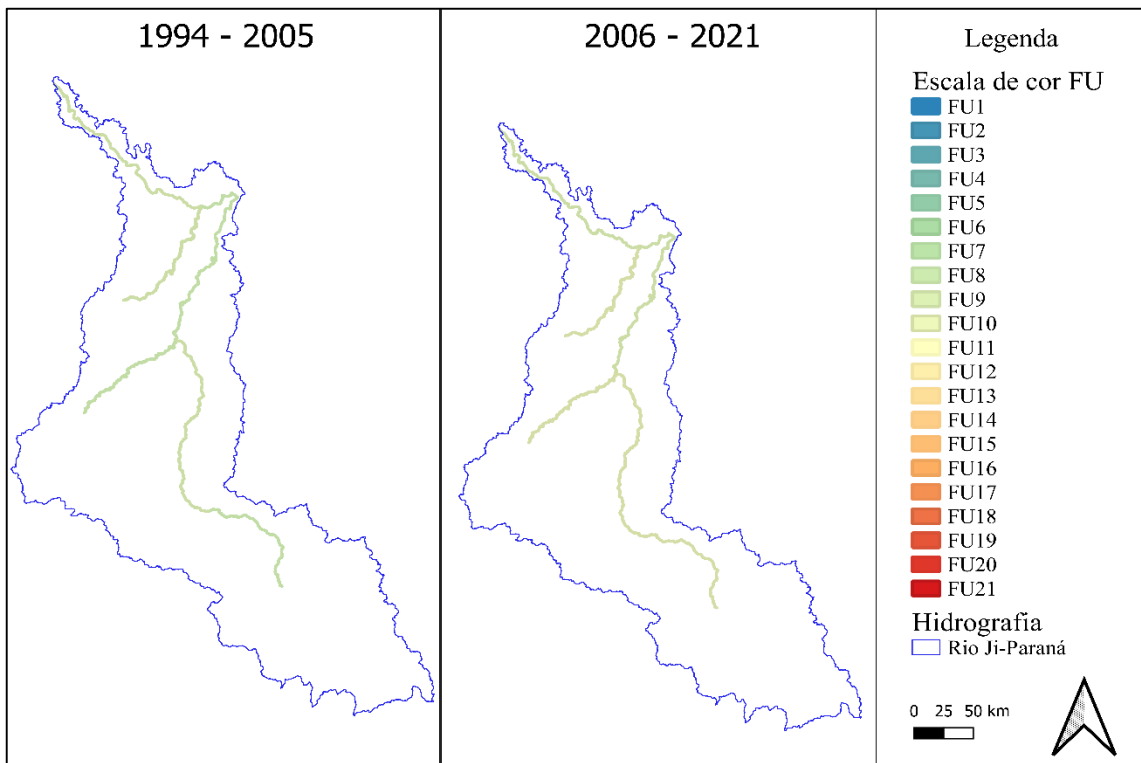


Figura 28 - Escala de cor para a bacia do Rio Ji-Paraná.

Considerando a figura 30 observam-se poucas diferenças na escala de cores, onde no período 2006/2021 o verde tende para um tom mais amarelado, devido à variação das escalas médias de FU9 para FU10 (WERNAND, 2011; WANG et al., 2014; GARDNER et al., 2021).

Quadro 6 – Resumo estatístico dos comprimentos de ondas observados, Ji-Paraná.

Ano	Trechos	Max	Méd.	Min	Des. P.	FU
<b>94-05</b>	11	555	549	541	5	8-9
<b>06-21</b>	11	563	560	554	3	8-10

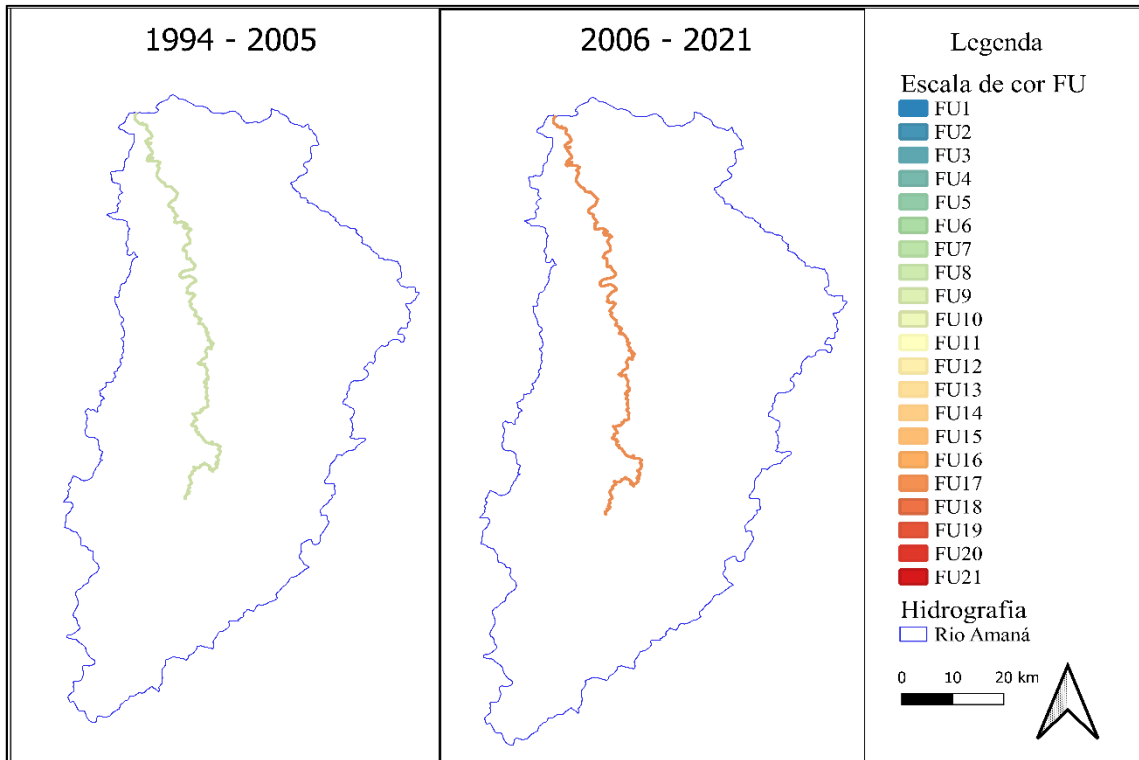


Figura 29 - Escala de cor para a bacia do Rio Amaná.

Na sub-bacia do Amaná, os resultados obtidos apresentam valores médios maiores no período entre 2006/2021. Quanto a escala FU, no período anterior a escala apresentada era FU 10, enquanto que no período mais recente o trecho é representado pela escala FU 17, indo de uma média de 560 nm, para 574 nm, nos períodos entre 94/05 e 06/21 respectivamente (Quadro, 7).

Quadro 7 – Resumo estatístico dos comprimentos de ondas observados, Amaná.

Ano	Trechos	Max	Méd.	Min	Des. P.	FU
<b>94-05</b>	1	574	560	492	24	10
<b>06-21</b>	1	577	574	570	2	17

Quanto as cores, (Figura, 31), o trecho analisado, variou da cor verde amarelado, para um vermelho, compatível com águas com uma considerável presença de sedimentos (WERNAND, 2011; WANG et al., 2014; GARDNER et al., 2021).

As características de cor, baseadas em comprimentos médios de onda dominante por trecho observado, demonstraram as condições e as variações de cor no período analisado. Onde as bacias do Ji-Paraná (Figura 30, quadro 6), e Amaná (Figura 31, quadro 7), apresentaram tendências de crescimento no comprimento médio e conseqüentemente na escala de cor FU de FU8 para FU10, e de FU10 para FU17, respectivamente. Na bacia do Canumã não ocorreu crescimento dos comprimentos médios de onda (Figura 29, quadro 5). Na bacia do Canumã sua escala FU variou consideravelmente devido ao trecho de sua foz que sofre influência do Rio

Madeira deixando as águas mais barrentas, no restante da bacia ou ocorreu uma perda do comprimento médio, ou um ganho pouco significativo.

A variabilidade da cor da água ao longo de um rio, sugere fatores atuantes tanto dentro do canal, quanto na paisagem influenciando a cor dominante do trecho de Rio. Embora as propriedades climáticas e da paisagem influenciem a gama de cores que um rio pode ter, efeitos dentro do canal, transições rápidas de uso e cobertura do solo, podem redefinir a cor predominante das águas. A fragmentação e as transições de cor ao longo dos rios são importantes porque a cor provavelmente está ligada à função eco antropológicas. Os padrões espaciais observados na cor podem ser indicativos de regimes de produtividade primária, sedimentos suspensos (GARDNER et al., 2021).

O sensoriamento remoto da cor da água pode oferecer novas maneiras de quantificar a sazonalidade dos rios, complementando os esforços focados na medição de processos ecossistêmicos. Com mais validação, a cor do rio pode ser usada como um potencial indicador para processos ecossistêmicos. A cor do rio também pode fornecer uma camada crítica de dados para modelos de distribuição de condições ambientais, como a turbidez (GARDNER et al., 2021).

Os resultados obtidos neste estudo indicam que a cor da água, em termos de comprimento de onda dominante e classe FU, pode ser, até certo ponto, em águas naturais um indicador da qualidade, e também pode ser considerada um produto primário da qualidade da água. Isso também possibilita o monitoramento contínuo de longo prazo de águas opticamente complexas em amplas áreas usando técnicas de sensoriamento remoto (WANG et al., 2014).

## 5 – CONSIDERAÇÕES

De acordo com o tema do trabalho, as alterações na cor da água relacionadas a mineração, e ao objetivo principal de identificar estas alterações em rios da Amazônia sul ocidental, mapeando as evidências das interações e os impactos da mineração na cor da água. Foram elaboradas cartogramas de características de cor e condições de solo exposto. Com a elaboração da série histórica de cor, foi possível analisar estatisticamente, a significância das condições observadas.

Foram demonstradas as alterações nas cores das águas das sub-bacias dos Rios Canumã, Ji-Paraná e Amaná. Onde os trechos analisados apresentaram uma coloração mais amarelada, com mudança na cor da água para tons mais avermelhados nas bacias do Ji-Paraná e Amaná, um indicativo de aumento de material sedimentar. A presença das atividades garimpeiras e mineradoras pelas bacias, mais significativamente no Rio Amaná, indicam uma possível origem destes sedimentos, devido às características destas atividades, e das condições de solo exposto da sub-bacia.

A série histórica criada demonstrou as tendências das médias das três sub-bacias, onde a região do Rio Ji-Paraná e Amaná, apresentaram movimento de crescimento, dos comprimentos médios de ondas observados nos trechos, enquanto que a bacia do Canumã apresentou um decréscimo das médias. O método de cálculo de cor por meio de ângulos e comprimentos médios de onda dominante, permitiu observar as bacias com maiores alterações. Com tendências de crescimento e aumento dos valores médios.

Resultados obtidos por cálculos de BSI, demonstraram as alterações sofridas pelas bacias, onde as regiões de solo exposto foram consolidadas na bacia do Ji-Paraná, e já eram bastante significativas em 1995, com alterações para 2020, seguindo as literaturas consultadas a respeito da consolidação das atividades antrópicas nas últimas décadas, com as atividades mineira e principalmente agropecuárias. Para a bacia do Canumã os dados de BSI apresentaram um início de ocupação na bacia, com um crescimento de 2005 para 2021. Na Bacia do Amaná, a presença antrópica se resume as margens dos igarapés.

O levantamento estatístico corroborou com os dados de cor, material em suspensão, mineração e solo exposto, demonstrando que as alterações são significativas estatisticamente quanto as condições de cor, e que há diferenças entres os períodos e subséries analisadas.

O trabalho demonstrou que as águas das sub-bacias do Rio Madeira e Trombetas vêm sofrendo alterações, principalmente a bacia do Ji-Paraná, área com características antrópicas bastante consolidadas, com grandes áreas de solo exposto, ocupadas por atividades econômicas



como agropecuária, e Amaná com presença de atividades de garimpo, onde as águas de seus afluentes adquiriram maiores comprimentos de onda médios, devido ao ganho de material sedimentar, resultado das suas condições atuais de uso e ocupação.

O uso do sensoriamento remoto mostrou-se como uma ferramenta valiosa para compreensão e tratamento de dados em grandes áreas e com informações escassas. O uso associado de ferramentas locais como Qgis e processamentos em nuvem com o GEE, mostraram-se favoráveis, evitando o *download* de grande volume de dados.

Com sugestão para trabalhos futuros, fica a adaptação dos códigos e rotinas para outras missões de satélites, principalmente aquelas de mais alta resolução, permitindo a observação de corpos hídricos menores, como pequenos igarapés, tornando o rastreamento das influências da mineração mais efetivos. Buscar métodos que automatize os processos de obtenção das imagens, das rotinas de geoprocessamento, permitindo a aplicação em grandes bacias, e/ou em grande número de áreas menores.

## REFERÊNCIAS

- ABE, Camila Andrade et al. Modeling the effects of land cover change on sediment concentrations in a gold-mined Amazonian basin. **Regional Environmental Change**, v. 19, n. 6, p. 1801-1813, 2019.
- ALCÂNTARA, Araquém. National Geographic: Página do fotografo. **Repositório online**. 2019. Disponível em: <https://www.nationalgeographicbrasil.com/fotografo/araquem-alcantara>. Acesso em: 14 de agosto de 2022.
- AMEND, Marcos. Green Peace Media. **Repositório online**. 2020. Disponível em: <https://media.greenpeace.org/CS.aspx?VP3=DamView&VBID=27MDQY6RJPRLV&SMLS=1&RW=1366&RH=617#/DamView&VBID=27MDQY6RJPL2F&PN=1&WS=SearchResults>. Acesso em: 14 de agosto de 2022.
- ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Bacias Hidrográficas Ottocodificadas (Nível 2 e 4)**. Brasília, 2017. Disponível em: <https://dadosabertos.ana.gov.br/datasets/93d6c46c6a4e47fbb5bb281b7cbc8847/explore?location=-15.485141%2C-60.179825%2C4.43>. Acesso em: 05 de maio de 2022.
- ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Hidroweb**. Online. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb>. Acesso em 01 de fevereiro de 2024.
- ANM, Agência Nacional de Mineração. **Permissão de Lavra Garimpeira**. Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/exploracao-mineral/regimes-de-exploracao-mineral/permissoao-de-lavra-garimpeira>. Acesso em: 10 de maio de 2022a.
- ANM, Agência Nacional de Mineração. **Sistema de Informações Geográficas da Mineração – SIGMINE**. Brasília, 2022. Disponível em: [app.anm.gov.br - /dadosabertos/SIGMINE/](http://app.anm.gov.br/-/dadosabertos/SIGMINE/). Acesso em 12 de maio de 2022b.
- ARIZA, Alexander et al. LANDSLIDE DETECTION IN CENTRAL AMERICA USING THE DIFFERENTIAL BARE SOIL INDEX. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences**, 2021.
- ASSIS, L. F. F. G. et al. **TerraBrasilis: A Spatial Data Analytics Infrastructure for Large-Scale Thematic Mapping**. ISPRS International Journal of Geo-Information. 8, 513, 2019. DOI: 10.3390/ijgi8110513.
- BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M.; MARTINS, V. S. (Ed.). **Introdução ao Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos: princípios e aplicações**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2019.
- BATATA, Chico. Green Peace Media. **Repositório online**. 2021. Disponível em: [https://media.greenpeace.org/CS.aspx?VP3=DamView&VBID=27MDQY6RJHBPT&FR\\_=1&W=1366&H=617](https://media.greenpeace.org/CS.aspx?VP3=DamView&VBID=27MDQY6RJHBPT&FR_=1&W=1366&H=617). Acesso em: 14 de agosto de 2022.
- BRASIL, Poder Executivo. **DECRETO N.º 10.966, de 11 de fevereiro de 2022**: Institui o Programa de Apoio ao Desenvolvimento da Mineração Artesanal e em Pequena Escala e a Comissão Interministerial para o Desenvolvimento da Mineração Artesanal e em

Pequena Escala. Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.966-de-11-de-fevereiro-de-2022-379739340>. Acesso em: 04 de março de 2022.

BRASIL, Poder Executivo. **Decreto nº 9.408/2018**: Regulamenta a Lei nº 12.651/2012, que dispõe sobre a Política Nacional de Mineração. Brasília, 2018.

BRASIL, Poder Legislativo. **PL 191 de 2020**. Brasília, 2020. Disponível em: [https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop\\_mostrarintegra;jsessionid=node0k1663kvp0ihx1aq45ub39iw3148897398.node0?codteor=1855498&filename=PL+191/2020](https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra;jsessionid=node0k1663kvp0ihx1aq45ub39iw3148897398.node0?codteor=1855498&filename=PL+191/2020). Acesso em: 04 de março de 2022.

BRASIL, Poder Legislativo. **Lei nº 7.805/1989**: Cria o regime de permissão de lavra garimpeira e dispõe sobre outras medidas. Brasília, 1989.

BRASIL, Poder Legislativo. **Lei nº 11.685/2008**: Estatuto do Garimpeiro, que regulamenta a atividade garimpeira no Brasil. Brasília, 2008.

CAMPOS, Alicelene Leonídia. **Benefícios socioeconômicos advindos da mineração: Estudo de caso do município de Araxá-MG e região**. 2017. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas). Centro Federal De Educação Tecnológica De Minas Gerais. Unidade Araxá. Araxá – MG, 2017

CAMPOS, Geraldo M. **Estatística Prática para Docentes e Pós-Graduandos: A escolha do teste mais adequado**. *Online*. São Paulo, 2000. Disponível em: [https://www.forp.usp.br/restauradora/gmc/gmc\\_livro/gmc\\_livro\\_cap14.html](https://www.forp.usp.br/restauradora/gmc/gmc_livro/gmc_livro_cap14.html). Acesso em: 15 de agosto de 2023.

CHECCHIA, Tatiane Emílio. **Monitoramento Hídrico do Distrito e garimpo do Bom Futuro**. Arquivo pessoal. 2022. Acesso em: 15 de agosto de 2022.

D'AGOSTINO, Ralph B.; BELANGER, Albert; D'AGOSTINO JR, Ralph B. A suggestion for using powerful and informative tests of normality. **American Statistician**, p. 316-321, 1990.

DE CARVALHO NASSER, Fábio et al. Mapping deactivated mine areas in the amazon forest impacted by seasonal flooding: Assessing soil-hydrological processes and quality dynamics by remote sensing techniques. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, p. 101148, 2024.

DINIZ, C. et al. Nota Técnica sobre os sedimentos em Suspensão na Bacia do Tapajós. **MAPBIOMAS**, n.º 06. 2022. Disponível em: [https://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/Nota%20Técnica/Nota\\_Técnica\\_-\\_Sedimentos\\_Rio\\_Tapajós-5.pdf](https://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/Nota%20Técnica/Nota_Técnica_-_Sedimentos_Rio_Tapajós-5.pdf). Acesso em: 17 de abril de 2022.

ENRÍQUEZ, Maria Amélia. Mineração na Amazônia. **Parcerias Estratégicas**, v. 19, n. 38, p. 155-198, 2015.

ESPINOZA-VILLAR, Raul et al. Spatio-temporal monitoring of suspended sediments in the Solimões River (2000–2014). **Comptes Rendus Geoscience**, v. 350, n. 1-2, p. 4-12, 2018.

- FAGUNDES, Hugo de Oliveira et al. Sediment flows in South America supported by daily hydrologic-hydrodynamic modeling. **Water Resources Research**, v. 57, n. 2, p. e2020WR027884, 2021.
- FASSONI-ANDRADE, Alice César et al. Amazon hydrology from space: scientific advances and future challenges. **Reviews of Geophysics**, v. 59, n. 4, p. e2020RG000728, 2021.
- FONTOURA, Jéssica Ribeiro; PAIVA, Rodrigo Cauduro Dias de. Dinâmica da qualidade da água de rios brasileiros a partir da determinação da cor da água por imagens de satélite. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (24.: 2021: Belo Horizonte). Anais [recurso eletrônico]. Porto Alegre: ABRHidro**, 2021.
- GARDNER, John R. et al. The color of rivers. **Geophysical Research Letters**, v. 48, n. 1, p. e2020GL088946, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020GL088946>.
- GONZÁLEZ-ESTRADA, Elizabeth; COSMES, Waldenia. Shapiro–Wilk test for skew normal distributions based on data transformations. **Journal of Statistical Computation and Simulation**, v. 89, n. 17, p. 3258-3272, 2019.
- GOOGLE. Google Earth Engine. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://earthengine.google.com/>. Acesso em: 3 de janeiro de 2024.
- KELLY, Bruno. O avanço do garimpo: Dragas e empurradores chegam a nova área de exploração no Rio Madeira. **Greenpeace Brasil**. Disponível em: <https://www.greenpeace.org/brasil/blog/o-avanco-do-garimpo-dragas-e-empurradores-chegam-a-nova-area-de-exploracao-no-rio-madeira/>. Acesso em: 15 agosto de 2022.
- KENDALL, Maurice George. Rank correlation methods. 1948.
- LI, Sufen; CHEN, X. A NEW BARE-SOIL INDEX FOR RAPID MAPPING DEVELOPING AREAS USING LANDSAT 8 DATA. **ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences**, v. 2, n. 4, 2014.
- LIU, Ying et al. NDBSI: A normalized difference bare soil index for remote sensing to improve bare soil mapping accuracy in urban and rural areas. **CATENA**, v. 214, p. 106265, 2022.
- LOBO, Felipe de Lucia et al. Effects of small-scale gold mining tailings on the underwater light field in the Tapajós river basin, Brazilian amazon. **Remote Sensing**, v. 9, n. 8, p. 861, 2017.
- LOBO, Felipe de Lúcia et al. Reference spectra to classify Amazon water types. **International Journal of Remote Sensing**, v. 33, n. 11, p. 3422-3442, 2012.
- LOBO, F. L.; COSTA, M. P.F.; NOVO, M. L. M. Time-series analysis of Landsat-MSS/TM/OLI images over Amazonian waters impacted by gold mining activities. **Remote Sensing of Environment**, V. 157, 2015, p. 170-184, ISSN 0034-4257.
- MA, Hai-Rong et al. Automatic identification of shallow landslides based on Worldview2 remote sensing images. **Journal of applied remote sensing**, v. 10, n. 1, p. 016008, 2016.

- MANN, Henry B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica: Journal of the econometric society**, p. 245-259, 1945.
- MILANEZ, Bruno. Mineração, ambiente e sociedade: impactos complexos e simplificação da legislação. **Boletim regional, urbano e ambiental (IPEA)**, v. 16, p. 93-101, 2017.
- MONTANHER, Otávio Cristiano; NOVO, Evlyn Márcia Leão de Moraes; SOUZA FILHO, Edvard Elias de. Tendência temporal do transporte de sedimentos em suspensão do rio Amazonas (1984-2016). **Revista de Ciências Hidrológicas**, v. 63, n. 13-14, pág. 1901-1912, 2018.
- NGUYEN, Can Trong et al. A modified bare soil index to identify bare land features during agricultural fallow-period in southeast Asia using Landsat 8. **Land**, v. 10, n. 3, p. 231, 2021.
- PIYOOSH, Atul Kant; GHOSH, Sanjay Kumar. Development of a modified bare soil and urban index for Landsat 8 satellite data. **Geocarto International**, v. 33, n. 4, p. 423-442, 2018.
- PORTELLA, Márcio Oliveira. Efeitos colaterais da mineração no meio ambiente. **Revista Brasileira de políticas públicas**, v. 5, n. 3, 2015.
- Rondônia (Estado). Secretaria de Meio Ambiente. **Plano Estadual de Recursos Hídricos – Relatório Final**. RHA Engenharia e Consultoria: Curitiba, 2018.
- RUDORFF, Natalia et al. Monitoramento de sensoriamento remoto do impacto de um grande desastre de efluentes de mineração na turbidez da pluma do Rio Doce na costa leste brasileira. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 145, p. 349-361, 2018.
- SALAS, Jose D. Analysis and Modeling of Hydrologic Time Series. *In*: MAIDMENT, David R. Handbook of Hydrology. McGraw-Hill: New York, 1993.
- Souza et al. (2020) – *Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine* – Remote Sensing, Volume 12, Issue 17, 10.3390/rs12172735
- VILLAR, Raúl Espinoza et al. The integration of field measurements and satellite observations to determine river solid loads in poorly monitored basins. **Journal of hydrology**, v. 444, p. 221-228, 2012.
- VINCENT, Helena Davino; VASCONI, Maria Clara Mendes. Mineração na América Do Sul Neoeextrativismo e Lutas Territoriais (2016). **Interfaces-Revista de Extensão da UFMG, Minas Gerais**, v. 5, n. 2, p. 66-76, 2017.
- WANG, Shenglei et al. MODIS-based radiometric color extraction and classification of inland water with the Forel-Ule scale: a case study of Lake Taihu. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 8, n. 2, p. 907-918, 2014.

- WERNAND, Marcel Robert. Poseidon's paintbox: historical archives of ocean colour in global-change perspective. **Ph. D. Thesis**, 2011.
- WERNAND, M. R.; VAN DER WOERD, H. J. Spectral analysis of the Forel-Ule Ocean colour comparator scale. **Journal of the European Optical Society-Rapid Publications**, v. 5, 2010.
- WERNAND, M. R.; HOMMERSOM, Annelies; VAN DER WOERD, Hendrik Jan. MERIS-based ocean colour classification with the discrete Forel-Ule scale. **Ocean Science**, v. 9, n. 3, p. 477-487, 2013.
- WILCOXON, Frank. Some uses of statistics in plant pathology. **Biometrics Bulletin**, v. 1, n. 4, p. 41-45, 1945.
- WILKS, Daniel S. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Academic press, 2011.
- SIQUEIRA-GAY, J., METZGER, J.P., SÁNCHEZ, L.E. *et al.* Strategic planning to mitigate mining impacts on protected areas in the Brazilian Amazon. **Nat Sustain** 5, 853–860 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00921-9>.
- ZAIONTZ, C. *Real Statistics Using Excel*. 2023, *online*. Disponível em: <https://real-statistics.com>. Acesso em: 01 agosto de 2023.