

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

SUMIRÊ DA SILVA HINATA

**Avaliação e mapeamento de serviços ecossistêmicos na
bacia hidrográfica do Lago Guaíba/RS**

PORTO ALEGRE

2023

SUMIRÊ DA SILVA HINATA

**Avaliação e mapeamento de serviços ecossistêmicos na
bacia hidrográfica do Lago Guaíba/RS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia como requisito para obtenção do título de Doutorado. Área de Concentração: Análise Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Luís Alberto Basso

PORTO ALEGRE

2023

CIP - Catalogação na Publicação

Hinata, Sumirê da Silva
Avaliação e mapeamento de serviços ecossistêmicos
na bacia hidrográfica do Lago Guaíba/RS / Sumirê da
Silva Hinata. -- 2023.
175 f.
Orientador: Luís Alberto Basso.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de
Pós-Graduação em Geografia, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. Serviços ecossistêmicos. 2. Uso e cobertura da
terra. 3. Pagamento por Serviços Ambientais (PSA). 4.
Mapbiomas. 5. Dinâmica EGO. I. Basso, Luís Alberto,
orient. II. Título.

SUMIRÊ DA SILVA HINATA

AVALIAÇÃO E MAPEAMENTO DE SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO LAGO GUAÍBA/RS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia como requisito para obtenção do título de Doutorado. Área de Concentração: Análise Ambiental.

Porto Alegre, 26 de junho de 2023.

Avaliação: Aprovado com louvor.

BANCA EXAMINADORA:

Orientador: Prof. Dr. Luís Alberto Basso
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Dra. Elaine Aparecida Rodrigues
Instituto Florestal do Estado de São Paulo

Prof. Dr. José Gomes dos Santos
Universidade de Coimbra

Prof^a. Dr^a. Nina Simone Vilaverde Moura
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Prof^a. Dr^a. Teresinha Guerra
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa vem acompanhada de meu agradecimento principal à Geografia e a todo o seu significado na minha trajetória profissional e pessoal. Aqui finalizo parte de mais um ciclo nesta Universidade, cumprido com respeito, ética e dedicação. Escolher este curso foi uma decisão assertiva e afortunada, pois também fui escolhida e acolhida pela Geografia!

Agradeço primeiramente ao meu orientador, Professor Dr. Luís Alberto Basso, que desde o mestrado vem acreditando nas minhas propostas e apoiando minhas ideias, incentivando com leituras, corrigindo metodologias, grafias e gramática, me mantendo com os 'pés no chão', sempre com respeito, sabedoria, conhecimento científico, objetividade e acolhimento precisos. Obrigada pelas disciplinas de Recursos Hídricos e Análise Ambiental na graduação, elas são fundamentais para formação do geógrafo! Feliz do estudante que tem a oportunidade de frequentá-las, elas são um ponto de referência na Universidade e tem um valor inestimável não só para bacharéis, mas para licenciados que estão atentos às questões ambientais!

Agradeço à amiga Aida Sanae Sato, que em um tempo pretérito e espaço longínquo me mostrou com seu exemplo que estudar é sempre a melhor escolha, e me fez retomar meu caminho para este percurso. Neste fechamento de ciclo, novamente se fez presente, me apresentando o trabalho tão essencial realizado pela Dra. Elaine Rodrigues, que gentilmente aceitou compor a banca para minha defesa.

Agradeço também a todas as sugestões da amiga, na época estudante, e hoje com muito orgulho professora nesta Universidade, Prof^a. Dra. Kátia Kellem da Rosa, que apontou as inúmeras possibilidades da Geografia e apoiou em muitos momentos minha escolha e continuidade neste curso.

Agradeço imensamente aos Professores Dr. José Gomes dos Santos e Dr. Lúcio Cunha do Departamento de Geografia e Turismo da Universidade de Coimbra, pela recepção e prestatividade com esta brasileira que caiu de paraquedas pedindo 'pouso' (ainda irei visitá-los!).

Agradeço ao melhor grupo de amigos geógrafos (É a Elizabeth), seguimos juntos desde o início da graduação em 2005, sempre com respeito, alegria e generosidade. Sobrevivemos a dias difíceis de isolamento, contando com momentos de 'companhia virtual', fundamentais para a manutenção de nossa saúde mental e espiritual. Obrigada pela amizade de vocês: Arthur Bloise, Andreia Hilgert, Guilherme Guerizoli, Karen Joaquim Amorim, Leonardo Paixão, Marcelo Nunes, Rodrigo Rodrigues, Thays Gonçalves e Tulio Watanabe. Obrigada Rodrigo Wienskowski Araújo, pelo encorajamento a participar do processo seletivo do doutorado, e por tantas vezes que dispôs de seu tempo para tirar minhas dúvidas e alegrar o dia. Obrigada ao amigo (e agora primo) Cristiano Machado D'Araújo, que foi para o outro Rio Grande (do Norte) mas está sempre presente. E obrigada ao meu grande amigo e parceiro de tantas horas Guilherme Joaquim, de forma presencial ou remota, cada minuto da tua alma serena foram recebidos com muita felicidade!

Agradeço à amiga geógrafa Isabel Rekowsky - o geoprocessamento se tornou menos misterioso e obscuro graças à tua ajuda! - obrigada pela paciência nas tantas vezes que precisei te incomodar! O processamento das imagens e a elaboração dos mapas desta pesquisa contém parte da tua contribuição. Obrigada ao amigo querido geógrafo Daniel Wiegand, que também tanto me ajudou com o SIG.

Agradeço aos antigos e novos amigos da Divisão de Planejamento do Departamento de Recursos Hídricos da Secretaria de Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul, onde fui acolhida com respeito e generosidade. Nesta nova enseada espero fazer jus ao título de 'servidora' e contribuir para a sociedade com profissionalismo e o conhecimento adquirido ao longo desses anos. Agradecimento especial para as chefias Raíza Cristóvão Schuster, Patrícia Moreira Cardoso e à Secretária Marjorie Kaufmann por acreditar no meu trabalho. Obrigada aos amig@s geógraf@s Luciano Brasileiro Cardone (Chefe), Fernando Comerlato Scottá, Karolina Turcato e especialmente Aline Duarte Kaliski, pelo acolhimento e carinho.

Agradeço às queridas amigas geógrafas Prof^a (quase doutora) Paola Gomes Pereira, nossos caminhos sempre se cruzaram ao longo desses anos geográficos, e Dra. Tanice Cristina Kormann, tua tese foi uma referência para mim nesses últimos meses. A Geografia é formadora de tantas mulheres incríveis, sou muito grata por ter conhecido vocês e continuar compartilhando experiências: Frantiesca Cheiran, Tielle Dias, Mônica Wiggers, Tássia Coser, Márcia dos Santos, Amanda Bahi, Lilian Waquil Ferraro, Rejane Valdameri, Bruna Zapparoli e tantas outras que ainda virão.

Gratidão à professora Cláudia Zefferino pelo acolhimento e sororidade em dias que ficaram para trás, tua presença e atitude pela representatividade do POSGEA foram um exemplo de compromisso e resistência. Obrigada também às professoras Nina Simone Moura e Teresinha Guerra, pelo aceite para compor a banca e parceria ao longo desses anos.

Agradeço à Adriana Alves de Avila e Marcos Italgani da CMPC Guaíba por me acompanhar na vistoria ao Horto Florestal do Lagoão em Guaíba, à época da elaboração do estudo na bacia hidrográfica do arroio Passo Fundo.

Agradeço todos os momentos com minhas amigas de toda a vida Fernanda Webber Drehmer, Renata Webber Drehmer e Patrícia Pessi Hoff, estar com vocês é sempre uma alegria e um porto seguro.

Agradeço à minha mãe Eva da Silva Hinata e meu pai Sauro Hinata (in memoriam) que me conduziram pelo caminho da honestidade e dedicaram todos os seus esforços para me oferecer Educação de qualidade. Aos meus meninos Jones e Francisco, e meus afilhados Antônio e Vicente e afilhada Luna, que a Educação e o Conhecimento estejam sempre presentes em seus caminhos. Quando precisarem, estarei sempre aqui para incentivar e ajudar!

Por último, não menos importante, meu agradecimento infinito a todos os dias de paciência e perseverança capricornianas ao longo desses anos, ao meu companheiro, amigo, parceiro de todas as horas, Alexandre Dimer Figueiredo. Só quem convive durante esses anos de um doutorado sabe o 'perrengue' que é estar junto todos os dias...

Minha gratidão ao Programa de Pós-Graduação desta Universidade, a toda coordenação e corpo docente, ao importante e basilar trabalho dos técnicos e bolsistas da secretaria, em especial na figura do Pedro, sempre gentil e disponível para responder e atender tantas solicitações! Meu agradecimento à UFRGS, por garantir ensino público, gratuito e de qualidade. Que essas portas permaneçam sempre abertas e acessíveis para a qualificação de muitas pessoas. Que o Conhecimento disseminado por esta instituição promova empatia às atuais e futuras gerações, fornecendo bases consistentes para promoção da igualdade e da justiça para toda nossa sociedade. Que haja sempre espaço para novos propósitos e projetos de preservação do meio ambiente e dos ecossistemas, a fim de garantir nosso bem-estar neste Planeta.

*“Há quem passe pelo bosque e só veja lenha para a fogueira.”
Léon Tolstoi*

RESUMO

Os serviços ecossistêmicos (SE) são os benefícios que os seres humanos obtêm da natureza, mas as atividades humanas têm afetado cada vez mais esse fornecimento, especialmente através de alterações no uso e cobertura da terra, que modificam o funcionamento dos ecossistemas. Avaliar e mapear esses serviços constitui em um desafio, fazendo-se necessária a aplicação de abordagens que utilizem indicadores e dados apropriados, bem como ferramentas de sensoriamento remoto e dados de levantamento de uso e cobertura da terra, a fim de avaliar e espacializar sua existência em diferentes escalas espaciais e temporais. Existe uma lacuna de conhecimento sobre a avaliação e mapeamento de SE associado ao uso e cobertura da terra no Brasil, especialmente no bioma Pampa, e particularmente na Bacia Hidrográfica do Lago Guaíba (BHLG) no estado do Rio Grande do Sul. O objetivo dessa pesquisa é analisar as alterações dos serviços ecossistêmicos nessa bacia no tempo e no espaço, através da comparação entre o método de valoração monetária e o de capacidade de fornecimento. A análise das mudanças no uso e ocupação da terra foi realizada com base nos dados do Projeto Mapbiomas, entre os anos 1985 e 2020 e através da modelagem para os cenários tendenciais de 2030 e 2050, com o uso do *software* Dinamica EGO. Os resultados mostraram que a expansão do uso e cobertura da terra associada a atividades agrícolas foi a principal transformação na BHLG até 2020. Classes como Arroz, Soja e Silvicultura avançaram sobre a Formação Campestre e sobre Outras Lavouras Temporárias nos últimos 35 anos, confirmando a predominância do fornecimento imediato de usos economicamente mais lucrativos e vantajosos para alguns setores, à custa de outros usos com SE mais importantes para o bem-estar humano em geral. Os SE foram valorados em US\$ 2.147.051.738,00 em 2020 na bacia, e as classes Formação Florestal, Formação Campestre, Rios e lagos e Campo Alagado e Área Pantanosa forneceram os maiores valores em SE e tiveram a maior pontuação na avaliação da capacidade de fornecimento, evidenciando a importância da manutenção de usos que conservem a cobertura natural. A análise desenvolvida nessa pesquisa pode ser aplicada em novos estudos e servir como subsídio à elaboração de políticas públicas, com intuito de preservar a oferta adequada dos serviços à manutenção da vida humana no planeta, além de ter importante papel para a propagação do conceito de serviços ecossistêmicos.

Palavras-chave: Serviços ecossistêmicos. Uso e cobertura da terra. Pagamento por Serviços Ambientais (PSA). Mapbiomas. Dinamica EGO. Bioma Pampa.

ABSTRACT

Ecosystem services (ES) are the benefits that humans obtain from nature, but human activities affect this supply, especially through changes in land use and land cover, which modify the functioning of ecosystems. This research highlights the need to assess and map these services using appropriate indicators, data, and remote sensing tools, and presents a knowledge gap on the assessment and mapping of ES associated with land use and land cover in Brazil, especially in the Pampa biome, and particularly in the Lago Guaíba Hydrographic Basin (BHLG) in Rio Grande do Sul State. The objective of this research is analyze changes in ecosystem services in this basin in time and space, through the comparison between the monetary valuation method and the supply capacity method. The analysis of changes in land use and occupation was carried out based on data from the Mapbiomas Project, between the years 1985 and 2020 and through modeling for the 2030 and 2050 trend scenarios, using the Dinamica EGO software. The results showed that the expansion of land use and land cover associated with agricultural activities was the main transformation in the BHLG until 2020. Classes such Rice, Soybean and Forest Plantation advanced over Grassland and over Other Temporary Crops in the last 35 years, confirming the trade-off between the immediate provision of some uses that are more economically profitable and advantageous for some sectors, at the expense of other uses with ES that are more important for human well-being in general. The ES were valued at US\$ 2,147,051,738 in 2020 in the basin, and the classes Forest Formation, Grassland, River and lake and Wetlands provided the highest values in ES and had the highest score in the capacity assessment of supply, highlighting the importance of maintaining uses that preserve the natural cover. The analysis developed in this research can be applied in new studies and serve as a subsidy for the elaboration of public policies, with the aim of preserving the adequate supply of services for the maintenance of human life on the planet, in addition to playing an important role in the propagation of the concept of services ecosystems.

Keywords: Ecosystem services. Land use and land cover. Payment for Environmental Services (PES). Mapbiomas. Dinamica EGO. Pampa biome.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa de situação e localização geográfica da bacia hidrográfica do Lago Guaíba.	29
Figura 2 - Diagrama ombrotérmico Estação Porto Alegre.	30
Figura 3 - A interação entre capital construído, social, humano e natural afeta o bem-estar humano.	53
Figura 4 - Categorias de serviços ecossistêmicos.	57
Figura 5 - Estrutura conceitual para a União Europeia e avaliação ecossistêmica nacional sob a Ação 5 da Estratégia da Biodiversidade da União Europeia para 2020.	64
Figura 6 - Fluxograma das etapas da pesquisa.	73
Figura 7 - Plataforma de acesso aos dados do Mapbiomas no <i>Google Earth Engine</i>	75
Figura 8 - Uso e cobertura da terra observadas em 1985 na BHLG.	90
Figura 9 - Uso e cobertura da terra observadas em 2020 na BHLG.	91
Figura 10 - Variação (%) nas classes de uso e cobertura da terra para os anos 1985 e 2020.	92
Figura 11 - Uso identificado como Silvicultura no município de Guaíba/RS.	93
Figura 12 - Propriedade com cultivo de soja na zona sul de Porto Alegre.	95
Figura 13 - Área urbanizada no município de Porto Alegre/RS.	97
Figura 14 - Formação florestal (ao fundo) e Campo alagado e área pantanosas (primeiro plano) no município de Guaíba/RS.	98
Figura 15 - Classe “Rio e lago” representada pelo Lago Guaíba, zona sul do município de Porto Alegre/RS.	99
Figura 16 - Uso e cobertura da terra para o cenário tendencial 2030 na BHLG.	101
Figura 17 - Uso e cobertura da terra para o cenário tendencial 2050 na BHLG.	102
Figura 18 - Distribuição do uso e cobertura da terra (a, b, c, d) e valor proporcional dos serviços ecossistêmicos (e, f, g, h) para cada uso e cobertura da terra na BHLG nos anos 1985 e 2020 e cenários tendenciais 2030 e 2050.	107
Figura 19 - Distribuição dos SE (US\$/ha/ano) segundo a classe de uso e cobertura da terra “Rio e Lago” nos anos 1985 e 2020 e cenários tendenciais 2030 e 2050.	108
Figura 20 - SE Recreação relacionado à classe de uso e cobertura da terra “Rio e Lago” (Lago Guaíba, município de Guaíba/RS).	110
Figura 21 - Distribuição dos SE (US\$/ha/ano) segundo a classe de uso e cobertura da terra “Formação Florestal” nos anos 1985 e 2020 e cenários tendenciais 2030 e 2050.	111
Figura 22 - Distribuição dos SE (US\$/ha/ano) segundo a classe de uso e cobertura da terra “Formação Campestre” nos anos 1985 e 2020 e cenários tendenciais 2030 e 2050.	115
Figura 23 - Distribuição dos SE (US\$/ha/ano) segundo a classe de uso e cobertura da terra “Campo Alagado e Área Pantanosa” nos anos 1985 e 2020 e cenários tendenciais 2030 e 2050.	117
Figura 24 - Distribuição dos SE (US\$/ha/ano) segundo a classe de uso e cobertura da terra “Arroz” nos anos 1985 e 2020 e cenários tendenciais 2030 e 2050.	120
Figura 25 - Distribuição dos SE (US\$/ha/ano) por classe de uso e cobertura da terra “Soja” nos anos 1985 e 2020 e cenários tendenciais 2030 e 2050.	121
Figura 26 - Distribuição dos SE (US\$/ha/ano) por classe de uso e cobertura da terra “Silvicultura” nos anos 1985 e 2020 e cenários tendenciais 2030 e 2050.	125
Figura 27 - Distribuição da Integridade Ecológica e dos SE pela classe de uso e cobertura da terra “Formação Florestal”.	129
Figura 28 - Distribuição da Integridade Ecológica e dos SE pela classe de uso e cobertura da terra “Formação Campestre”.	130

Figura 29 - Distribuição da Integridade Ecológica e dos SE pela classe de uso e cobertura da terra “Silvicultura”.....	131
Figura 30 - Distribuição da Integridade Ecológica e dos SE pela classe de uso e cobertura da terra “Campo Alagado e Área Pantanosa”.....	132
Figura 31 - Distribuição da Integridade Ecológica e dos SE pela classe de uso e cobertura da terra “Rios e Lagos”.....	133
Figura 32 - Distribuição da Integridade Ecológica e dos SE pela classe de uso e cobertura da terra “Arroz”.....	134
Figura 33 - Distribuição da Integridade Ecológica e dos SE pela classe de uso e cobertura da terra “Mosaico Agricultura e Pastagem”.....	135
Figura 34 - Distribuição da Integridade Ecológica e dos SE pela classe de uso e cobertura da terra “Outras Lavouras Temporárias”.....	136
Figura 35 - Distribuição da Integridade Ecológica e dos SE pela classe de uso e cobertura da terra “Soja”.....	137
Figura 36 - Distribuição da Integridade Ecológica e dos SE pela classe de uso e cobertura da terra “Praia, Duna e Areal”.....	138
Figura 37 - SE Proteção contra inundações, Recreação e valores aestéticos e valor intrínseco da biodiversidade, relacionados à cobertura da terra Praia, Duna e Areal (Barra do Ribeiro/RS).	139
Figura 38 - Espacialização do SE Regulação da água na BHLG (1985).	142
Figura 39 - Espacialização do SE Regulação da água na BHLG (2020).	142
Figura 40 - SE Regulação e Suprimento de água, Controle da erosão e retenção sedimentar, Formação do solo e Ciclagem de nutrientes: exemplos de SE relacionado à classe Formação florestal (município de Guaíba/RS).....	143
Figura 41 - Espacialização do SE Polinização na BHLG (1985).	144
Figura 42 - Espacialização do SE Polinização na BHLG (2020).	145

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Esquemas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) por município, tipo de intervenção e monitoramento previsto.	38
Quadro 2 - Serviços ecossistêmicos, funções ecossistêmicas e exemplos.	59
Quadro 3 - Lista de serviços ecossistêmicos e integridade dos ecossistemas e suas definições.	60
Quadro 4 - Tipologia de ecossistema para mapeamento e avaliação segundo a estratégia de biodiversidade da União Europeia.	65
Quadro 5 - Melhores indicadores disponíveis para avaliação de serviços ecossistêmicos entre diferentes ecossistemas.	66
Quadro 6 - Legenda da Coleção 6 do MapBiomias para os tipos de uso e ocupação da terra existentes na BHLG.	76
Quadro 7 - Matriz para a avaliação das capacidades dos diferentes tipos de cobertura da terra para fornecer serviços ecossistêmicos.	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - População na bacia hidrográfica do Lago Guaíba (2020).	28
Tabela 2 - Resumo do valor médio global dos serviços ecossistêmicos anuais (US\$/ha/ano) (COSTANZA <i>et al.</i> , 1997).	83
Tabela 3 - Transformações no uso e cobertura da terra observadas (1985 a 2020) e cenário tendencial (2030 e 2050) na BHLG.	89
Tabela 4 - Transformações no uso e cobertura da terra para o cenário tendencial (2030 e 2050) na BHLG.	100
Tabela 5 - Valor global médio anual dos serviços ecossistêmicos para a BHLG, uso e cobertura da terra em 1985 e 2020, e cenário tendencial para 2030 e 2050).	106
Tabela 6 - Matriz de avaliação relacionado as classes de uso e cobertura da terra com a capacidade de fornecimento de serviços ecossistêmicos.	128

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
APP	Área de Preservação Permanente
BHLG	Bacia Hidrográfica do Lago Guaíba
C	carbono
CH ₄	metano
CICES	<i>Common International Classification of Ecosystem Services</i>
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CO ₂	dióxido de carbono
DMS	dimetilsulfureto
EUNIS	<i>European Nature Information System</i>
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
GEE	Gases de Efeito Estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INDE	Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
InVEST	Valoração Integrada dos Serviços Ecossistêmicos e Compensações <i>Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services</i>
IPBES	<i>Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services</i> (Plataforma Intergovernamental sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos)
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)
IPEA	Instituto de Pesquisas Aplicadas
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MEA	<i>Millennium Ecosystem Assessment</i> (Avaliação Ecossistêmica do Milênio)
N	nitrogênio
N ₂ O	óxido nitroso
NO _x	óxido de nitrogênio
O ₃	ozônio
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONG	Organização não governamental
ONU	Organização das Nações Unidas
P	fósforo
PEPSA	Programa Estadual de Pagamento por Serviços Ambientais
PNPSA	Política Nacional do Pagamento por Serviços Ambientais
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PPSA	<i>Programa de Pagos por Servicios Ambientales</i>
PSA	Pagamento por Serviços Ambientais
RBCV	Reserva da Biosfera do Cinturão Verde
REDD	<i>Reduction in Emissions from Deforestation and Forest Degradation</i>
RPPN	Reservas Particulares do Patrimônio Natural
SAFs	Sistemas Agroflorestais

SE	Serviços ecossistêmicos
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TEEB	<i>The Economics of Ecosystems and Biodiversity</i> (Economia de Ecossistemas e da Biodiversidade)
UE	União Europeia
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
VAB	Valor Adicionado Bruto

SUMÁRIO

1	CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA	16
1.1	HIPÓTESE DA PESQUISA	24
1.2	OBJETIVO GERAL	26
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
1.4	ÁREA DE ESTUDO	28
2	CAPÍTULO II: REFERENCIAL TEÓRICO	34
2.1	PAGAMENTO POR SERVIÇOS AMBIENTAIS (PSA)	34
2.2	AVALIAÇÃO DO USO E COBERTURA DA TERRA	40
2.3	SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS	46
2.3.1	Base conceitual	49
2.3.2	Capital natural e valoração de serviços ecossistêmicos	53
2.3.3	Categorização dos serviços ecossistêmicos	57
2.3.4	Mapeamento e avaliação de serviços ecossistêmicos	62
3	CAPÍTULO III: MATERIAL E MÉTODOS	72
3.1	COLETA E ORGANIZAÇÃO DE DADOS DE USO E COBERTURA DA TERRA	74
3.2	CENÁRIOS FUTUROS DE USO E COBERTURA DA TERRA	79
3.3	MÉTODO DE VALORAÇÃO DOS SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS	82
3.4	MÉTODO DE CAPACIDADE DE FORNECIMENTO DE SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS	85
4	CAPÍTULO IV: RESULTADOS E DISCUSSÃO	89
4.1	MODIFICAÇÕES NO USO E COBERTURA DA TERRA DE 1985 A 2020	89
4.1.1	Transformações para os cenários futuros (2030 e 2050)	100
4.2	ATRIBUIÇÃO DE VALORES AOS SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS	105
4.2.1	Rio e Lago	108
4.2.2	Formação Florestal	111
4.2.3	Formação Campestre	115
4.2.4	Campo Alagado e Área Pantanosa	116
4.2.5	Arroz	119
4.2.6	Soja	121
4.2.7	Silvicultura	122
4.3	CAPACIDADE DE FORNECIMENTO DE SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS	127
4.4	ANÁLISE COMPARATIVA: QUAL ABORDAGEM OFERECE MELHOR RESPOSTA AO MONITORAMENTO DOS SE NO TEMPO E ESPAÇO?	139
5	CAPÍTULO V: CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS	149
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	155
7	APÊNDICE	175

1 CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

Ao longo das últimas décadas, a influência da ação humana sobre os recursos naturais tem causado intensas transformações sobre o uso e cobertura da terra e seu manejo, levando a alterações nunca antes evidenciadas em nível global.

Essas atividades são condicionadas por fatores econômicos, sociais, culturais e históricos. No Rio Grande do Sul, certas práticas agrícolas, como as monoculturas de soja, arroz e silvicultura, podem ter impactos negativos na biodiversidade e no bem-estar humano, especialmente para as populações mais vulneráveis.

Em relação à perda de biodiversidade, a expansão dessas áreas de monocultura pode resultar no desmatamento de ecossistemas, como florestas e campo, levando à perda de habitat para muitas espécies. O desmatamento também pode fragmentar os ecossistemas, interrompendo os corredores ecológicos e afetando a migração e o fluxo gênico das espécies.

Outra questão refere-se ao uso intensivo de agroquímicos, pois a produção agrícola em larga escala frequentemente envolve o uso intensivo de pesticidas e fertilizantes, que podem contaminar o solo, a água e os ecossistemas adjacentes. Esses produtos químicos podem ter impactos negativos na saúde humana, causando doenças e problemas de desenvolvimento, especialmente nas comunidades que vivem em áreas agrícolas próximas.

A monocultura de soja e arroz também pode ser altamente demandante em termos de recursos hídricos. O uso excessivo de água para irrigação dessas culturas pode levar à escassez de água em áreas onde os recursos já são limitados, afetando negativamente as comunidades locais que dependem dos mesmos. Trentin, Laurent e Robaina (2023) verificaram que a mudança de campos herbáceos no bioma Pampa no oeste do estado do RS, para outras formas de uso, como soja e arroz, ou ainda para a silvicultura, tendeu a apresentar um significativo impacto no balanço hídrico da bacia, seja através do aumento da evapotranspiração, da redução na infiltração, ou do aumento do escoamento superficial, que acarretam desgaste do solo, diminuição da disponibilidade de água no solo, deficiência na recarga do aquífero e na disponibilidade hídrica.

A expansão de áreas de cultivos de alta rentabilidade como a produção agropecuária, – tendo como exemplo notório a *commoditie* soja –, o aumento da concentração populacional em áreas urbanas e a especulação imobiliária, geram significativas mudanças nos usos e cobertura da terra. Esse aumento de áreas para fins vinculados ao crescimento econômico, associado à fragilização da legislação ambiental e de uma menor preocupação com os aspectos socioambientais, por parte de setores produtivos importantes, tem deixado a questão da preservação dos ecossistemas cada vez mais marginalizada.

Essas mudanças geram diversos impactos ao meio ambiente e exercem influência, direta ou indireta, na dinâmica climática, na alteração do nível do mar, na perda de biodiversidade, na poluição do ar, da água e dos solos, na erosão, na desertificação, entre outros. Todos esses eventos afetam de alguma forma a qualidade de vida das populações (ASSIS *et al.*, 2019).

Também é importante notar que nem todas as práticas agrícolas são prejudiciais à biodiversidade e ao bem-estar humano. Existem abordagens sustentáveis de agricultura que visam minimizar os impactos negativos e promover a conservação da biodiversidade, enquanto garantem a segurança alimentar e o bem-estar das comunidades locais. Essas práticas incluem a agricultura orgânica, a agroecologia, o manejo florestal sustentável e a conservação de áreas naturais.

A crescente e urgente preocupação com as questões ambientais em todo o planeta, somada ao entendimento sobre a contribuição do meio ambiente para o bem-estar e sobrevivência humanos, têm demandado o desenvolvimento de uma série de pesquisas e metodologias de avaliações de impacto e monitoramento ambiental necessárias à tomada de decisões em diferentes esferas governamentais.

Ainda sobre a proposição de medidas para a promoção do desenvolvimento sustentável em todo o planeta, destaca-se a Agenda 2030, que é um plano de ação global adotado pelas Nações Unidas em 2015, composto por 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Esses objetivos abrangem uma ampla gama de questões socioeconômicas e ambientais que devem nortear as ações previstas até o ano de 2030. Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável compreendem: 1) Erradicação da pobreza, 2) Fome zero e agricultura sustentável, 3) Saúde e bem-estar, 4) Educação de qualidade, 5) Igualdade de gênero, 6) Água limpa e saneamento, 7) Energia limpa e acessível, 8) Trabalho decente e crescimento

econômico, 9) Indústria, inovação e infraestrutura, 10) Redução das desigualdades, 11) Cidades e comunidades sustentáveis, 12) Consumo e produção responsáveis, 13) Ação contra a mudança global do clima, 14) Vida na água, 15) Vida terrestre, 16) Paz, justiça e instituições eficazes e 17) Parcerias e meios de implementação. Esses objetivos são interconectados e abordam desafios globais urgentes, como a pobreza, a fome, a desigualdade, a mudança climática, a degradação ambiental e a promoção da paz e da justiça. A Agenda 2030 reconhece a necessidade de ação coletiva e parcerias entre governos, setor privado, sociedade civil e outros atores para alcançar esses objetivos.

O objetivo 15 dessa Agenda objetiva proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da terra e deter a perda de biodiversidade, que reforçam a importância de um planejamento de longo prazo para a manutenção das condições desejáveis para esses ecossistemas.

O termo meio ambiente foi definido inicialmente como

o conjunto dos elementos físico-químicos, ecossistemas naturais e sociais em que se insere o Homem, individual e socialmente, num processo de interação que atenda ao desenvolvimento das atividades humanas, à preservação dos recursos naturais e das características essenciais do entorno, dentro de padrões de qualidade definidos. (COIMBRA, 1985, p.29)

Partindo desse conceito, a Política Nacional de Meio Ambiente (Lei nº 6.938/81) define o meio ambiente como “um conjunto de condições, leis, influências e interações de ordem física, química e biológica, que permite, abriga e rege a vida em todas as suas formas”, sendo o reconhecimento das inter-relações dos componentes biofísicos e socioeconômicos de fundamental importância para a gestão ambiental.

Alguns instrumentos de avaliação ambiental alcançaram patamares mais complexos, possibilitando trocas e monetarização entre diferentes setores, como o mercado de créditos de carbono, por exemplo, onde as cotas de emissão de gases de efeito estufa (GEE) podem ser comercializadas entre empresas e governos, ou o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), que oferece um incentivo econômico àqueles que preservam os ecossistemas.

Um importante conceito incorporado à avaliação ambiental que ganhou destaque nos últimos 20 anos são os serviços ecossistêmicos (SE), assimilados de forma geral como os benefícios que as pessoas recebem dos ecossistemas (MEA,

2005). Os SE são organizados basicamente em quatro tipos: provisão, suporte, regulação e culturais. Iniciativas para avaliar as alterações dos ecossistemas a fim de promover o aumento da conservação e uso sustentável deles em benefício do bem estar humano foram publicadas, destacando-se os estudos desenvolvidos no âmbito da Avaliação Ecosistêmica do Milênio - *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA, 2005), da Plataforma Intergovernamental sobre Biodiversidade e Serviços Ecosistêmicos - *Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services* (IPBES, 2019), da Economia de Ecossistemas e da Biodiversidade - *The Economics of Ecosystems and Biodiversity* (TEEB, 2010) e do projeto América Latina e o Caribe: uma superpotência de Biodiversidade - *Latin America and the Caribbean: a biodiversity* (PNUD, 2010).

Ressalta-se a importância de frisar a diferença entre dois conceitos que são frequentemente confundidos não só em publicações, mas também em textos acadêmicos: serviços ecosistêmicos e serviços ambientais. A definição que melhor se aplica em cada caso é (FGB/TNC/MMA/GIZ, 2017):

- a) serviços ecosistêmicos: benefícios que as pessoas obtêm da natureza, direta ou indiretamente, através dos ecossistemas, a fim de sustentar a vida no planeta;
- b) serviços ambientais: atividades humanas individuais ou coletivas que favorecem direta ou indiretamente a preservação, a proteção, a conservação, a manutenção, a recuperação e/ou a melhoria dos serviços ecosistêmicos.

A recém sancionada Lei Nº 14.119 (BRASIL, 2021) que institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais também diferencia os dois conceitos no Art 2º:

II - serviços ecosistêmicos: benefícios relevantes para a sociedade gerados pelos ecossistemas, em termos de manutenção, recuperação ou melhoria das condições ambientais (...)

III - serviços ambientais: atividades individuais ou coletivas que favorecem a manutenção, a recuperação ou a melhoria dos serviços ecosistêmicos

Observa-se que existem muitas incertezas e ambiguidades quanto aos conceitos (bens ambientais, serviços ambientais, pagamento por serviço ecosistêmico, pagamento por serviço ambiental, serviço de ecossistema), as quais

geram uma série de obstáculos e dificuldades à implementação de uma avaliação unificada.

Essa diferenciação é crucial para a compreensão desta pesquisa, pois a avaliação dos serviços ecossistêmicos envolve uma análise sobre os serviços que a natureza fornece, ao passo que os serviços ambientais estão voltados às atividades humanas que promovem a melhoria dos SE, sendo passíveis de quantificação em projetos de PSA. A valoração do SE serve em primeira análise para indicar aos gestores públicos e a outros atores importantes, o quanto a sociedade recebe da natureza e o quanto a escolha (*trade-offs*) por uma ou outra classe de uso e cobertura da terra pode impactar em termos de custo econômico e/ou ambiental sobre o ecossistema. Ou seja, a escolha por uma atividade pode trazer maior ganho econômico para um setor, e ao mesmo tempo apresentar uma perda de qualidade ambiental pela falta de práticas sustentáveis.

Por sua vez, o PSA é um instrumento econômico que busca recompensar um provedor de serviços ambientais, que pode ser pessoa física ou jurídica, de direito público ou privado, ou grupo familiar ou comunitário que, em virtude de suas práticas de conservação, proteção, manejo e recuperação de ecossistemas, mantém ou incrementa o fornecimento de um serviço ecossistêmico (FGB/TNC/MMA/GIZ, 2017).

A Lei Federal Nº 14.119 (BRASIL, 2021) consolida o vínculo entre os serviços ecossistêmicos e o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), uma vez que a implementação deste tende a “manter, recuperar ou melhorar os serviços ecossistêmicos em todo o território nacional”.

Alguns programas de PSA incluem monitoramento sistemático utilizando indicadores como monitoramento de áreas de recomposição florestal, avaliação da quantidade das águas (medição de vazões), qualidade da água (oxigênio dissolvido, temperatura, pH, etc.), número de projetos de recuperação ambiental, regime de vazões ou protocolos de monitoramento da restauração florestal (MMA, 2011).

Contudo, as metodologias para identificar e monitorar espacial e temporalmente as áreas alteradas nos projetos de PSA e o ganho em SE precisam ser refinadas. Para receber o pagamento pela recuperação ou manutenção de uma área, são utilizados parâmetros de monitoramento ambiental que abrangem uso e cobertura da terra, produção hídrica e vazão, qualidade da água, replantio de mudas,

manutenção de cercas e roçadas, medição de estoques de carbono (PAGIOLA; VON GLEHN; TAFFARELLO, 2013). Na maior parte dos casos, a avaliação é feita através de critérios qualitativos ou através da percepção de técnicos, e a falta de dados também é um contratempo para a execução de esquemas de PSA. Em qualquer circunstância, o que se avalia é a alteração da área no tempo e no espaço e o pagamento é realizado com base em um valor pré-estabelecido em edital, que a priori está embasado na quantidade de área preservada, sem mensurar objetivamente o serviço ecossistêmico recebido.

Em termos de reconhecimento quanto ao valor dos serviços que a biodiversidade e os ecossistemas prestam às atividades econômicas em geral no país, e sua importância no processo de tomada de decisões, o Instituto de Pesquisas Aplicadas (IPEA, 2013) realizou uma revisão bibliográfica sobre as publicações existentes no país entre 2000 e 2011, com base em trabalhos acadêmicos, revistas internacionais de economia ambiental e ecológica, Plataforma Lattes, elaborada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), sítios de instituições de pesquisa, de instituições governamentais e de organizações não governamentais (ONGs) relacionadas à questão ambiental, e em todos os relatórios publicados pelo projeto Economia dos Ecossistemas e da Biodiversidade no Brasil - TEEB Brasil, bem como o TEEB global. O resultado dessa avaliação mostrou a “existência de grande desbalanceamento geográfico dos estudos de valoração dos serviços ecossistêmicos, com uma concentração maior na Amazônia e Mata Atlântica, em detrimento dos demais biomas terrestres e da Zona Costeira e Marinha” (IPEA, 2013, p.50). Dos 77 estudos empíricos sobre valoração de SE, apenas dois foram dedicados ao Pampa, o que pode ser reflexo da definição relativamente recente desse bioma a partir da publicação do Mapa dos biomas do Brasil: primeira aproximação (IBGE, 2004), e também pelo desinteresse histórico em relação à conservação dos campos do sul do Brasil (OVERBECK *et al.*, 2009).

Ressalta-se que Bioma Pampa tem passado por intenso processo de mudança no uso da terra, com a conversão de áreas de pastagem para terras cultivadas para produção de grãos e madeira, sendo que essas expansões podem ter impactos negativos irreparáveis no ecossistema local. Essa degradação ambiental pode ter consequências negativas não apenas para a conservação da biodiversidade, mas também para a qualidade do solo e dos recursos hídricos, afetando a própria

sustentabilidade da produção agrícola a longo prazo (TRENTIN; LAURENT; ROBAINA, 2023).

Conforme Suertegaray e Silva (2009),

as diferentes fitofisionomias¹ campestres naturais que o Pampa apresenta proporcionam o agrupamento de “formações ecológicas que se inter cruzam em uma formação ecopaisagística única, com intenso tráfego de matéria, energia e vida entre os campos, matas ciliares (de galeria), capões de mato e matas de encostas, suas principais formações” (p. 43-44).

Ainda, a geodiversidade e a biodiversidade do Pampa

se encontram altamente ameaçados pelo crescimento das atividades agrosilviopastoris, que historicamente ocupam a porção dos campos com pecuária extensiva e substituem as pastagens naturais por grandes áreas de cultivo de arroz e soja. A substituição das pastagens naturais por pastagens artificiais, a difusão de projetos de mineração, parques eólicos e barragens na área do Pampa, parece ser os maiores entraves para uma política de ordenamento territorial ecologicamente sustentável para o Pampa (PEIXOTO; OLIVEIRA-COSTA, 2023, p.1171).

O aumento da consciência e da percepção a respeito do valor dos serviços ecossistêmicos e da biodiversidade para o bem-estar humano, a disseminação do conhecimento a respeito das relações de dependência e impacto, assim como dos riscos e oportunidades vinculados à utilização do capital natural, são elementos que ajudam o planejamento do desenvolvimento econômico e a tomada de decisões sobre políticas públicas a avançarem rumo ao desenvolvimento sustentável.

A Lei Nº 14.119 (BRASIL, 2021) incorpora os SE em seus objetivos:

III - valorizar econômica, social e culturalmente os serviços ecossistêmicos;

VII - reconhecer as iniciativas individuais ou coletivas que favoreçam a manutenção, a recuperação ou a melhoria dos serviços ecossistêmicos, por meio de retribuição monetária ou não monetária, prestação de serviços ou outra forma de recompensa, como o fornecimento de produtos ou equipamentos;

IX - estimular a pesquisa científica relativa à valoração dos serviços ecossistêmicos e ao desenvolvimento de metodologias de execução, de monitoramento, de verificação e de certificação de projetos de pagamento por serviços ambientais;

XII - incentivar o setor privado a incorporar a medição das perdas ou ganhos dos serviços ecossistêmicos nas cadeias produtivas vinculadas aos seus negócios;

¹ Planalto da Campanha, Depressão Central, Planalto Sul-Rio-Grandense e Planície Costeira.

A Lei tem recebido contribuições técnicas para sua regulamentação (COALIZÃO BRASIL, 2021), pois ainda não estabelece, por exemplo, normatização jurídica detalhada com relação às fontes pagadoras e metodologia de operação dessas trocas, monitoramento e comprovação dos resultados, incluindo a valoração dos serviços ambientais e ecossistêmicos, dentre outros. Ainda assim, a Lei é fundamental no reconhecimento dos SE dentro do contexto da avaliação ambiental, e estados e municípios têm avançado significativamente na temática dos serviços ecossistêmicos através da implementação de projetos de PSA.

O crescente número de políticas públicas dessa natureza pode ser percebido através da regulamentação de legislação referente aos serviços ambientais em âmbito local (mais de 37 municípios) (FGB/TNC/MMA/GIZ, 2017) e através de leis e/ou decretos em âmbito estadual (19 estados). O Rio Grande do Sul instituiu recentemente o Programa Estadual de Pagamento por Serviços Ambientais (PEPSA) através do Decreto Nº 56.640 de 02 de setembro de 2022, possui projeto de PSA em implementação no município de Vera Cruz (DELEVATI; KROUNBAUER, 2017) e outros em fase de planejamento em âmbito municipal e estadual.

A preocupação de incluir os serviços ecossistêmicos no planejamento, gestão e tomada de decisão já é evidente, visto que muitos trabalhos têm apresentado esse tipo de abordagem (BAGSTAD; SEMMENS; WINTHROP, 2013; DE GROOT *et al.*, 2002; HERNÁNDEZ-BLANCO *et al.*, 2020; ROSA, 2020), mas muitos problemas ainda precisam ser resolvidos para integrar totalmente o conceito de serviços ecossistêmicos no planejamento do meio ambiente, gestão e tomada de decisão (DE GROOT *et al.*, 2010).

A produção de trabalhos com propostas de avaliação dos SE tem sido substancial em muitos países, mas no Brasil essa temática ainda é recente. A identificação e a análise da evolução de mudança dos SE no espaço e no tempo no país oferece uma lacuna em termos de produção científica, carecendo de metodologia apropriada, podendo ser objeto de investigação sistemática e crítica, empiricamente verificável. Estudos já recomendam que se desenvolvam pesquisas por biomas, levando em consideração diferentes atividades econômicas que atuam como condutores de mudança nos SE, além da priorização da escolha de áreas geográficas que já disponham de base de dados disponíveis, ou que apresentem perda de biodiversidade resultante de desmatamento acelerado, processos de desertificação

ou onde haja conflitos resultantes de usos múltiplos de recursos escassos, como a água por exemplo (IPEA, 2013).

Uma das formas de representar e analisar o processo de ocupação do território é espacializar e contabilizar, de forma sistemática e periódica, as alterações ocorridas na cobertura e uso da terra. Isso representa um importante instrumento de suporte e orientação às ações de planejamento, além de subsidiar outros estudos, como avaliação de impactos ambientais, ordenamento territorial, contas ambientais, avaliação de serviços ecossistêmicos, estimativa de emissão e remoção de gases de efeito estufa e produção de indicadores dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ASSIS *et al.*, 2019).

Um dos principais obstáculos da gestão ambiental consiste na mobilização de recursos e na consolidação de uma rede de informações que permita o monitoramento de uma determinada área ao longo do tempo, com base em indicadores que sejam representativos dos processos existentes no local. A seleção de indicadores que possa retratar a evolução de uma condição existente para o alcance de uma meta ou manutenção de uma situação que já esteja confortável é o passo inicial para a recuperação, preservação e/ou conservação de uma área de interesse.

Além da questão da falta de uma metodologia consistente para o monitoramento dos SE no tempo e no espaço, há ainda uma controversa questão sobre a atribuição de valores a um bem que é público e está disponível de forma gratuita, podendo ser entendida de forma temerária como a ‘precificação’ da natureza (MCCAULEY, 2006; REID *et al.*, 2006). A adoção de valores monetários para avaliação de SE envolve uma série de critérios, e traz discussões relacionadas a uma interpretação negativa quanto à atribuição de valores econômicos para os SE. O Brasil já conta com capacidade acadêmica para o desenvolvimento de estudos com objetivos específicos, mas que ainda não se prestam para uma “análise do valor dos serviços ecossistêmicos em larga escala” (IPEA, 2013, p.50).

1.1 HIPÓTESE DA PESQUISA

Partindo desse contexto, este estudo pressupõe que a avaliação de serviços ecossistêmicos com base no mapeamento das alterações de uso e cobertura da terra pode ser uma ferramenta eficaz para o monitoramento da qualidade ambiental, expressa através da valoração da quantidade de SE fornecidos pela natureza, a fim

de tornar os instrumentos de avaliação dos serviços um mecanismo profícuo à conscientização sobre a importância que a variável ambiental adquire para o desenvolvimento sustentável de determinadas áreas.

Tendo como recorte espacial os limites da bacia hidrográfica do Lago Guaíba (BHLG), são apresentados dois métodos distintos para avaliação dos SE: um com base em critérios de valoração monetária, e outro com base na capacidade de fornecimento de serviços, utilizando pontuação específica em uma matriz, sem atribuição de valor monetário. Ao relacionar e comparar esses dois métodos, espera-se validar qual deles oferece maior capacidade de resposta para o monitoramento dos SE no tempo e no espaço, sendo aplicável para a gestão e análise ambiental.

A BHLG tem 2.972,87 km² e foi selecionada por se tratar de uma bacia de macro escala (MENDIONDO; TUCCI, 1997), sendo adequada para observação de processos regionais, com feições que podem ser identificadas através de dados de satélite. A escolha dessa área permite que a análise seja replicada em outros recortes territoriais de mesma grandeza, sem necessidade de levantamento de dados de campo atinentes a escalas menores, que demandam maiores investimentos financeiros, o que nem sempre é possível.

Análises sobre as transformações ocorridas na BHLG são fundamentais para entender os impactos das mudanças de uso e cobertura da terra, considerando-se a escassez de estudos sobre a bacia nesse âmbito. Ainda que possua importante ocupação urbana, alguns setores da bacia têm acentuada utilização para atividades agrícolas, que impactam sobremaneira a vegetação natural que caracteriza o bioma Pampa.

Diante de evidências de práticas ambientalmente insustentáveis na BHLG e da falta de execução de medidas que compensem, mitiguem ou previnam os impactos negativos e potencializem as boas práticas sobre os ecossistemas, questiona-se se as alterações na bacia hidrográfica poderiam ser avaliadas e monitoradas em termos de serviços ecossistêmicos, e em que medida seria possível mudar ou adaptar um uso da terra para melhorar um ou mais desses serviços.

Além de analisar as transformações ocorridas no uso e ocupação da terra na BHLG entre os anos 1985 e 2020, observados através dos dados do Projeto MapBiomias, este estudo também se propõe a apresentar um cenário tendencial para

os anos de 2030 e 2050, através do modelo Dinamica EGO, que permite modelar o uso e cobertura da terra seguindo a tendência histórica recente de mudança. Esse diagnóstico é urgente e indispensável, tendo em vista a escassez de estudos que abordem a transformação do uso e cobertura da terra no sul do Brasil, comparado a outras regiões do país (OVERBECK *et al.*, 2009). O conhecimento sobre os recursos naturais e seu funcionamento são essenciais para definir a sua utilização racional (BOLDRINI, 2009).

Em síntese, considera-se um desafio a proposta de implementação de um método de avaliação de SE que possa contribuir para o aprimoramento da gestão ambiental da BHLG. Nesse sentido, a presente pesquisa oferece um panorama geral e pioneiro no âmbito da Geografia, estando intrinsecamente relacionada aos aspectos ambientais, ou seja, o elo entre as variáveis ecológica, social e econômica, dimensões tão relevantes à disciplina. Espera-se que os resultados aprimorem a discussão sobre os serviços ecossistêmicos e tragam maior visibilidade à crescente e desafiadora Política Nacional do Pagamento por Serviços Ambientais (PNPSA).

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho consiste em analisar as alterações dos serviços ecossistêmicos no tempo e no espaço, utilizando o mapeamento de uso e cobertura da terra apresentado pelo Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil - MapBiomas Coleção 6 (MAPBIOMAS, 2022), no período de 1985 a 2020, tendo como recorte espacial a bacia hidrográfica do Lago Guaíba (BHLG), inserida no bioma Pampa, e propor a melhor forma de avaliação dos SE prestados.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O alcance do objetivo geral está condicionado aos seguintes objetivos específicos:

- Relacionar as classes de uso e cobertura da terra propostas pelo Projeto MapBiomas (MAPBIOMAS, 2022) com uma lista de serviços ecossistêmicos correspondentes;
- Modelar cenários tendenciais de uso e cobertura da terra seguindo a tendência histórica recente de mudança para os anos de 2030 e de 2050,

fundamentado no *software* Dinamica EGO para avaliar a evolução espaço-temporal dos serviços ecossistêmicos monitorados;

- Empregar o método de valoração monetária aos SE na BHLG;
- Empregar o método de classificação baseado na capacidade de fornecimento de SE (sem atribuição de valor monetário) aos SE na BHLG;
- Comparar e indicar qual dos métodos - valoração monetária ou capacidade de fornecimento - oferece melhor resposta ao monitoramento dos SE no tempo e espaço.

1.4 ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do Lago Guaíba (Figura 1), codificada como unidade G80 pelo Sistema Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul, instituído pela Lei 10.350/1994 (RIO GRANDE DO SUL, 1994), é a última contribuinte da Região Hidrográfica do Guaíba. Situa-se a leste do estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas geográficas de 29°55' a 30°37' de latitude Sul e 50°56' a 51°46' de longitude Oeste e possui área de 2.972,87 km² (297.287 ha).

Em termos territoriais, a BHLG abrange total ou parcialmente 14 municípios: Barão do Triunfo (2,62% da área do município na bacia), Barra do Ribeiro (93,41%), Canoas (28,84%), Cerro Grande do Sul (14,30%), Eldorado do Sul (22,89%), Guaíba (100%), Mariana Pimentel (51,57%), Nova Santa Rita (1,95%), Porto Alegre (81,19%), Sentinela do Sul (31,62%), Sertão Santana (91,13%), Tapes (17,06%), Triunfo (0,49%) e Viamão (9,14%) (DIPLA/DRHS, 2020).

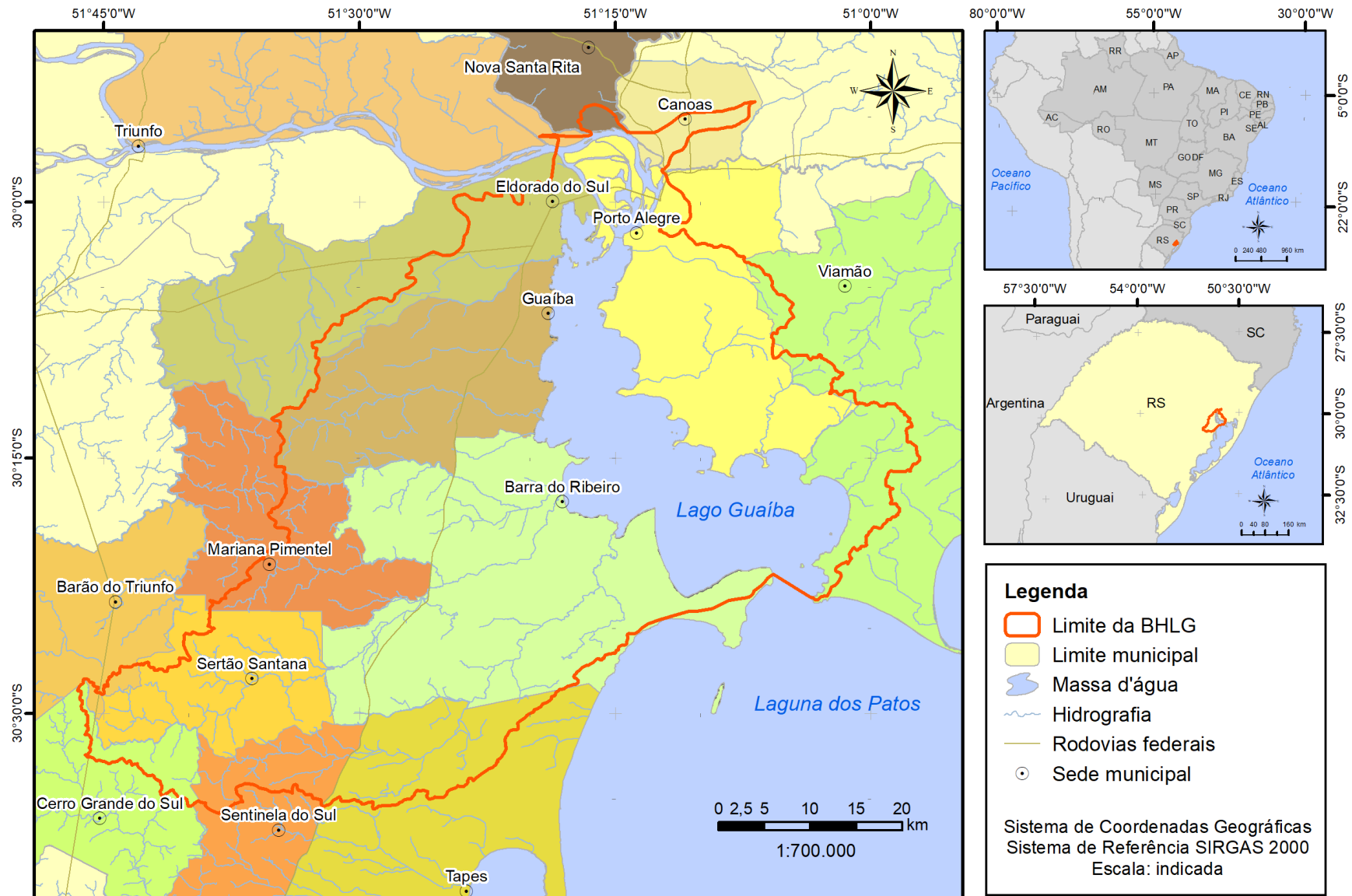
A Tabela 1 a seguir apresenta o resultado da estimativa populacional para 2020 para a BHLG, considerando a população total, urbana e rural.

Tabela 1 - População na bacia hidrográfica do Lago Guaíba (2020).

Município	População da porção do município inserida na bacia (número de habitantes)			População da bacia hidrográfica (número de habitantes)		
	Total	Urbana	Rural	Total	Urbana	Rural
Barão do Triunfo	255	-	255			
Barra do Ribeiro	13.533	10.018	3.515			
Canoas	114.106	114.106	-			
Cerro Grande do Sul	1.219	-	1.219			
Eldorado do Sul	33.625	31.614	2.011			
Guaíba	98.239	96.031	2.208			
Mariana Pimentel	2.859	658	2.200			
Nova Santa Rita	274	274	-	1.344.982	1.324.782	20.199
Porto Alegre	1.037.274	1.037.274	-			
Sentinela do Sul	1.320	-	1.320			
Sertão Santana	6.104	1.428	4.676			
Tapes	291	-	291			
Triunfo	4	-	4			
Viamão	35.880	33.379	2.500			

Fonte: DIPLA/DRHS (2020).

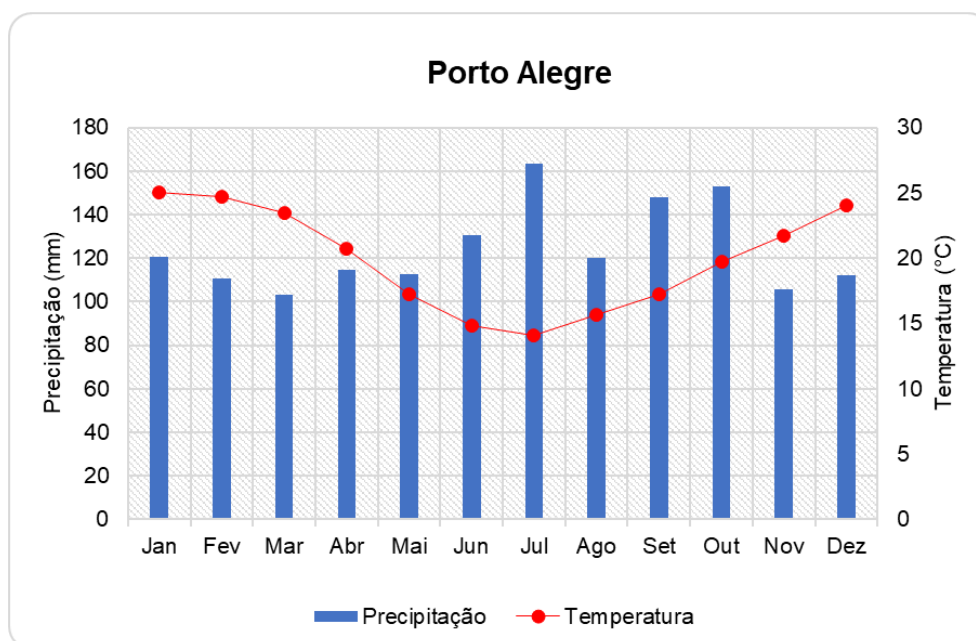
Figura 1 - Mapa de situação e localização geográfica da bacia hidrográfica do Lago Guaíba.



Fonte: elaborado pela autora.

Segundo as Normais Climatológicas do Brasil disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia para o período 1991-2020 (INMET, 2022) na estação Porto Alegre (30°05" de latitude Sul e 51°17" de longitude Oeste e 41,18 metros de altitude), as temperaturas médias compensadas mensais oscilam de 14°C a 25°C, sendo registradas nos meses de inverno (junho, julho e agosto), enquanto as maiores são observadas de dezembro a fevereiro, coincidindo com os meses de verão, conforme pode ser observado no diagrama ombrotérmico (Figura 2). A precipitação média acumulada mensal oscilou entre 103 mm (mínima) em março e 163 mm (máxima) em julho.

Figura 2 - Diagrama ombrotérmico Estação Porto Alegre.



Fonte: elaborado pela autora.

Em relação ao sistema de classificação climática mais abrangente proposto por Köppen, a BHLG está predominantemente sob influência do tipo Subtropical úmido (Cfa), caracterizado por apresentar chuvas durante todos os meses do ano, temperatura média do ar dos 3 meses mais frios compreendidas entre -3°C e 18°C, e temperatura do mês mais quente superior a 22°C. Porto Alegre é um local típico do clima Cfa, apresentando precipitação mensal bem distribuída, entre 100 e 170 mm (ALVARES *et al.*, 2013).

Por seu turno, Rossato (2020) incorpora um conjunto mais abrangente de variáveis e propõe uma classificação sob a escala espacial do Rio Grande do Sul. Desta maneira, a porção localizada na porção oeste da bacia, que engloba municípios

como Guaíba e Barra do Ribeiro, está sob influência dos tipos Subtropical II, medianamente úmido com variação longitudinal das temperaturas médias. As chuvas oscilam entre 1500-1700 mm anuais distribuídas em 90-110 dias de chuva. A temperatura média anual varia entre 17-20°C. A temperatura média do mês mais frio oscila entre 11-14°C e a temperatura média do mês mais quente varia entre 23-26°C. O tipo Subtropical II tem maior influência dos sistemas polares e tropicais continentais, porém com interferência crescente dos sistemas tropicais marítimos.

Por sua vez, o setor localizado na porção leste da bacia, que abriga municípios como Porto Alegre e Viamão, está sob influência do tipo Subtropical III, úmido com variação longitudinal das temperaturas médias, com média de chuva de 1700 a 1800 mm ao ano em 100-120 dias de chuva. Há um leve aumento nos dias de chuva mensais que nesta região são normalmente de 9-12 dias. A temperatura média anual varia entre 17-20°C. A temperatura média do mês mais frio oscila entre 11-14°C e a temperatura média do mês mais quente varia entre 23-26°C.

As características físicas apresentadas a seguir foram agrupadas através da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE, 2022), que integra um conjunto de dados geoespaciais existentes nas instituições oficiais do governo brasileiro.

A caracterização geomorfológica na BHLG evidencia a presença do Planalto Rebaixado Sul Rio-Grandense nas porções mais internas leste e oeste na bacia. Nas margens próximas ao lago predomina Planície Lagunar Patos-Mirim, com intrusão de Coxilhas Litorâneas localmente conhecidas como Coxilha das Lombas. Na porção leste da bacia também se destaca a presença dos Planaltos Residuais Sul Rio-Grandenses, caracterizado pela dissecação homogênea ou diferencial, que caracterizam as formas de topo convexo características do município de Porto Alegre. Em algumas áreas isoladas também há ocorrência do Planalto Rebaixado Sul Rio-Grandense, com aspecto semelhante ao tipo anteriormente descrito.

Quanto aos tipos de solos, o Planossolo Háplico Eutrófico predomina junto às margens do Lago Guaíba, enquanto o Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico ocorre na porção sul do município de Porto Alegre e na parte de Viamão inserida na bacia, pela margem esquerda, e na porção ao sul da margem direita. O Argissolo Vermelho-Alumínico predomina em outras partes da margem direita.

A cobertura vegetal existente é caracterizada predominantemente como Área Antrópica Dominante em Tensão Ecológica, considerando-se que a ação antrópica ocupa a bacia em quase sua totalidade. A vegetação pretérita descrita na maior parte da área corresponde à Floresta Estacional Semidecidual e Formação Pioneira.

Em relação ao Valor Adicionado Bruto (VAB) a preços básicos no setor da indústria em relação ao estado em 2019, os municípios de Canoas, Guaíba, Triunfo e a capital Porto Alegre responderam por 7,58%, 1,16%, 4,04% e 6,59%, respectivamente. No VAB da agropecuária, Barra do Ribeiro (0,67%), Triunfo (0,67%) e Viamão (0,39%) são os municípios que integram a bacia e mais contribuíram para este setor em relação ao estado em 2019. No VAB do setor de serviços Porto Alegre se destaca com 22,53% em relação ao estado, tendo em vista sua função como capital (SPGG/DEE, 2022). Esses dados mostram a heterogeneidade de atividades nos municípios que integram parcial ou totalmente a bacia.

Na porção norte, a BHLG faz divisa com o Parque do Delta do Jacuí e, ao sul, com a Laguna dos Patos, sendo drenada por 37 tributários principais que contribuem diretamente ao lago Guaíba pelas suas margens esquerda e direita (RIO GRANDE DO SUL, 2016). Esses cursos d'água, denominados arroios, sofrem com os impactos decorrentes de usos como o represamento de cursos fluviais, lavouras (arroz irrigado, tabaco, erva-mate, soja), fruticultura, atividade pecuária, indústria (coureiro-calçadista, petroquímica, metalmecânica, automobilística, de celulose, de bebidas), além dos efluentes de esgotos domésticos (PRO-GUAÍBA, 2005). Cabe salientar que as atividades agrícolas praticadas em Tapes, Barra do Ribeiro e Guaíba, por exemplo, utilizam ostensivamente agrotóxicos e fertilizantes (BASSO, 2012).

Municípios como Canoas, por exemplo, apresentaram expansão da urbanização de 56,68% entre 1984 e 2014, avançando principalmente sobre a classe de vegetação caracterizada pelo campo (HOFMANN; MARCOS; HASENACK, 2017).

Problemas em relação à urbanização desordenada das últimas décadas em Porto Alegre agravam o problema da impermeabilização causada pelo asfalto, edificações e calçadas, trazendo como consequência o aumento da vazão do arroio Dilúvio, um dos principais contribuintes do lago Guaíba, intensificando inundações em áreas a jusante, além do aumento do carreamento de sedimentos, resíduos sólidos urbanos, sólidos dissolvidos totais e sólidos em suspensão totais que deterioram a

qualidade de suas águas e contribuem para o seu assoreamento (BASSO; MOREIRA; PIZZATO, 2012).

Ainda em relação ao arroio Dilúvio, Santos e colaboradores (2020) constataram que a pressão urbana de Porto Alegre acarreta a contaminação dos sedimentos do arroio, e a poluição persiste ao longo do seu percurso, aumentando linearmente ao longo do mesmo, especialmente para alguns metais como o zinco, evidenciando-se melhorias nas áreas com maior vegetação ciliar.

Outro importante curso fluvial da BHLG, o arroio Passo Fundo, situado no município de Guaíba, também enfrenta grave problema ambiental: o descarte de efluentes industriais que têm prejudicado seriamente a saúde dos moradores ribeirinhos (HINATA; BASSO; SANTOS, 2021; MARTINS; GUERRA; ALTMANN, 2011).

Os diferentes tipos de uso e cobertura da terra tornam a bacia especialmente importante por atuar em aproveitamentos diversos, relacionados ao avanço de áreas urbanas, silvicultura, culturas temporárias (arroz e soja), formação campestre, entre outros.

Destaca-se que a bacia está inserida no bioma Pampa, que ocupa uma área de 176.496 km² ao sul do Brasil, correspondente a 2,07% do país e 63% do território do Rio Grande do Sul (ROESCH *et al.*, 2009). Esse bioma sofreu uma redução de 26% nas pastagens naturais desde 1975, sendo essa diminuição relacionada ao incremento de atividades agrícolas como florestas cultivadas (silvicultura) e culturas temporárias (soja) principalmente entre 1995 e 2005, alterando a configuração nativa (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

Análises sobre as transformações ocorridas na BHLG são fundamentais para entender os impactos das mudanças de uso e cobertura da terra, considerando-se a escassez de estudos sobre a bacia nesse âmbito. Ainda que possua importante ocupação urbana, alguns setores da bacia têm acentuada utilização para atividades agrícolas, as quais impactam sobremaneira a vegetação natural que caracteriza o bioma Pampa.

2 CAPÍTULO II: REFERENCIAL TEÓRICO

Os itens apresentados a seguir trazem os principais fundamentos quanto aos conceitos de uso e cobertura da terra e de serviços ecossistêmicos. O item 2.1 traz questões relevantes sobre o PSA, que é um importante instrumento econômico cada vez mais utilizado para gestão e recuperação de ecossistemas, estando intrinsecamente relacionados aos serviços ecossistêmicos. O item 2.2 aborda a questão das mudanças de uso e cobertura da terra ao longo dos últimos anos, apresentando alguns dos principais condutores de mudança presentes na área de estudo. O último item do capítulo (2.3). traz o detalhamento conceitual, as categorias, funções e classificações existentes na literatura para os serviços ecossistêmicos.

2.1 PAGAMENTO POR SERVIÇOS AMBIENTAIS (PSA)

O PSA pode ser definido como um instrumento econômico que tem por objetivo recompensar todo aquele que, em decorrência de atividades de conservação, manejo sustentável e recuperação de ecossistemas, promove ou contribui na preservação e conservação dos serviços providos pelos mesmos, os chamados serviços ecossistêmicos.

O PSA é de fato um instrumento que permite a compensação financeira pela conservação ou recuperação de ecossistemas. Ele visa incentivar os proprietários de terras e comunidades locais a adotarem práticas sustentáveis que beneficiem o meio ambiente. O conceito de PSA baseia-se na ideia de que os serviços prestados pelos ecossistemas, como a regulação do clima, a manutenção da qualidade da água e a conservação da biodiversidade, têm um valor econômico. Ao remunerar os prestadores desses serviços, sejam eles proprietários rurais, comunidades indígenas ou outros, busca-se criar um incentivo econômico para que eles protejam ou restaurem seus ecossistemas.

No entanto, para implementar com sucesso um programa de PSA, é necessário utilizar indicadores adequados para avaliar a situação ambiental almejada. Esses indicadores podem incluir métricas como a qualidade da água, a diversidade de espécies, a cobertura vegetal, entre outros. Eles ajudam a monitorar o desempenho dos prestadores de serviços ambientais e a garantir que as ações de conservação ou recuperação estejam alcançando os objetivos desejados.

Os indicadores também desempenham um papel importante na definição dos critérios de pagamento, uma vez que permitem avaliar a quantidade e a qualidade dos serviços ambientais fornecidos. Dessa forma, os prestadores que obtiverem melhores resultados podem receber compensações financeiras mais altas.

É importante ressaltar que a definição e o uso de indicadores adequados exigem conhecimento científico, monitoramento contínuo e engajamento dos atores estratégicos envolvidos no programa de PSA. A seleção dos indicadores deve ser baseada em critérios científicos sólidos e adaptados às particularidades do ecossistema em questão, garantindo uma abordagem holística e abrangente para a conservação e recuperação ambiental.

A definição proposta por Wunder (2005) é amplamente reconhecida e adotada para conceituar o PSA, e enfatiza cinco critérios fundamentais para caracterizá-lo:

- I. Transação voluntária: O PSA é baseado em uma transação voluntária, ou seja, ocorre de forma consensual entre o comprador e o fornecedor dos serviços ambientais. Não há obrigatoriedade legal para a participação das partes envolvidas, sendo uma negociação livre;
- II. Serviço ambiental bem definido: O PSA requer que o serviço ambiental a ser fornecido seja claramente definido. Isso implica em identificar e especificar o serviço ambiental específico que está sendo adquirido, como a conservação da biodiversidade, a preservação de áreas florestais, a proteção dos recursos hídricos, entre outros;
- III. Pelo menos um comprador: O PSA envolve, no mínimo, um comprador interessado em adquirir o serviço ambiental. Esse comprador pode ser uma entidade governamental, uma organização não governamental, uma empresa privada ou até mesmo indivíduos que desejam compensar seus impactos ambientais;
- IV. Pelo menos um fornecedor: O PSA requer, no mínimo, um fornecedor que esteja disposto a fornecer o serviço ambiental desejado. Os fornecedores podem ser proprietários de terras, comunidades locais, agricultores, povos indígenas ou outros que possuam controle sobre os recursos naturais envolvidos;

- V. Assegurar o fornecimento do serviço ambiental: O PSA estabelece que o fornecedor deve se comprometer a assegurar o fornecimento contínuo do serviço ambiental ao longo do tempo. Isso implica em adotar práticas de conservação ou recuperação que garantam a manutenção ou melhoria dos ecossistemas que geram os serviços ambientais.

Esses critérios fornecem uma base conceitual para o PSA e ajudam a estabelecer os princípios e requisitos fundamentais para a implementação desse instrumento de compensação financeira pela conservação e recuperação ambiental.

Ainda que o PSA não seja o foco principal da análise dessa pesquisa, ele tem relevância basilar por sua associação aos SE, uma vez que possui ligação explícita com o bem-estar humano, pois a implementação de um serviço ambiental, leva à conservação do ecossistema, o qual, por sua vez, mantém ou aumenta o serviço por ele prestado (IPEA, 2013).

A história da preservação da bacia hidrográfica de Catskill/Delaware pela cidade de Nova Iorque é um exemplo pioneiro que ilustra a lógica econômica e instrumental para investir em serviços ecossistêmicos, especificamente na proteção de bacias hidrográficas. Na década de 1990, a cidade de Nova Iorque se deparou com a decisão de investir em capital natural, ou seja, na preservação e sustentabilidade da referida bacia, ou construir uma nova planta de filtragem para tratar a água proveniente de fontes de poluição difusa. Estimava-se que a construção de uma nova planta de filtragem custaria entre US\$ 6 e US\$ 8 bilhões, com custos adicionais anuais de manutenção de cerca de US\$ 300 milhões, para cumprir as emendas federais ao *Safe Water Drinking Act* (SWDA) (NRC, 2000).

Ao invés de optar pela construção da nova planta, a cidade de Nova Iorque, optou, em 1997, após longas negociações e colaboração com comunidades de bacias hidrográficas e reguladores federais, para preservar e restaurar a bacia de Catskill/Delaware (BLANCHARD; VIRA; BRIEFER, 2015). Essa abordagem envolveu a implementação de medidas de conservação, restauração e gestão da terra para proteger a qualidade da água em sua origem, reduzindo assim a necessidade de tratamento adicional. Investir na proteção da bacia hidrográfica seria mais rentável a longo prazo, e os custos iniciais foram estimados em aproximadamente US\$ 1,5 bilhões, muito menores em comparação com os custos da alternativa da nova planta

de filtragem. Além disso, a preservação da bacia hidrográfica ofereceu benefícios adicionais, como a conservação da biodiversidade, a melhoria da qualidade do ar e a proteção de ecossistemas naturais. Esses benefícios são considerados serviços ecossistêmicos e podem trazer vantagens para a saúde, o bem-estar e a resiliência das comunidades.

Os primeiros programas formais de PSA, ainda que não utilizassem esse nome, começaram a ser implementados no vale do rio Cauca, na Colômbia, em meados da década de 1990. No entanto, foi com a instituição do Programa de Pagamentos por Serviços Ambientais (*Programa de Pagos por Servicios Ambientales* - PPSA) na Costa Rica, em 1997, que o PSA ganhou destaque e influenciou outros países e atores envolvidos na gestão de recursos naturais. O exemplo da Costa Rica serviu como modelo e inspiração para a implementação de programas de PSA em outros países da América Latina. Até o ano de 2009, havia mais de 150 programas de PSA e programas similares em operação na região, conservando aproximadamente 2,5 milhões de hectares de terras. Alguns países, como Costa Rica, México e Equador, possuem programas nacionais de PSA financiados pelo governo. Além disso, a maioria dos países possui programas locais de PSA financiados pelos usuários (PAGIOLA; VON GLEHN; TAFFARELLO, 2013).

Alguns esquemas de PSA já consolidados são o Programa Conservador de Água em Extrema/MG, Programa Produtor de Água na bacia hidrográfica do Piracicaba, Capivari e Jundiá (PCJ-SP), Programa Produtores de Água e Florestas - Bacia Guandu/RJ, Programa Oásis de São Paulo/SP e Apucarana/SP, Produtor de Água do Rio Camboriú/SC, PSA às Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPPN) no estado do Paraná, Projeto Conexão Mata Atlântica no estado do Rio de Janeiro, Programa Bolsa Floresta no Amazonas e Bolsa Verde/MG. O PSA consolidou-se como um instrumento econômico, cuja essência está em remunerar quem preserva direta ou indiretamente, o meio ambiente (MMA, 2011; PAGIOLA; VON GLEHN; TAFFARELLO, 2013).

O tema PSA tem recebido atenção pronunciada nos últimos anos, culminando com a Lei Nº 14.119/2021 (BRASIL, 2021) que institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais (PNPSA) e o recente Decreto Estadual Nº 56.640 de 02 de setembro de 2022, que institui o PEPSA no Rio Grande do Sul (RIO GRANDE DO SUL, 2022).

O Quadro 1 apresenta os principais esquemas de PSA no país, com breve descrição sobre o tipo de intervenção e o monitoramento realizado.

Quadro 1 - Esquemas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) por município, tipo de intervenção e monitoramento previsto.

Programa	Tipo de intervenção	Monitoramento
Conservador de Água - MG (Extrema/MG)	Restauração florestal em Área de Preservação Permanente (APP) (matas ciliares) e conservação do solo	Quantidade e qualidade de água segundo o protocolo de monitoramento apoiado pela Agência Nacional de Águas (ANA) e vistorias periódicas para a efetivação dos pagamentos aos produtores.
Produtor de Água Bacia PCJ-SP (Nazaré Paulista e Joanópolis/SP)	Conservação dos recursos hídricos através de ações de conservação de solo; cercamento de fragmentos florestais e restauração florestal.	Vistoria técnica das atividades realizadas junto aos produtores rurais. Participação da Câmara Técnica Rural do Comitê PCJ.
Produtores de Água e Florestas - Bacia Guandu/RJ (Rio Claro/RJ)	Restauração florestal em APPs e áreas interceptoras de água; conservação de florestas e saneamento rural.	Hidrológico (nove parâmetros de qualidade, precipitação, vazão, deflúvio), Ictiofauna, Avifauna, Restauração.
Produtores de Água - Bacia Benevente / ES (Alfredo Chaves/ES)	Conservação florestal para garantir a quantidade e qualidade dos recursos hídricos.	Vistorias periódicas anuais e monitoramento realizado por coleta de dados em estações hidrológicas (turbidez, pH, temperatura e condutividade), e de forma remota, a partir de comparação de imagens de aerolevanteamento.
Produtores de Água - Bacia Guandu/ES (Afonso Cláudio e Brejetuba/ES)	Restauração florestal e conservação de florestas para conservação dos recursos hídricos.	Vistorias periódicas anuais.
Oásis - São Paulo/SP (Região metropolitana de São Paulo)	Conservação florestal visando o armazenamento de água, o controle de erosão e a manutenção e qualidade da água.	Avaliação dos aspectos: vegetação, hidrografia e manejo da propriedade, que influem no cálculo dos valores a serem recebidos pelos proprietários.
Oásis - Apucarana/PR (Apucarana/PR)	Restauração florestal para conectividade entre fragmentos florestais e unidades de conservação.	Vistoria anual da propriedade rural,
Projeto Produtor de Água do Rio Camboriú/SC (Balneário Camboriú e Camboriú/SC)	Restauração de áreas degradadas em zonas ripárias e nascentes usando plantio total de mudas de espécies nativas, enriquecimento ou condução da regeneração natural, acompanhada de cercamento para evitar fatores de degradação (pastejo). Conservação de estradas rurais não pavimentadas.	O indicador usado para mensurar os benefícios decorrentes das intervenções foi a redução da concentração de sólidos totais em suspensão (STS) na captação de água.
Campo Grande/MS	Conservação dos recursos hídricos através de ações de conservação de solo e restauração florestal, assim como de servidão florestal para Reserva Legal.	Acompanhamento técnico e fiscalização do cumprimento das medidas conservacionistas.

Programa	Tipo de intervenção	Monitoramento
PSA Juçara/SP (APA Quilombos do Médio Ribeira, RDS Lavras, RDS Barreiro-Anhemas, RDS Pinheirinhos e RDS Quilombos de Barra do Turvo).	Cultivo da palmeira juçara nas propriedades de dentro ou no entorno das Unidades de Conservação.	Acompanhamentos semestrais e o beneficiário recebe os técnicos da Fundação Florestal (SP) na área plantada
Projeto Protetor das Águas (Vera Cruz/RS)	Cercamento de áreas de nascente importantes contribuintes do Arroio Andréas e áreas ripárias (construção de obras de proteção de nascentes em propriedades rurais, construção de mais de 20 mil metros de cerca para proteção de áreas ripárias).	Leituras diárias de dados de precipitação e vazão, monitoramento de parâmetros físico-químicos e biológicos da água através de coletas mensais e realização de trabalhos de educação ambiental.

Fonte: MMA (2011); Tejeiro e Stanton (2014); Delevati e Krounbauer (2017), Kroeger *et al.* (2017).

A maior parte dos programas está relacionada aos PSA hídricos, destacando-se o Programa Produtores de Água da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), presente em vários estados. Os tipos de intervenção estão normalmente associados à restauração florestal e conservação de recursos hídricos, que acabam derivando melhores condições em termos de qualidade e quantidade não só para os cursos d'água, mas também para o controle de erosão, a conservação do solo, a regulação do clima e para o ecossistema como um todo.

As legislações estaduais têm apresentado maior dificuldade para instrumentalizar e indicar fontes de financiamento para PSA, mas a PNPSA indica a possibilidade de destinar a receita proveniente da cobrança pelo uso dos recursos hídricos para ações de PSA relacionadas à conservação e melhoria da quantidade e qualidade dos recursos hídricos, conforme estabelecido no art. 21 da referida política.

No entanto, em relação aos demais objetivos da PNPSA mencionados no art. 4º, como evitar a perda de vegetação nativa, a fragmentação de habitats, a desertificação e outros processos de degradação dos ecossistemas nativos, fomentar a conservação sistêmica da paisagem, reconhecer iniciativas individuais ou coletivas que favoreçam a manutenção, recuperação ou melhoria dos serviços ecossistêmicos, estimular a pesquisa científica relativa à valoração dos serviços ecossistêmicos e ao desenvolvimento de metodologias de execução, monitoramento, verificação e certificação de projetos de PSA, bem como fomentar o desenvolvimento sustentável, não há indicação específica de fontes de financiamento ou incentivos.

A Política Nacional estabelece diretrizes gerais para a implementação do PSA no Brasil, e é responsabilidade dos governos, em suas diferentes esferas (federal, estadual e municipal), estabelecer políticas específicas, programas e instrumentos para viabilizar o financiamento e os incentivos necessários à implementação dos objetivos propostos.

Dessa forma, a definição de fontes de financiamento e incentivos para apoiar as ações de PSA, além da cobrança pelo uso dos recursos hídricos, pode variar de acordo com as políticas e estratégias adotadas em cada jurisdição e dependerá do contexto e das prioridades estabelecidas pelas autoridades competentes. Isso pode envolver a combinação de recursos do orçamento público, projetos de cooperação internacional, projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL) e outros de geração de créditos de carbono, compensação ambiental, criação de fundos estaduais e federais específicos, dentre outras possibilidades.

Outro entrave está relacionado aos mecanismos de monitoramento e avaliação. Nos programas onde já existe monitoramento dos recursos hídricos consolidado, reflexo provavelmente da implementação dos planos de recursos hídricos e cobrança pelo uso da água, que já está implementado em muitas bacias hidrográficas nos estados de Minas Gerais e São Paulo, o monitoramento é feito com base em indicadores de qualidade e quantidade de água, com acompanhamento periódico de equipe técnica. No Programa Oásis de São Paulo, o monitoramento avalia aspectos da vegetação, hidrografia e manejo da propriedade, que são indicadores adequados para o cálculo do valor da compensação aos proprietários. Para os demais esquemas, a situação encontrada foi de indefinição quanto ao tipo de monitoramento e imprecisão quanto aos indicadores aplicados.

2.2 AVALIAÇÃO DO USO E COBERTURA DA TERRA

Mudanças no uso e cobertura da terra podem ser entendidas como a forma pela qual o espaço geográfico é ocupado pela sociedade, e o levantamento dessas transformações é fundamental para a compreensão dos padrões de evolução socioambiental de uma área.

Essas modificações no uso e cobertura da terra fazem parte da dinâmica dos mais diversos tipos de ambientes e muitas vezes são resultantes de agentes naturais, mas tornaram-se mais intensas ao longo das últimas décadas, em decorrência de ações antrópicas adversas. Tais mudanças podem ter como objetivo apresentar melhorias para a sociedade, mas na maioria das vezes refletem a falta de planejamento em escala local e regional, trazendo como consequência impactos nocivos e irreversíveis para o meio ambiente.

Neste trabalho será adotado o termo uso e cobertura da “terra” - em detrimento de uso e cobertura do “solo” - pois define de forma mais apropriada a utilização cultural da terra (NOVO, 1989), sendo a ação antrópica responsável pela utilização dos seus recursos e modificação do espaço geográfico (SANTOS; PIROLI, 2015).

O conceito de “terra” é mais abrangente, pois envolve

elementos da biosfera, incluindo o solo, a geologia, a hidrologia (inclusive lagos, rios, pântanos e mangues), a população vegetal e animal, o modelo de assentamento humano e os resultados físicos da atividade humana do passado e de presente (terraceamento, armazenamento de água ou estruturas de drenagem, estradas etc.). Nesta abordagem holística, uma unidade de terra tem tanto um componente vertical - desde o clima atmosférico até os aquíferos confinados no substrato mais profundo - quanto um elemento horizontal - uma sequência identificável de solo, terreno e elementos de uso da terra e hidrológicos ("paisagem" ou "unidade de terra") (ARAÚJO, 2005, p. 17).

A convicção da ação antrópica sobre o meio ambiente resultou no conceito de Antroma (ELLIS *et al.*, 2010), ou Bioma Antropogênico, para classificar os biomas impactados pelo alto grau de modificações nas estruturas naturais do planeta desde os anos 1700.

Atualmente, e cada vez mais no futuro, a forma e o processo dos ecossistemas terrestres na maioria dos biomas serão predominantemente antropogênicos, produto do uso da terra e de outras interações humanas diretas com os ecossistemas (ELLIS *et al.*, 2010). Modificações de habitat, extinção de plantas e animais, sedimentação, erosão, por exemplo, já são processos antropogênicos que superam os processos naturais (TOLEDO; VIEIRA, 2017).

Cientistas têm se empenhado em definir a marca da primeira evidência clara do Antropoceno², entendido como uma nova época geológica que marca o início da ação humana sobre a alteração da vida no planeta com várias formas de materiais industriais e radioativos que passaram a ser utilizados na década de 1950. A formalização do Antropoceno uniria esforços para estudar a influência das pessoas nos sistemas da Terra, em campos como climatologia e geologia, e a transição para uma nova época também pode persuadir os formuladores de políticas a levar em consideração o impacto dos humanos no meio ambiente durante a tomada de decisões (PRILLAMAN, 2022).

As transformações decorrentes da interferência do ser humano sobre a natureza podem ser analisadas a partir da interpretação de dados do sensoriamento remoto, que apresentam cada vez mais avanços tecnológicos e permitem aprimorar as feições imageadas e transformá-las em mapas de uso e cobertura da terra, tornando-se ferramenta eficaz para as atividades de planejamento regional ou local, tomada de decisões e gestão ambiental (LEITE; ROSA, 2012; ROSA, SOUZA, SÁNCHEZ, 2020), permitindo melhorar as condições para que ocorra o desenvolvimento almejado pelas políticas setoriais com o mínimo de sustentabilidade ambiental.

A geração de dados de uso e cobertura da terra parte da interpretação visual de imagens, que podem ser fotográficas ou compostas por *pixels*. A composição dessas imagens resulta em ‘mapas temáticos’, que por sua vez são constituídos por

² O termo "Antropoceno" foi criado nos anos 1980 pelo biólogo norte-americano Eugene Stoermer e popularizado na década de 2000 por Paul Crutzen, o cientista atmosférico holandês e vencedor do Prêmio Nobel de Química de 1995. Eles argumentaram que a era geológica atual, o Holoceno, não era mais adequada para descrever a condição do planeta devido à influência humana generalizada. A proposta do Antropoceno como uma nova época geológica é objeto de debate entre os cientistas. Alguns argumentam que o Antropoceno já começou e apontam para evidências como o aumento das concentrações atmosféricas de dióxido de carbono, a perda acelerada de biodiversidade e as mudanças nos padrões de sedimentação. No entanto, para uma nova época ser aceita pelos estratigrafistas, seria necessário existir uma ruptura observável e universal entre as camadas sedimentares de duas épocas. Embora o carbono antropogênico esteja presente em sedimentos desde os anos 1850, isso não foi considerado suficiente. Com isso, o Grupo de Trabalho sobre o Antropoceno (Anthropocene Working Group-AWG) propôs uma mudança de época em 1950, ano a partir do qual vários componentes químicos e partículas de plástico de origem antrópica começaram a aparecer nos sedimentos. Nota-se que o ano de 1950 é também o início da grande aceleração, quando todos os indicadores disponíveis sobre consumo de recursos primários, uso de energia, aumento populacional, atividade econômica e degradação da biosfera aumentaram de forma considerável após a Segunda Guerra Mundial. O reconhecimento oficial do Antropoceno como uma nova época geológica ainda está em discussão por grupos como a Comissão Internacional de Estratigrafia, que é responsável por definir as divisões formais do tempo geológico (ISSBERNER; LÉNA, 2018).

polígonos que representam características específicas, como tipo de solo, cobertura vegetal, corpos d'água ou uso da terra (NOVO, 1989).

O sensoriamento remoto utiliza sensores para captação e registro da energia refletida ou emitida por uma determinada superfície à distância, sem necessidade de contato direto, registrando esse resultado em formatos digitais como uma imagem, por exemplo, que pode ser processada em um Sistema de Informação Geográfica (SIG) (FITZ, 2008). Dadas essas peculiaridades, obtém-se uma relação de complementaridade entre o produto do sensoriamento remoto e o SIG, entendido como ferramenta imprescindível para a organização e processamento dessas imagens.

Como resultado desse processamento de imagens, torna-se possível visualizar e identificar feições através de elementos geométricos, como polígonos, por exemplo, que podem traduzir informações de uso e cobertura da terra, sendo a expressão da informação mais acessível da imagem de satélite (LEITE; ROSA, 2012). Segundo esses autores,

Uso, ocupação e cobertura da terra podem ser sintetizados através de mapas. Estes indicam a distribuição espacial da tipologia da ação antrópica que pode ser identificada pelos seus padrões homogêneos característicos na superfície terrestre através de análise em imagens remotamente sensoriadas. Sua identificação, quando atualizada, é de grande importância ao planejamento e orienta à ocupação da paisagem, respeitando sua capacidade de suporte e/ou sua estabilidade/vulnerabilidade (p. 91)

Modificações em uma área e tendências de organização do espaço podem ser monitoradas e avaliadas através do uso e cobertura da terra, que podem ser transformadas mais intensamente pela ação antrópica ou de forma mais amena quando as dinâmicas do meio ambiente seguem seu curso natural (LEITE; ROSA, 2012).

A trajetória dessas mudanças expressa as relações socioeconômicas existentes, e revela como a sociedade se apropria e se articula com a natureza, imprimindo sua marca através do histórico de ocupação, que reflete as prioridades sociais e culturais de uma sociedade (MOURA; MORAN, 2017). Além desses fatores, notabilizam-se os aspectos econômicos, que estão diretamente atrelados ao suprimento das demandas da sociedade, seja pela produção de alimentos, matéria-prima, recursos genéticos, serviços urbanos ou produção industrial.

Processos erosivos de maior intensidade, inundações, escorregamentos, ocupação urbana desordenada, plantios agrícolas em nível industrial, levam à degradação do meio ambiente em proporções alarmantes, que podem ter poucas alternativas de reversão. O mapeamento dessas mudanças pode ser mensurado através de produtos do sensoriamento remoto, que se tornaram uma importante ferramenta que disponibiliza informações de monitoramento dos recursos naturais do planeta (FERREIRA; PEREIRA FILHO, 2009).

O arranjo e a avaliação de uso e cobertura da terra pode ter diferentes dimensões – espacial, temporal, socioeconômica e demográfica regional – que, combinadas a um sistema de base de dados georreferenciados, permitem a compreensão da evolução do espaço em um tempo definido (BATISTELLA; MORAN, 2005).

Mapear, monitorar e avaliar os diferentes usos e cobertura da terra são essenciais para identificar cenários apropriados ao planejamento e ordenamento territorial, abrindo possibilidades para acompanhamento de cenários atuais e previsão de cenários futuros (VASCONCELOS; RUIVO; LIMA, 2017).

Diversos produtos trazem o mapeamento de uso e cobertura da terra no país, destacando-se os monitoramentos de uso e cobertura da terra do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2015; 2018; 2020; 2021), portal TerraBrasilis desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) que permite acessar dados de monitoramento da vegetação nativa do (ASSIS *et al.*, 2019), e alguns que tratam especificamente do bioma Pampa para os anos 2002 (HASENACK; CORDEIRO; WEBER, 2015), 2009 (WEBER *et al.*, 2016) e 2015 (HOFMANN; WEBER; HASENACK, 2018). A elaboração dessa cartografia é fundamental à avaliação no tempo e espaço, mas necessita de atualizações com maior regularidade e dados de série temporal de alta resolução espacial para melhor compreender o uso histórico e a dinâmica da cobertura da terra, e os impactos subsequentes nos biomas do país (SOUZA *et al.*, 2020).

Ainda que contenham relativas limitações, esses mapeamentos sistemáticos servem como suporte para que novos dados com maior coerência sejam produzidos, tanto na escala temporal, quanto na espacial. Um dos projetos de referência que contempla essas demandas de sistematização espaço-temporal é o MapBiomas, que tem origem com o mapeamento do uso e cobertura da terra. A cada etapa a

metodologia evolui e, além do uso e cobertura da terra, o projeto passou a disponibilizar dados de desmatamento e crescimento da vegetação secundária, evolução das áreas de mineração industrial e garimpo, irrigação e qualidade da pastagem, impacto do fogo e redução de superfície da água (MAPBIOMAS, 2022).

Os recursos naturais estão cada vez mais ameaçados em todo o mundo, pois as mudanças de uso e cobertura da terra vêm sendo conduzidas por novas demandas, destacando-se a crescente procura por *commodities*, sendo a soja uma das principais (SILVA *et al.*, 2021). Ao longo de muitos séculos essa planta oleaginosa consolidou-se como fonte de alimentação humana e animal na China, mas foi a partir da década de 1970 que se transformou em um cultivo de *commodities* para uso industrial, explicado pelo aumento da demanda para alimentação do setor pecuário, que teve por sua vez maior procura em função do enriquecimento da população chinesa nas últimas três décadas, que passou a consumir mais proteína animal (OLIVEIRA; SCHNEIDER, 2016; YORK; GOSSARD, 2004).

A agricultura é responsável pela maior parte da utilização de recursos naturais como terra e água, e em grande parte também pela transformação de produtos químicos, minerais e combustíveis fósseis, gerando impactos de grande magnitude e intensidade sobre o meio ambiente (OLIVEIRA, 2012).

A propagação de uma agricultura voltada para um único cultivo traz como consequência a perda da diversidade de ecossistemas, além da limitação da dieta humana e animal e até perda de práticas culturais, levando ao aumento dos custos da produção agrícola, vulnerabilidade a pragas e espécies invasoras, erosão e exaustão dos solos, mudanças climáticas, findando no colapso do sistema produtivo, insegurança alimentar e degradação dos ecossistemas, até que os custos para sua recuperação sejam altos demais ou inclusive irreversíveis (OLIVEIRA, 2012).

A produção dessa agricultura de larga escala, como no caso da soja, acaba tornando a área de cultivo um ambiente comprometido, onde a diversidade de culturas cede lugar a uma única espécie, produzindo um ecossistema artificial totalmente dependente de manejo e insumos agrícolas para aquele fim. A intensificação da produção da monocultura agrava os problemas ambientais, produzindo maior erosão e perda de fertilidade dos solos, esgotamento de reserva de nutrientes, salinização e alcalinização dos solos, poluição dos recursos hídricos e ocupação de terras férteis para expansão urbana, perda de colheitas, plantas silvestres e recursos genéticos,

ressurgimento de pragas e resistência genética a pesticidas, contaminação química e destruição de mecanismos naturais de controle (ALTIERI, 2002).

Fatores socioeconômicos, históricos e culturais são os condutores da ocupação do espaço, e a intensificação da ocupação urbana, expansão das fronteiras agrícolas sobre áreas preservadas e a crescente complexidade das redes de comunicação e transportes geram impactos sobre o meio ambiente, acarretando em mudanças climáticas, perda da biodiversidade, poluição do ar, da água e dos solos (IBGE, 2020).

Estimativas apontam que as áreas urbanizadas no país passaram de 1,2 milhão de hectares para 3,7 milhões de 1985 a 2021 (MAPBIOMAS, 2022), sendo que grande parte dessa expansão ocorre de maneira desordenada e sem planejamento, ocasionando impactos diretos sobre o consumo de recursos naturais e alteração da qualidade de vida.

O levantamento do MapBiomass sobre as áreas urbanizadas no Brasil também mostrou que, entre 1985 e 2021, a maior expansão delas ocorreu sobre as áreas de uso agropecuário: dos 2,5 milhões de hectares que foram urbanizados, 67,8% avançaram sobre o uso agropecuário. O estudo também mostrou que houve perda de 22,2% de formações naturais para áreas urbanas, mas há ressalva sobre os biomas Pampa e Pantanal, que se destacaram por apresentar maior proporção de vegetação nativa em áreas urbanas, em relação aos demais biomas no país (MAPBIOMAS, 2022).

Através de monitoramento sistemático e periódico é possível espacializar e quantificar as alterações, permitindo adotar critérios que levem a melhorias da condição ambiental de uma área, que podem servir como instrumento de suporte e orientação às ações de planejamento, além de fundamentar estudos de avaliação de impacto ambiental, ordenamento territorial ou avaliação de serviços ecossistêmicos (IBGE, 2020).

2.3 SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS

Os serviços ecossistêmicos são os serviços prestados pelos ecossistemas naturais e as espécies que os compõem, na sustentação e preenchimento das condições de permanência da vida humana na Terra (DAILY, 1997), ou de forma mais simplificada - e mais utilizada - são os benefícios que os seres humanos obtêm da

natureza, segundo a Avaliação Ecosistêmica do Milênio (MEA, 2005). Inserem-se neste contexto tanto os ecossistemas naturais quanto os modificados pelo homem como fonte de recursos de serviços ecossistêmicos, sendo usado o termo “serviços” para abranger os benefícios tangíveis e intangíveis que os seres humanos obtêm dos ecossistemas, que às vezes são separados em “bens” e “serviços”, respectivamente (COSTANZA *et al.*, 1997).

O conceito de serviços ecossistêmicos vem sendo debatido desde que adquiriu maior relevância e passou a estar presente em muitas publicações após 1997. Para melhor compreensão desta abordagem, deve-se ter em mente a distinção entre processos e funções do ecossistema, e serviços do ecossistema:

*Os processos e funções do ecossistema contribuem para os serviços do ecossistema, mas não são sinônimos. Os processos e funções dos ecossistemas descrevem as relações biofísicas que existem, independentemente de os seres humanos se beneficiarem ou não. Por outro lado, os serviços ecossistêmicos são aqueles processos e funções que beneficiam as pessoas, consciente ou inconscientemente, direta ou indiretamente. Eles existem apenas se contribuem para o bem-estar humano e não podem ser definidos de forma independente. (...) No entanto, as conexões entre processos e funções do ecossistema e bem-estar humano são complexas e os vários caminhos ainda não são bem compreendidos, sendo necessário adotar uma abordagem pluralista e preventiva para avaliar essas conexões e avaliar os benefícios. Não existe uma maneira correta de avaliar e valorizar os serviços ecossistêmicos. Existe, no entanto, uma maneira errada, ou seja, de não fazer nada (COSTANZA *et al.*, 2017, p. 3).*

O problema relacionado a mudanças nestes serviços afeta o bem-estar humano de várias formas. O bem-estar humano tem constituintes múltiplos, incluindo materiais básicos para uma vida boa, liberdade de escolha, saúde, boas relações sociais e segurança. Bem-estar é o oposto da pobreza, definida como a “privação pronunciada de bem-estar”. Os componentes do bem-estar, vividos e percebidos pelas pessoas, são dependentes da situação, refletindo a geografia local, a cultura e as circunstâncias ecológicas (MEA, 2005).

No contexto da América Latina, a Plataforma Intergovernamental sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos (IPBES) elaborou o Relatório Regional de Avaliação de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos para as Américas (IPBES, 2019). O documento foi elaborado com a participação e colaboração de 104 especialistas de 21 países, sendo 12 brasileiros, e se destina a formulação de políticas públicas. O IPBES é uma organização independente criada para fornecer conhecimento científico e assessoramento político sobre a biodiversidade e os

serviços ecossistêmicos. Assim como o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), o IPBES tem como objetivo informar as tomadas de decisões dos governos relacionadas à conservação da biodiversidade, ao bem-estar humano e ao desenvolvimento sustentável, sendo coordenado por quatro agências das Nações Unidas: Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO), Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) e Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD). A Plataforma conta com a participação de 127 países membros, que colaboram para a produção de avaliações científicas e relatórios sobre a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos em nível global, regional e sub-regional. Essas avaliações fornecem uma base científica sólida para a elaboração de políticas, visando à conservação da biodiversidade, à proteção dos ecossistemas e à promoção do desenvolvimento sustentável, levando em consideração a relação entre a natureza e o bem-estar humano. O IPBES desempenha um papel crucial na conscientização global sobre a importância da biodiversidade e no fornecimento de diretrizes para ações que visem sua preservação e uso sustentável.

O último Relatório de Avaliação Regional sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos para as Américas (IPBES, 2019), concluiu que as Américas são dotadas de uma capacidade muito maior da natureza para contribuir para a qualidade de vida das pessoas do que a média global, e que o valor econômico das contribuições terrestres da natureza para as pessoas é estimado em pelo menos US\$ 24,3 trilhões por ano, equivalente ao produto interno bruto da região. A Avaliação também concluiu que, embora muitos aspectos da qualidade de vida estejam melhorando nas escalas regional e sub-regional, a maioria dos países das Américas está usando a natureza a uma taxa que excede a capacidade da natureza renovar as contribuições que faz à qualidade de vida. O Relatório avalia ainda a situação da segurança alimentar, hídrica e energética. Conclui que enquanto a produção agrícola, pesca e aquicultura continuam a aumentar, isso ocorre, em alguns casos, à custa de outros aspectos importantes das contribuições da natureza para as pessoas; que há declínio no abastecimento de água per capita e uso insustentável generalizado de águas superficiais e subterrâneas em muitas partes da região; e que a produção de

bioenergia pode competir com a produção de alimentos e a vegetação natural, podendo ter consequências sociais, econômicas e ecológicas adversas.

A Avaliação constatou que a biodiversidade e as condições dos ecossistemas nas Américas estão diminuindo, resultando em uma redução das contribuições da natureza para a qualidade de vida das pessoas. Os indutores de mudança indiretos incluem tendências populacionais e demográficas, crescimento econômico e sistemas de governança fracos e desigualdade, enquanto os indutores diretos dominantes incluem conversão de habitat, fragmentação e superexploração/colheita excessiva. A mudança climática é reconhecida como se tornando cada vez mais importante, amplificando os outros fatores diretos (IPBES, 2019).

Os próximos itens apresentam a base conceitual sobre SE (item 2.3.1), o Capital natural e valoração de serviços ecossistêmicos (item 2.3.2) Categorização dos serviços ecossistêmicos (item 2.3.3) e Mapeamento e avaliação de serviços ecossistêmicos (item 2.3.4) que constituem as bases para a composição da análise na BHLG.

2.3.1 Base conceitual

O termo 'serviços da natureza' apareceu pela primeira vez na literatura acadêmica em um artigo de 1977 na Revista Science intitulado 'Quanto valem os serviços da natureza?' (WESTMAN, 1977). No entanto, temas relacionados vinham surgindo na literatura acadêmica há mais tempo, e a ideia de que os sistemas naturais fornecem benefícios que apoiam o bem-estar da humanidade é tão antiga quanto sua própria existência (COSTANZA *et al.*, 2017).

Posteriormente foram publicados dois estudos pioneiros sobre os serviços ecossistêmicos: uma edição do livro *Serviços da Natureza* (DAILY, 1997) e um artigo publicado na Revista *Nature* por um grupo de ecologistas e economistas (COSTANZA *et al.*, 1997) que propôs o valor dos serviços ecossistêmicos no mundo. Estes dois estudos foram o ponto de partida para uma profusão de pesquisas importantes em âmbito internacional (BAGSTAD *et al.*, 2013; DAILY *et al.*, 2000; DE GROOT *et al.*, 2002; MAES *et al.*, 2012, 2016) e consolidaram a existência de periódicos científicos especializados, como a revista *Ecosystem Services* (COSTANZA *et al.*, 2017).

Além desses dois estudos precursores, destaca-se a proposta de mapeamento e avaliação dos ecossistemas e seus serviços como suporte para a

Estratégia da Biodiversidade da União Europeia (UE) para 2020, elaborada por Maes e colaboradores (2016).

No estudo coordenado pela cientista ambiental Gretchen Daily (1997), cientistas das mais diversas especialidades manifestaram suas opiniões com base em embasamento técnico, interesses pessoais e experiências de vida, orientados, contudo, por um conjunto de premissas em comum. Primeiramente, eles compartilharam a ideia de que, embora a civilização estivesse seguindo um curso perigoso, seu destino não estava selado, e que a aproximação do século XX representava um período da história que demandaria não somente um olhar profundo sobre as crises existentes, mas um desafio para o futuro da humanidade. Em seguida, perceberam que a sociedade estaria pobremente equipada para avaliar os compromissos ambientais, e que manter uma base única social, econômica e política acarretaria uma ameaça ambiental, econômica e de segurança política, sendo unânime o senso de urgência para desenvolver uma estrutura analítica e institucional para informar e estabelecer uma resolução sensata para os denominados *trade-offs*. Esta estrutura deveria assegurar a proteção da principal fonte de bem-estar da humanidade: os sistemas de suporte à vida na Terra. Essa publicação, reveladora em 1997, continua eficazmente oportuna para os dias atuais, demonstrando que pouco se avançou em termos de preservação ambiental, e que a corrida contra o tempo se torna cada vez mais diminuta.

O conceito de *trade-off* é recorrente e de fundamental importância para a compreensão das relações entre os serviços ecossistêmicos. A definição utilizada pela Avaliação Ecosistêmica do Milênio (MEA, 2005) corresponde a ‘compromisso’. Rodríguez *et al.* (2006, p. 2) estabelecem que

Os trade-offs dos SE surgem das escolhas de manejo feitas pelos seres humanos, que podem mudar o tipo, a magnitude e a combinação relativa dos serviços prestados pelos ecossistemas. Os trade-offs ocorrem quando o fornecimento de um SE é reduzido como consequência do aumento do uso de outro SE. Em alguns casos, uma compensação pode ser uma escolha explícita; mas em outros, os trade-offs surgem sem premeditação ou mesmo consciência de que estão ocorrendo. Os trade-offs em ES podem ser classificados em três eixos: escala espacial, escala temporal e reversibilidade. A escala espacial analisa se os efeitos do trade-off são sentidos localmente ou em um local distante. A escala temporal observa se os efeitos ocorrem de forma relativamente rápida ou lenta. A reversibilidade expressa a probabilidade de que o SE perturbado possa retornar ao seu estado original se a perturbação cessar. (...) As políticas podem então ser desenvolvidas para levar em conta as compensações de ES em múltiplas escalas espaciais e temporais. Estratégias bem-sucedidas reconhecerão as

complexidades inerentes ao gerenciamento de ecossistemas e trabalharão para desenvolver políticas que minimizem os efeitos das compensações de SE.

Daily (1997, p. 1) comenta sobre:

Em escala local, os trade-offs entre atividades concorrentes e entre interesses individuais e sociais, estariam se tornando cada vez mais evidentes. Em praticamente qualquer comunidade, a alocação de terra ou água para várias atividades geralmente resulta em um 'jogo de soma zero', que fica evidente na perda generalizada de terras agrícolas e água para fins urbanos e industriais.

Segundo Turkelboom et al. (2016, p. 1)

O termo trade-off envolve a perda de uma qualidade ou aspecto de algo em troca da obtenção de outra qualidade ou aspecto. Atualmente é utilizado para situações em que é necessário fazer uma escolha entre duas ou mais coisas que não podem ser feitas ao mesmo tempo. Trade-off também é um termo muito popular na literatura sobre SE, mas abrange uma gama mais ampla de fenômenos, como usos conflitantes da terra, uma correlação negativa entre ocorrências espaciais, incompatibilidades, rivalidade e exclusividade de SE, etc.

Em síntese, a ideia de *trade-off* dos SE utilizada nesta pesquisa se traduz pela escolha de uma opção em detrimento de outra, que ocorrem quando a oferta de um SE é reduzida como consequência do aumento do uso de outro SE.

Os SE estão presentes em todas as atividades humanas, não somente aquelas relacionadas à natureza, mas nas mais diversas ações de desenvolvimento socioeconômico da sociedade:

Os serviços ecossistêmicos correspondem às condições e aos processos pelos quais os ecossistemas naturais e as espécies que os compõem sustentam e preenchem a vida humana. Eles mantêm a biodiversidade e a produção dos bens ecossistêmicos, como frutos do mar, forragem, madeira, combustível de biomassa, fibra natural, produtos farmacêuticos, produtos industriais e seus precursores. O cultivo e a comercialização desses bens representam uma importante parte da economia familiar humana. Além da produção de bens, os serviços ecossistêmicos seriam na verdade as próprias funções de suporte da vida, como a purificação do ar e da água, mitigação de inundações e secas, desintoxicação e decomposição de resíduos, geração, renovação e fertilidade do solo, polinização de cultivos e de vegetação natural, controle da grande maioria das pragas agrícolas em potencial, dispersão de sementes e translocação de nutrientes, manutenção da biodiversidade, que a humanidade deriva elementos chave para sua agricultura, medicina e indústria, proteção do calor dos raios ultravioletas do sol, estabilização parcial do clima, moderação de temperaturas extremas e da força dos ventos e das ondas, além de conferirem muitos benefícios estéticos e culturais intangíveis, como suporte de diversas culturas humanas, fornecimento de beleza estética e estímulo intelectual que elevam o espírito humano (DAILY, 1997, p. 3).

A falta de conscientização, de informação e o distanciamento em relação ao fornecimento de bens e serviços providos pelos ecossistemas, induz a sociedade de maneira geral a manter-se indiferente ao tema. Os serviços podem se tornar escassos em um nível crítico, impactando diretamente a vida das pessoas:

Os serviços ecossistêmicos também ganharam reconhecimento e valorização por meio de esforços para substituí-los por tecnologia. O uso excessivo de pesticidas, por exemplo, levando à dizimação de inimigos naturais de pragas e à promoção concomitante de espécies anteriormente benignas ao status de pragas, tornou aparente a dependência da agricultura pelos serviços de controle de pragas naturais. Os problemas técnicos e o custo dos sistemas hidropônicos - muitas vezes proibitivos mesmo para o cultivo de produtos especiais de alto preço - destacam a dependência humana dos serviços ecossistêmicos fornecidos pelo solo. É provável que a sociedade valorize mais os serviços listados acima e descubra (ou redescubra) uma gama de serviços não listados, à medida que os impactos humanos sobre o meio ambiente se intensificam e os custos e limites da substituição tecnológica se tornam mais aparentes. Serviços ecossistêmicos são absolutamente essenciais à civilização, mas a vida urbana moderna torna obscura sua existência (DAILY, 1997, p. 6)

No outro estudo precursor, conduzido por Robert Costanza e colaboradores (1997), foi avaliado o valor dos serviços ecossistêmicos no planeta. Uma grande e dispersa quantidade de informações sobre os serviços ecossistêmicos foi reunida e processada de forma a ser empregada por ecologistas, economistas, decisores políticos e público em geral. A partir desta síntese, os autores estimaram valores para os serviços ecossistêmicos por unidade de área por bioma, multiplicaram pela área total de cada bioma e somaram sobre todos os serviços e biomas.

Ainda que tenha ficado evidente para os autores os problemas empíricos e conceituais inerentes à produção dessa estimativa, este exercício foi essencial para: (1) tornar a gama de valores potenciais dos serviços ecossistêmicos mais aparente; 2) estabelecer pelo menos uma primeira aproximação da magnitude relativa de serviços ecossistêmicos globais; (3) estabelecer uma estrutura para suas futuras análises; (4) apontar as áreas que mais necessitam de pesquisa; e (5) estimular pesquisas e debates adicionais. As funções do ecossistema referem-se de várias formas ao habitat biológico ou propriedades do sistema, ou processos dos ecossistemas. Bens do ecossistema (como alimentos) e serviços (como a assimilação de resíduos) representam os benefícios que as populações humanas derivam, direta ou indiretamente, de funções do ecossistema. Para simplificar, os conceitos de bens e serviços ecossistêmicos foram unificados para serviços ecossistêmicos (COSTANZA et al., 1997, p. 253).

Estes estudos pioneiros levaram a uma pluralidade de trabalhos nos mais distintos lugares e especificidades (BAGSTAD; SEMMENS; WINTHROP, 2013; CABRAL et al., 2016; DE LIMA et al., 2018; LEITÃO; SANTOS; ARAGÃO, 2017;

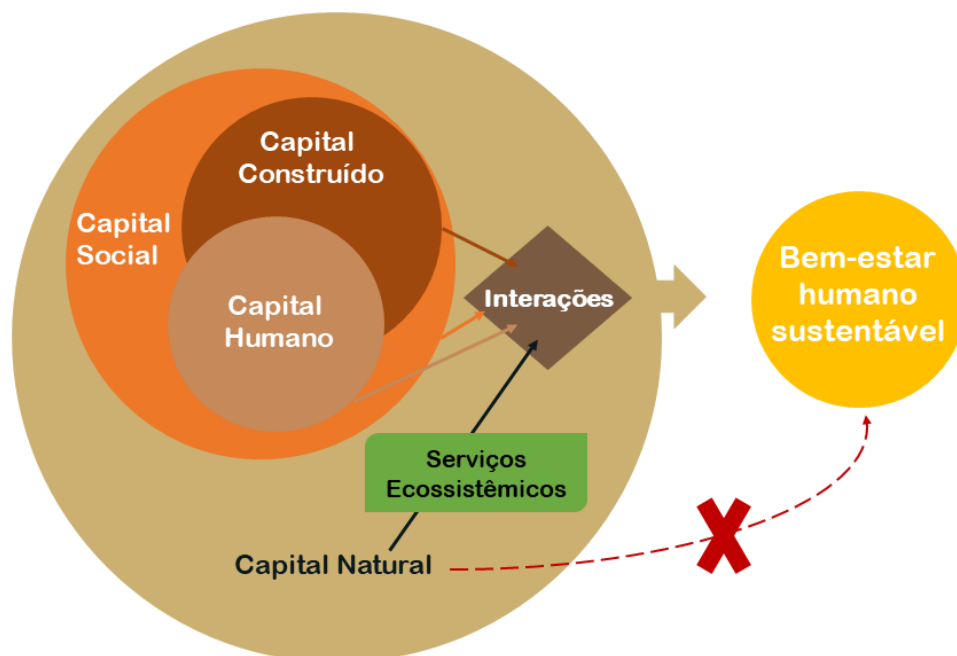
MARTINEZ-HARMS *et al.*, 2017) e colocaram em evidência o conceito de capital natural.

2.3.2 Capital natural e valoração de serviços ecossistêmicos

Os ecossistemas que fornecem os serviços, às vezes, costumam ser denominados de "capital natural", usando a definição geral de capital como um estoque que gera um fluxo de serviços ao longo do tempo (COSTANZA; DALY, 1992). Para que esses benefícios sejam alcançados, o capital natural (que não requer atividade humana na construção ou manutenção) deve interagir com outras formas de capital que exigem a interferência da atuação humana, a saber: (1) capital construído ou fabricado; (2) capital humano; e (3) capital social ou cultural (COSTANZA *et al.*, 2017).

A Figura 3 mostra as interações entre capital construído, social, humano e natural, e como eles atuam sobre o bem-estar humano

Figura 3 - A interação entre capital construído, social, humano e natural afeta o bem-estar humano.



Fonte: Elaborado pela autora. Adaptado de Costanza *et al.* (2014).

O capital construído e o capital humano (a economia), estão incorporados na sociedade (capital social), que está incorporada no restante da natureza (capital natural). Os serviços ecossistêmicos são a contribuição relativa do capital natural para o bem-estar humano, eles não fluem diretamente. Portanto, é essencial adotar uma perspectiva ampla e transdisciplinar para abordar os serviços ecossistêmicos. Esses quatro tipos gerais de capital são necessários em combinações complexas para produzir benefícios humanos. Os serviços ecossistêmicos se referem, portanto, à contribuição relativa do capital natural para a produção do bem-estar humano sustentável, em interação com as outras formas de capital. Esses serviços não fluem simplesmente para o bem-estar humano sem essas interações cruciais. Como consequência, entender, modelar, medir e gerenciar serviços ecossistêmicos requer uma abordagem muito transdisciplinar (COSTANZA et al., 2017, p. 4-5).

Costanza e colaboradores (1997) abordaram a questão das interações entre SE e capital natural considerando a escala local e global:

É significativo perguntar como as mudanças na quantidade ou qualidade de vários tipos de capital natural e serviços ecossistêmicos podem ter impacto no bem-estar humano. Tais alterações incluem pequenas mudanças em grandes escalas e grandes mudanças em pequenas escalas. Por exemplo, alterar a composição gasosa da atmosfera global em uma pequena quantidade pode ter efeitos de mudança climática em larga escala que afetaria a viabilidade e o bem-estar da população humana global. Grandes mudanças em pequenas escalas incluem, por exemplo, alterações drásticas na composição florestal local. Essas transformações podem alterar drasticamente os ecossistemas terrestres e aquáticos, impactando os benefícios e custos das atividades humanas locais. Em geral, mudanças em formas particulares de capital natural e serviços ecossistêmicos alterarão os custos ou benefícios da manutenção do bem-estar humano (p. 255).

O conceito de capital natural está atrelado a aspectos econômicos, e muitas vezes a valoração dos serviços ecossistêmicos é criticada por conotar a 'precificação' da natureza. Valorar, no sentido de atribuir valor, está intrinsecamente relacionado a escolhas e decisões feitas sobre sistemas ecológicos

Ainda que se argumente que a avaliação dos ecossistemas seja impossível ou imprudente, e que não é possível estabelecer valores "intangíveis" para a vida humana, a estética ambiental ou os benefícios ecológicos a longo prazo, por exemplo, isso acaba sendo feito todos os dias. Quando são estabelecidos padrões de construção para rodovias, pontes e afins, valoriza-se a vida humana (reconhecida ou não) porque gastar dinheiro em obras de infraestrutura pode salvar vidas. Outro argumento frequente é que os ecossistemas devem ser protegidos por razões puramente morais ou estéticas, e não seriam necessárias avaliações de ecossistemas para esse fim. Mas há argumentos morais igualmente convincentes que podem estar em conflito direto com o argumento moral de proteger ecossistemas, como por exemplo, o argumento moral de que ninguém deve passar fome. Mas os argumentos morais e econômicos não são mutuamente excludentes, podendo ocorrer paralelamente. Portanto, embora a avaliação do ecossistema seja difícil e repleta de incertezas, uma escolha que deve ser descartada é se uma avaliação é necessária ou não. Em vez disso, as decisões tomadas como sociedade sobre ecossistemas implicam avaliações (embora não necessariamente expressas em termos monetários). Pode-se

optar por tornar essas avaliações explícitas ou não, mas todas as decisões tomadas em termos ambientais acabam indo em direção a um processo de avaliação (COSTANZA et al., 1997, p. 255).

Mudanças na qualidade ou na quantidade de SE têm valor na medida em que alteram os benefícios associados às atividades humanas ou alteram os custos dessas atividades:

Estas alterações nos benefícios e custos têm um impacto sobre o bem-estar humano através de mercados estabelecidos ou através de atividades sem mercado. Por exemplo, um recife de corais fornece habitat para peixes. Um dos aspectos de seu valor consiste em aumentar e concentrar os estoques de peixes. Um efeito da mudança na qualidade ou na quantidade do recife de corais seria percebido em mercados de pesca comercial ou de pesca recreativa. Mas outros aspectos do valor dos recifes de corais, como mergulho recreativo e conservação da biodiversidade, não apareceriam completamente nos mercados. Florestas fornecem madeira através de mercados bem estabelecidos, mas os valores de habitat associados às florestas também são sentidos através de atividades recreativas não comercializadas. As cadeias de efeitos dos serviços ecossistêmicos ao bem-estar humano podem variar de extremamente simples a extremamente complexas. As florestas fornecem madeira, mas também retêm solos e umidade, e criam microclimas, os quais contribuem para o bem-estar humano de maneiras complexas e geralmente não comercializadas (COSTANZA et al., 1997, p. 255).

A maior parte dos benefícios recebidos pelos SE encontram-se disponíveis na natureza, são públicos, gratuitos, não comercializados em mercados específicos. São fundamentais para a manutenção da vida humana, como o ar que se respira, a água para diversos usos, a ciclagem de nutrientes, a regulação do clima, a beleza de uma paisagem. Estão disponíveis sem necessidade de manejo ou interferência humana, e grande parte das pessoas não tem ciência desses benefícios. A exemplo da ciclagem de nutrientes,

Os solos estão no centro dos ciclos biogeoquímicos que transformam, transportam e renovam as fontes dos nutrientes minerais (tão essenciais para o crescimento das plantas terrestres). À medida que cada nutriente passa pelo solo, um determinado átomo pode assumir diferentes formas químicas, cada uma com características e comportamentos específicos que interferem no desenvolvimento do solo e, também, do ecossistema como um todo. Para alguns elementos como o nitrogênio e o enxofre, os ciclos biogeoquímicos são extremamente complexos, pois não implicam apenas em diversas transformações biologicamente intermediadas pelo solo, mas em vários movimentos de gases, partículas sólidas e soluções aquosas. Para o fósforo, a ciclagem inclui também um fascinante conjunto de complexas interações entre os processos químicos e biológicos. Para o cálcio, o magnésio e o potássio, o intemperismo de minerais e as reações de troca catiônica predominam nos seus ciclos. Para os micro nutrientes, a mobilidade e a biodisponibilidade são controladas principalmente pelo pH do solo, pelo potencial redox e pelas reações com compostos orgânicos solúveis. Todos esses ciclos têm importante impacto não somente na fertilidade do solo, mas também no equilíbrio saudável dos ecossistemas aquáticos e na saúde e

sobrevivência dos seres humanos. Essa ciclagem de nutrientes explica por que a vegetação (e, indiretamente, os animais) pode continuamente remover os nutrientes de um solo por milênios, sem esgotar suas fontes de elementos essenciais. Sendo assim, a biosfera não se esgota rapidamente em nitrogênio ou magnésio, porque ela usa a mesma fonte de abastecimento por diversas vezes. Quando as atividades humanas acabam por provocar o curto-circuito ou a quebra desses ciclos, os solos se tornam empobrecidos, e as pessoas também. É importante notar também que o mau manejo dos ciclos de nutrientes não provoca consequências desastrosas apenas aos sistemas terrestres. A perda indevida de N e P da fase solo, incluída em seus ciclos, é responsável por alguns dos mais devastadores problemas de poluição da água em todo o planeta (BRADY; WEIL, 2013, p. 437).

A importância do trabalho de Costanza e seus colaboradores (1997) resultou na estimativa do valor total global da extensão dos serviços ecossistêmicos e no esquema de classificação com 17 categorias principais que representam o uso global da terra. A principal divisão ocorreu entre sistemas marinho e terrestre.

O sistema marinho foi subdividido em mar aberto e litoral, e os sistemas terrestres foram divididos em dois tipos de florestas (tropical e temperada/boreal), pastagens, zonas úmidas, lagos/rios, deserto, tundra, gelo/rocha, terras agrícolas e urbano. À época, eles estimaram que os ecossistemas forneceriam pelo menos 33 trilhões de dólares estadunidenses em serviços anualmente ao planeta. Ainda que muitas categorias de serviços tenham ficado sem avaliação, principalmente por falta de dados de estimativas de valores para alguns biomas importantes, e que este seja um resultado estático para uma biosfera que é dinâmica, os resultados possibilitaram traçar uma estimativa representativa de um valor mínimo existente.

A maior parte dos serviços identificados encontrava-se fora do sistema de mercado (regulação de gás, regulação de distúrbios, tratamento de resíduos e ciclagem de nutrientes). Cerca de 38% do valor estimado provinha de sistemas terrestres, principalmente de florestas (US\$ 4,7 trilhões de dólares ao ano) e áreas úmidas (US\$ 4,9 trilhões de dólares ao ano) (COSTANZA *et al.*, 1997).

O sistema econômico existente não leva em conta totalmente o valor do SE devido à dificuldade em estimar o valor dos seus componentes não comercializados. Embora muitos estudos tenham examinado a valoração dos serviços ecossistêmicos, ainda é difícil identificar, quantificar e monetarizar seu valor, e ainda não há um conjunto unificado e completo de avaliação científica ou métodos contábeis para tais valores (ZHANG; LI; XIE, 2010).

O método baseado em um fator equivalente assume que cada unidade de área do ecossistema serve como uma unidade funcional para fornecer serviços e produtos do ecossistema. Se o valor monetário de diferentes SE por unidade de área de terra puder ser identificado, o valor total será quantificado para determinados ecossistemas e regiões com a área de terra de diferentes ecossistemas. Portanto, tal suposição fornece uma abordagem simplista, mas operacional para a avaliação de serviços ecossistêmicos (XIE *et al.*, 2017).

Para além de metodologias de avaliação com base na valoração, outras ferramentas tem sido estudadas, como por exemplo a Valoração Integrada dos Serviços Ecossistêmicos e Compensações (InVEST), desenvolvida pelo Projeto Capital Natural (www.naturalcapitalproject.org), que visa vincular modelos de funções ecológicas de produção com métodos de valoração econômica, mas inclui um número limitado de serviços ecossistêmicos, bem como a biodiversidade terrestre.

2.3.3 Categorização dos serviços ecossistêmicos

A Avaliação Ecossistêmica do Milênio (MEA, 2005) propôs a categorização dos serviços ecossistêmicos em quatro tipos, adotada com alterações para o projeto *The Economics of Ecosystems and Biodiversity* (TEEB, 2010) e constitui o núcleo da maioria das outras classificações recentes, conforme a Figura 4.

Figura 4 - Categorias de serviços ecossistêmicos.



Fonte: Elaborado pela autora. Adaptado de MEA (2005).

Essa categorização enfatiza a interação entre os capitais natural, social, construído e humano necessário para produzir esses serviços (COSTANZA *et al.*, 2017):

a) Serviços de regulação: combinam-se com os outros três capitais para produzir controle de inundações, proteção contra tempestades, regulação de água, regulação de doenças humanas, purificação de água, manutenção da qualidade do ar, polinização, controle de pragas e controle climático. Por exemplo, a proteção contra tempestades em zonas úmidas costeiras requer infraestrutura, pessoas e comunidades construídas para serem protegidas. Os serviços de regulação, em geral, não são bem percebidos pelos indivíduos;

a) Serviços de provisão: combinam capital construído, humano e social para produzir alimentos, madeira, fibra ou outros benefícios de provisionamento. Por exemplo, o peixe entregue às pessoas como alimento requer barcos de pesca (capital construído), pescadores (capital humano) e comunidades de pescadores (capital social);

c) Serviços culturais: combinam-se com capital construído, humano e social para produzir recreação, identidade estética, científica, cultural, religiosa, paisagística, senso de lugar ou outros benefícios culturais. Por exemplo, um benefício recreativo requer um ativo natural de referência (um lago), combinado com a infraestrutura construída (uma estrada, trilha, cais, etc.), capital humano (pessoas capazes de apreciar a experiência do lago) e capital social (família, amigos e instituições que tornam o lago acessível e seguro). Mesmo a 'existência' e outros 'valores de não uso' exigem que as pessoas (capital humano) e suas culturas (capital social e capital construído) sejam valorizadas. A categoria serviços culturais foi a menos desenvolvida, quando foram publicados o MEA (2005) e o TEEB (2010).

d) Serviços de suporte: descrevem os processos básicos do ecossistema, como formação do solo, produtividade primária, biogeoquímica, ciclagem de nutrientes e provisionamento de habitat. Essas funções do ecossistema contribuem indiretamente para o bem-estar humano, contribuindo para sustentação dos processos e funções necessários para a provisão, regulação e serviços culturais.

Costanza *et al.* (1997) agruparam os serviços ecossistêmicos em 17 principais categorias, apresentadas no Quadro 2.

A categorização dos SE é a etapa inicial que permite outras formas de avaliação, destacando-se a possibilidade de relacionar as categorias de serviços com classes de uso e cobertura da terra, resultando em diversos tipos de mapeamento.

Quadro 2 - Serviços ecossistêmicos, funções ecossistêmicas e exemplos.

Nº	Serviço ecossistêmico	Função ecossistêmica	Exemplos
1	Regulação de gás	Regulação da composição química atmosférica.	Balanço do CO ₂ /O ₂ (dióxido de carbono/oxigênio), O ₃ (ozônio) para proteção UVB, e níveis de SOx.
2	Regulação do clima	Regulação da temperatura global, precipitação e outros processos climáticos biologicamente mediados em níveis global ou local.	Regulação de gases de efeito estufa, produção de dimetilsulfeto (DMS) que afeta a formação de nuvens.
3	Regulação de distúrbios	Capacitância, amortecimento e integridade da resposta do ecossistema a flutuações ambientais.	Proteção contra tempestades, controle de enchentes, recuperação de secas e outros aspectos da resposta do habitat à variabilidade ambiental, controlada principalmente pela estrutura da vegetação.
4	Regulação da água	Regulação dos fluxos hidrológicos.	Provisão de água para agricultura (como irrigação), processos industriais ou de transporte.
5	Suprimento de água	Armazenamento e retenção de água.	Provisão de água para bacias hidrográficas, reservatórios e aquíferos.
6	Controle da erosão e retenção sedimentar	Retenção de solo em um ecossistema	Prevenção da perda de solo pela ação do vento, escoamento e outros processos de remoção.
7	Formação do solo	Processos de formação do solo.	Intemperismo de rochas e acumulação de matéria orgânica.
8	Ciclagem de nutrientes	Armazenamento, ciclagem interna, processamento e aquisição de nutrientes.	Fixação de nitrogênio, fósforo e outros elementos ou ciclos de nutrientes.
9	Tratamento de resíduos	Recuperação de nutrientes móveis e remoção ou decomposição de excesso de nutrientes xênicos (microalgas com fungos e bactérias) e compostos.	Tratamento de resíduos, controle de poluição, desintoxicação.
10	Polinização	Movimento de gametas florais.	Provisão de polinizadores para a reprodução de populações de plantas.
11	Controle biológico	Regulações trófico-dinâmicas de populações.	Controle dos principais predadores de espécies presa, redução de herbivoria pelos predadores de topo de cadeia.
12	Refúgio	Habitat para populações residentes e transitórias.	Viveiros, habitat para espécies migratórias, habitats regionais para espécies acolhidas localmente ou por hibernação.
13	Produção de alimentos	A parcela da produção primária bruta extraída como alimento.	Produção de peixes, caça, cultivos, nozes, coleta de frutas, pesca e agricultura de subsistência.
14	Matéria prima	A parcela da produção primária bruta extraída como matéria prima.	A produção de madeira, combustível ou forrageiras.
15	Recursos genéticos	Fontes de material biológico único e produtos.	Medicamentos, produtos para material científico, genes para resistência das plantas a patógenos e pestes, espécies ornamentais (animais domésticos e variedade de plantas de horticultura).
16	Recreação	Oferta de oportunidades para atividades recreativas.	Ecoturismo, pesca esportiva, e outras atividades recreativas externas.

Nº	Serviço ecossistêmico	Função ecossistêmica	Exemplos
17	Cultural	Oferta de oportunidades para usos não comerciais.	Valores de ecossistemas estético, artístico, educacional, espiritual, e ou científico.

Fonte: Adaptado de Costanza *et al.* (1997).

Outros estudos incluem mais categorias, a exemplo de Müller e Burkhard (2007) e Müller (2005), que descrevem os componentes de integridade ecológica, descritos no Quadro 3 e retomados posteriormente no item 3.4.

Quadro 3 - Lista de serviços ecossistêmicos e integridade dos ecossistemas e suas definições.

Serviço Ecossistêmico	Definição	Indicadores potenciais
Integridade dos ecossistemas		
Heterogeneidade abiótica	Provisão de habitats adequados para diferentes espécies, para grupos funcionais de espécies e para processos é essencial para o funcionamento dos ecossistemas.	Índices de diversidade dos componentes abióticos do habitat; Índices de heterogeneidade, por exemplo, conteúdo de húmus no solo; Número/área de habitats.
Biodiversidade	Presença ou ausência de espécies selecionadas, grupos de espécies ou composição de espécies	Espécies indicadoras representativas de um determinado fenômeno ou sensíveis a mudanças distintas.
Fluxos bióticos de água	Ciclo da água afetado pelos processos das plantas no sistema (evapotranspiração).	Transpiração/evapotranspiração total.
Eficiência metabólica	Quantidade de energia necessária para manter uma biomassa específica, servindo também como indicador de estresse para o sistema.	Respiração/biomassa.
Captura de energia	Capacidade dos ecossistemas de aumentar a entrada de energia utilizável. A energia é derivada da termodinâmica e mede a fração de energia que pode ser transformada em trabalho mecânico. Em ecossistemas, a energia capturada é usada para construir biomassa (por exemplo, por produção primária) e estruturas.	Produção primária líquida; Índice de área foliar.
Redução da perda de nutrientes	Saída irreversível de elementos do sistema, balanço de nutrientes e fluxos de matéria.	Lixiviação de nutrientes, por exemplo, nitrogênio (N) e fósforo (P).
Capacidade de armazenamento	Quantidade de nutrientes, energia e água do sistema e capacidade do sistema em armazená-los quando disponíveis e liberá-los quando necessário.	Matéria orgânica resolvida; N, Carbono (C) orgânico no solo; N, C na biomassa.
Serviços de Regulação		
Regulação do clima local	Mudanças na cobertura da terra podem afetar localmente a temperatura, vento, radiação e precipitação.	Temperatura, albedo, precipitação, vento; Amplitudes de temperatura; Evapotranspiração.
Regulamentação climática global	Os ecossistemas desempenham um papel importante no clima, sequestrando ou emitindo gases de efeito estufa.	Fonte-sumidouro de vapor d'água, metano, CO ₂ .
Proteção contra inundações	Elementos naturais que amortecem eventos extremos de inundação.	Número de inundações causando danos.

Serviço Ecosistêmico	Definição	Indicadores potenciais
Recarga de água subterrânea	O momento e a magnitude do escoamento, inundação e recarga do aquífero podem ser fortemente influenciados por mudanças na cobertura do solo, incluindo, em particular, alterações no potencial de armazenamento de água do sistema, como a conversão de zonas úmidas ou a substituição de florestas por áreas agrícolas ou áreas agrícolas por áreas urbanas.	Taxas de recarga de águas subterrâneas.
Regulação da qualidade do ar	A capacidade dos ecossistemas de remover elementos tóxicos e outros da atmosfera.	Índice de área foliar; Amplitudes da qualidade do ar.
Regulação de erosão	A cobertura vegetal desempenha um papel importante na retenção do solo e na prevenção de deslizamentos.	Perda de partículas do solo pelo vento ou água; cobertura vegetal.
Regulação de nutrientes	A capacidade dos ecossistemas de realizar (re)ciclagem de, por exemplo, N, P ou outros.	N, P ou outras taxas de renovação de nutrientes.
Purificação da água	Os ecossistemas têm a capacidade de purificar a água, mas também podem ser uma fonte de impurezas na água doce.	Qualidade e quantidade da água.
Polinização	Mudanças no ecossistema afetam a distribuição, abundância e eficácia dos polinizadores. O vento e as abelhas são responsáveis pela reprodução de muitas plantas de cultivo.	Quantidade de produtos vegetais; Distribuição de plantas; Disponibilidade de polinizadores.
Serviços de Provisão		
Plantações	Cultivo de plantas comestíveis.	Plantas/ha.
Pecuária	Manutenção de animais para consumo.	Animais/ha.
Forragem	Cultivo e colheita de forragem animal.	Plantas forrageiras/ha.
Pesca de captura	Captura de espécies de peixes de interesse comercial, acessíveis aos pescadores.	Peixes disponíveis para captura/ha.
Aquicultura	Animais mantidos em aquicultura terrestre ou marinha.	Número de animais/ha.
Alimentos silvestres	Colheita de frutas, cogumelos, caça ou pesca de animais selvagens.	Biomassa vegetal/ha; Animais disponíveis/ha.
Madeira	Presença de árvores ou plantas com potencial de uso para madeira.	Madeira/ha.
Combustível de madeira	Presença de árvores ou plantas com potencial de uso como combustível.	Madeira ou biomassa vegetal/ha.
Energia (biomassa)	Presença de árvores ou plantas com potencial de aproveitamento como fonte de energia.	Madeira ou biomassa vegetal/ha.
Bioquímicos e medicamentos de água doce	Produção de produtos bioquímicos, medicamentos. Presença de água doce.	Quantidade ou número de produtos; kg /ha Litros ou m ³ /ha.

Serviço Ecosistêmico	Definição	Indicadores potenciais
Serviços Culturais		
Recreação e valores estéticos	Refere-se especificamente à paisagem e às qualidades visuais da área de estudo de caso (paisagem, beleza cênica). O benefício é a sensação de beleza que as pessoas obtêm ao olhar para a paisagem e benefícios recreativos relacionados.	Número de visitantes ou instalações; Questionários sobre preferências pessoais.
Valor intrínseco da biodiversidade	O valor da natureza e das próprias espécies, além dos benefícios econômicos ou humanos.	Número de espécies ou habitats ameaçados, protegidos ou raros.

Fonte: Adaptado de Burkhard *et al.* (2009).

A integridade ecológica também pode descrever a funcionalidade do ecossistema e os respectivos indicadores foram elaborados em detalhes em Müller (2005). Esses indicadores descrevem estruturas e processos relevantes para a funcionalidade de longo prazo e capacidade de auto-organização dos ecossistemas. As estruturas estão relacionadas a números e características de, por exemplo, espécies selecionadas (diversidade biótica) e componentes físicos do habitat (heterogeneidade abiótica). Os processos referem-se aos orçamentos de energia do ecossistema (captura de energia; por exemplo, produção de biomassa), orçamentos de matéria (armazenamento e perda de nutrientes) e orçamentos de água (fluxos de água bióticos e eficiência metabólica).

2.3.4 Mapeamento e avaliação de serviços ecossistêmicos

O mapeamento e a avaliação dos ecossistemas e seus serviços foi estruturado como suporte para a Estratégia da Biodiversidade da União Europeia (UE) para 2020 (MAES *et al.*, 2016), de forma a se tornarem uma ação-chave para o avanço dos objetivos da biodiversidade e para informar o desenvolvimento e a implementação de políticas relacionadas à água, clima, agricultura e floresta, planejamento marinho e regional.

Essa abordagem trouxe uma avaliação coerente e integrada para toda a UE, estabelecendo um conjunto de questões políticas fundamentais apoiado em uma estrutura conceitual que permitiu a conexão entre as sociedades humanas e seu bem-estar e o meio ambiente.

Essa estrutura foi testada por meio de quatro estudos-piloto temáticos, incluindo as partes interessadas (*stakeholders*) e especialistas trabalhando em diferentes escalas e níveis de governança, que contribuíram com indicadores para

avaliar o estado dos serviços ecossistêmicos. Os indicadores foram pontuados de acordo com critérios diferentes e variados por tipo de ecossistema e serviços ecossistêmicos usando a Classificação Internacional Comum de Serviços Ecossistêmicos (*Common International Classification of Ecosystem Services - CICES*) como tipologia.

Os autores concluíram que existia potencial para desenvolver uma primeira avaliação ecossistêmica à escala da UE com base nos dados existentes, se estes fossem combinados de forma criativa. No entanto, grandes lacunas de dados ainda precisaram ser preenchidas antes que uma avaliação integrada e completa do ecossistema pudesse ser realizada.

Os Estados-Membros da UE empenharam-se em mapear e avaliar os ecossistemas e seus serviços em seu território. Maes *et al.* (2016) apontaram que o mapeamento representaria o delineamento espacial dos ecossistemas, bem como a quantificação de sua condição e dos serviços que eles fornecem. Como resultado, esperava-se que a condição dos ecossistemas e a oferta de SE fossem também espacialmente heterogêneas, exigindo o uso de dados e indicadores. Os autores ponderaram que a avaliação deveria traduzir essa evidência predominantemente científica para uma informação que fosse compreensível para políticas e tomada de decisão, exemplificada pelo uso de mapas, indicadores, narrativas e gráficos.

A Estratégia da Biodiversidade da UE incluía seis metas, que abrangiam a aplicação integral da legislação europeia em matéria de natureza, melhor proteção dos ecossistemas e seus serviços, agricultura e silvicultura mais sustentáveis, melhor gestão dos estoques de peixes, controles mais rígidos sobre espécies exóticas invasoras e uma maior contribuição da UE para evitar a perda de biodiversidade global.

No contexto da segunda meta desse plano, que visava manter e melhorar os ecossistemas e seus serviços, estava incluída a Ação 5, pensada para fazer o melhor uso e operacionalizar a informação e o conhecimento científico disponível na Europa sobre ecossistemas e seus serviços (EUROPEAN COMMISSION, 2011). Consequentemente, a Ação 5 e o Mapeamento e Avaliação dos Ecossistemas e seus Serviços³ tiveram como pilares os resultados dos estudos da Avaliação Ecossistêmica

³ Sigla em inglês MAES (Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services).

do Milênio (MEA, 2005) e da Economia dos Ecossistemas e da Biodiversidade (TEEB, 2010).

Serviços ecossistêmicos são derivados de funções ecossistêmicas. A Figura 5 mostra o fluxo de serviços realizado para onde há demanda. Para esta finalidade, os serviços ecossistêmicos também abrangem os bens derivados de ecossistemas.

Figura 5 - Estrutura conceitual para a União Europeia e avaliação ecossistêmica nacional sob a Ação 5 da Estratégia da Biodiversidade da União Europeia para 2020.



Fonte: Elaborado pela autora. Adaptado de European Commission (2011).

Os benefícios que favorecem as pessoas são representados pela nutrição, acesso a ar e água puros, saúde, segurança e recreação. Os benefícios derivados dos serviços ecossistêmicos cobrem várias dimensões do bem-estar humano, ou seja, necessidades humanas básicas, econômicas, ambientais e felicidade subjetiva (SUMMERS *et al.*, 2012).

*Políticas concernentes à gestão de recursos naturais (como agricultura, por exemplo), visam adaptar os condutores de mudança para alcançar um estado futuro desejado de ecossistemas. Muitas outras políticas (energia, coesão territorial) também afetam estes condutores e podem ser adicionados à estrutura, já que exercem impacto sobre os ecossistemas, mesmo que não o façam explicitamente (MAES *et al.*, 2016, p. 16).*

A aplicação de uma estrutura conceitual para avaliação dos ecossistemas e seus serviços para uma esfera internacional requer a definição de duas tipologias: 1) uma tipologia para ecossistemas que seja considerada em uma avaliação ecossistêmica e seus provedores de serviços ecossistêmicos e 2) uma tipologia de

serviços ecossistêmicos. As tipologias propostas por Maes e colaboradores (2016) tiveram por objetivo permitir a integração e comparação entre os estados membros da UE.

O Quadro 4 apresenta os principais tipos de ecossistemas que foram selecionados para a avaliação. A base para a tipologia dos ecossistemas terrestres e de água doce baseia-se na cartografia temática de ocupação e uso da terra CORINE *Land Cover*⁴ e na classificação EUNIS (*European Nature Information System*) que inclui classificação de habitat.

Quadro 4 - Tipologia de ecossistema para mapeamento e avaliação segundo a estratégia de biodiversidade da União Europeia.

Ecossistema	Tipos
Terrestre	Urbano
	Agricultura
	Pastagem
	Floresta e florestamento
	Arbustos
	Vegetação esparsa
	Áreas úmidas
Aquático	Rios e lagos
Marinho	Intrusões marinhas e águas de transição
	Costeiro
	Plataforma
	Oceano aberto

Fonte: Adaptado de Maes *et al* (2016).

Quanto aos serviços ecossistêmicos, o grupo de trabalho decidiu adotar a estrutura proposta pelo CICES, atualizada desde então para novas versões (HAINES-YOUNG; POTSCHIN, 2018), cuja classificação estava condicionada à biodiversidade. Essa estrutura hierárquica permitiu criar uma descrição detalhada de cada serviço ecossistêmico considerado, tendo como objetivo fornecer uma ferramenta flexível e hierárquica que pudesse ser adaptada e refinada a uma situação específica e às necessidades de estados e regiões.

Na sequência da adoção da estrutura analítica, incluindo um modelo conceitual e duas tipologias, um primeiro teste consistiu em enumerar um conjunto de

⁴ O CORINE *Land Cover* é uma cartografia temática de ocupação/uso do solo produzida a partir de imagens de satélite para os anos de 1990, 2000, 2006 e 2012, produzida no âmbito de um programa coordenado pela Agência Europeia do Ambiente. Encontra-se em formato vetorial, com uma unidade mínima cartográfica de 25 hectares, distância mínima entre linhas de 100 metros e com um sistema de classificação com 3 níveis hierárquicos e 44 classes no nível mais desagregado.

possíveis indicadores nos quais os Estados Membro pudessem mapear (ou quantificar) os serviços ecossistêmicos em escala nacional.

Esses estudos-piloto foram escolhidos com base em critérios de seleção, considerando, por exemplo, o potencial de informar políticas relevantes para a União Europeia que pudessem afetar o uso de recursos naturais; o seu potencial para utilizar as informações que os Estados-Membros já acumulavam no quadro de diferentes relatórios ambientais obrigatórios pela atual legislação da UE, e dados em nível nacional provenientes da avaliação de ecossistemas, consideradas fontes de informação relevantes sobre a situação de muitos serviços ecossistêmicos.

O Quadro 5 apresenta uma seleção parcial dos indicadores selecionados dos estudos-piloto, com os rótulos de alta qualidade (verde) e média qualidade (amarelo) em relação à disponibilidade de dados e habilidade de transmitir informação para a elaboração de políticas e implementar processos.

Quadro 5 - Melhores indicadores disponíveis para avaliação de serviços ecossistêmicos entre diferentes ecossistemas.

Serviço ecossistêmico	Principal ecossistema terrestre e de água doce	Indicador
Cultivos	Agricultura	● Área e produção de cultivos
Criação animal e produtos	Agricultura e Campo	● Pecuária
Plantas silvestres, algas e seus produtos	Floresta	● Distribuição de frutas silvestres (modelagem)
Animais silvestres e seus produtos	Florestas	● Tamanho da população de espécies de interesse
Animais de aquicultura <i>in-situ</i>	Lagos e rios	● Produção de aquicultura de água doce
Água (nutrição)	Lagos e rios	● Água extraída
Biomassa (materiais)	Floresta plantada	● Área e produção de cultivos de fibra ● Estatísticas de produção e consumo de madeira
Água (materiais)	Lagos e rios	● Água extraída
	Floresta	● Suprimento total de água por área de floresta (modelagem)
Recursos baseados em plantas	Floresta	● Estatísticas de madeira para combustível
Recursos e energia baseados em animais (intervenção de resíduos, tóxicos e outras perturbações)	Floresta	● Área ocupada por florestas ripárias ● Remoção de nitrogênio e enxofre (florestas)
Estabilização de massas e taxas de controle de erosão	Florestas, Agricultura, Campo	● Risco de erosão do solo ou proteção do solo

Serviço ecossistêmico	Principal ecossistema terrestre e de água doce	Indicador
Mitigação e atenuação de fluxos de massa. Ciclo hidrológico e manutenção do fluxo de água. Proteção contra inundações. Proteção contra tempestades	Áreas úmidas	<ul style="list-style-type: none"> ● Áreas de várzeas (e registro de cheias anuais) ● Áreas de áreas úmidas localizadas em zonas de risco de inundação
Ventilação e transpiração	Agricultura, Campo	<ul style="list-style-type: none"> ● Quantidade de biomassa
Polinização e dispersão de sementes	Agricultura, Campo	<ul style="list-style-type: none"> ● Potencial de polinização
Manutenção de populações de viveiros e habitats		<ul style="list-style-type: none"> ● Parcela de terras agrícolas de alto valor natural ● Situação ecológica de corpos d'água
Processos de intemperismo	Agricultura, Campo	<ul style="list-style-type: none"> ● Cota da agricultura biológica ● Teor de matéria orgânica do solo ● pH do solo superficial ● Capacidade de troca catiônica
Processos de decomposição e fixação	Agricultura	<ul style="list-style-type: none"> ● Área de fixação de nitrogênio em cultivos
Condição química de água doce	Rios, Lagos e Áreas úmidas	<ul style="list-style-type: none"> ● Situação química
Regulação climática global por redução da concentração de gases de efeito estufa	Floresta	<ul style="list-style-type: none"> ● Estoque e sequestro de carbono pelas florestas
Regulação climática local e regional	Floresta	<ul style="list-style-type: none"> ● Área de floresta
Interações físicas e experienciais	Floresta, Agricultura	<ul style="list-style-type: none"> ● Número de visitantes
Interações intelectuais e representativas	Campos, Lagos	
Espiritual e/ou emblemático		
Outros resultados culturais		<ul style="list-style-type: none"> ● Extensão de áreas protegidas

Fonte: Maes *et al.* (2012). Para células em branco, nenhum indicador foi identificado.

Entre os desafios metodológicos destacados pelos autores encontrava-se a carência de indicadores que quantificassem as contribuições existentes ou potenciais dos ecossistemas para os serviços de regulação e manutenção, pois os dados existentes mediam apenas a pressão sobre os ecossistemas (como por exemplo, participação de sistemas agroflorestais nas várzeas), estado dos ecossistemas (estado ecológico dos corpos d'água) ou um impacto sobre os ecossistemas (por exemplo, sedimentos removidos de barragens, presença de espécies exóticas). Tais indicadores seriam usados como substitutos dos serviços ecossistêmicos.

Esta prática foi aceita pelos autores na medida em que a estrutura conceitual utilizada no estudo presumia que boas condições ambientais indicariam um

ecossistema mais saudável e resiliente, que fornecesse mais serviços e mantivesse a capacidade de fornecê-los para o futuro (BALVANERA *et al.*, 2006; CHAPIN III *et al.*, 2000; SCHINDLER *et al.*, 2010). O estudo-piloto ressaltou que a relação entre a condição do ecossistema e os serviços não foi explicitamente explorada nesse processo e precisaria de mais estudos científicos (PALMER; FEBRIA, 2012).

Uma segunda lacuna mostrou que a disponibilidade de dados não é o melhor critério para identificar indicadores de serviços ecossistêmicos, pois pode direcionar a busca de indicadores para programas de monitoramento nacionais ou da UE existentes. Isso nem sempre resulta em indicadores ideais, mas aumenta a apropriação de uma abordagem conjunta para a avaliação dos ecossistemas na Europa. Concluiu-se que o conjunto de indicadores apresentados no trabalho recompensou a aplicabilidade em relação à quantidade (número de indicadores) (MAES *et al.*, 2016).

Em síntese, o estudo proposto por Maes e colaboradores (2016) testou pela primeira vez a aplicabilidade da classificação CICES para estabelecer uma estrutura de indicadores para a avaliação dos serviços ecossistêmicos em nível nacional e internacional. A estrutura hierárquica do CICES permitiu uma melhor reutilização de indicadores que foram desenvolvidos sob outras estruturas ou relatórios, tornando-se ferramenta útil para a operacionalização de serviços ecossistêmicos no que se refere a sua integração em terra, água e gestão urbana e tomada de decisão.

Reforça-se que, mesmo em países europeus que dispõem de recursos financeiros e alta tecnologia para investimento em base de dados, persiste a dificuldade para obtenção de dados que expressem de forma ideal a avaliação dos SE e sua aplicação em metodologias de avaliação desses serviços.

A partir do mapeamento do uso e cobertura da terra, torna-se possível identificar os SE existentes e eventualmente atribuir valores a esses serviços, conforme verificado na análise de impactos de SE fornecidos pela paisagem urbana de Bordeaux, na França, através de dados de uso e cobertura da terra do projeto Corine Land Cover, e utilização da ferramenta InVEST (*Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs*), que se baseia em informações ecológicas para mapear, quantificar e avaliar a distribuição dos serviços ecossistêmicos em uma paisagem (CABRAL *et al.*, 2016), avaliação e valoração de SE na sub-bacia hidrográfica do Arroio Passo Fundo (HINATA; BASSO, 2022; HINATA; BASSO;

SANTOS, 2021), avaliação e valoração dos SE em diferentes cenários na cidade de Anyang, China central (JI *et al.*, 2021), aplicação da valoração de serviços ecossistêmicos diante da dinâmica de uso da terra da bacia hidrográfica dos rios Mogi-Guaçu e Pardo (SP), considerando dois cenários diferentes (ANDRADE *et al.*, 2012), e avaliação dos SE analisando duas abordagens complementares, a coleta de dados de campo com as comunidades e mapeamento da área por meio de classificação de imagens, avaliando o potencial de fornecimento de SE em uma mina de bauxita no Pará (ROSA; SOUZA; SÁNCHEZ, 2020).

Kubiszewski e colaboradores (2017) sintetizaram conjuntos de cenários existentes para desenvolver e avaliar o valor dos serviços ecossistêmicos globais futuros em quatro cenários alternativos de uso e manejo da terra em 16 biomas para o ano de 2050, tendo como base o valor de 2011 (COSTANZA *et al.*, 1997; 2014). Os resultados mostraram que, em diferentes cenários, o valor global dos serviços ecossistêmicos poderia diminuir em US\$ 51 trilhões de dólares/ano ou aumentar em US\$ 30 trilhões/ano. Para o Brasil, observou-se maior perda de SE no cenário denominado “Mundo Fortaleza”⁵ em função da diminuição de florestas tropicais. No cenário “Grande Transição”⁶, no qual a transformação teria como base pressupostos sobre limites ao crescimento convencional do Produto Interno Bruto (PIB) e mais foco no bem-estar ambiental e social e na sustentabilidade, o Brasil apresentou variação positiva de 25%.

Em escala regional, Hernández-Blanco e colaboradores (2020) estimaram a mudança do valor dos serviços ecossistêmicos até 2050 em quatro diferentes cenários de desenvolvimento para a América Latina e o Caribe, com o objetivo principal de informar os formuladores de políticas sobre as consequências que as decisões de mudança na cobertura da terra têm sobre o capital natural. Os autores contabilizaram mudanças no uso e cobertura da terra (urbano, plantio, floresta, pastagem, deserto), população, atividade econômica (PIB) e desigualdade, entre outras variáveis, e concluíram que existe um potencial de redução do valor dos SE de oito trilhões de dólares por ano no pior cenário e aumento de 19 trilhões de dólares para o melhor cenário, indicando que a adoção de políticas adequadas podem aumentar muito o

⁵ Arquétipo em que as nações e o mundo se tornam mais fragmentados, desiguais e caminham para um colapso social temporário ou permanente.

⁶ Arquétipo de transformação baseado em pressupostos sobre limites ao crescimento convencional do PIB e mais foco no bem-estar ambiental e social e na sustentabilidade.

bem-estar humano e a sustentabilidade na região e ajudar a alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU).

Na China, as mudanças nos valores mensais de 11 categorias de SE fornecidos pelos ecossistemas (seis categorias primárias, incluindo terras agrícolas, florestas, pastagens, pântanos, terras áridas e áreas de água) em 2010 foram investigadas com base em um fator equivalente padrão (US\$ 503,2 dólares americanos) por hectare (XIE *et al.*, 2017). Os resultados indicaram que um total de 5,63 trilhões de dólares americanos anuais foi fornecido em SE, dos quais as florestas forneceram a maior proporção (46,0%).

Quintas-Soriano e colaboradores (2016) investigaram as mudanças no uso e cobertura da terra na prestação de oito serviços ecossistêmicos fornecidos pelos ecossistemas no árido sudeste da Península Ibérica, e constataram que os conflitos entre desenvolvimento econômico e conservação têm gerado crescente preocupação devido à rápida expansão da horticultura em estufa e ao abandono de áreas rurais e montanhosas, concluindo que as decisões humanas sobre o manejo do uso da terra afetaram o estado dos ecossistemas e, portanto, a oferta de serviços ecossistêmicos.

Na cidade de Changzhou, República Popular da China, foram observadas as mudanças dos SE resultado de alterações do uso e cobertura da terra nos anos 1991, 1996, 2001 e 2006, utilizando sensoriamento remoto, tecnologia de SIG e método de avaliação econômica para serviços de ecossistema. Os resultados desse estudo mostraram uma expansão contínua das áreas urbanizadas e redução dos serviços ecossistêmicos, sendo que o valor econômico dos serviços ecossistêmicos fornecidos pela porção ecológica de Changzhou diminuiu 19,3% de 1991 a 2006 e a taxa de redução anual foi de aproximadamente 1,3%. A conversão de terras agrícolas para outros usos foi responsável pela maior redução no valor dos serviços ecossistêmicos, igual a US \$ 37,8 milhões de dólares (LI *et al.*, 2014).

No contexto brasileiro, os SE foram identificados e espacializados na Reserva Biológica Nascentes da Serra do Cachimbo com base nas condições e classes de uso da terra de 2017, onde observou-se um alto potencial de oferta principalmente em áreas naturais na reserva, e perda no fornecimento de serviços de regulação e culturais em áreas alteradas. Conclui-se que a área tinha seus serviços ecossistêmicos ameaçados e necessitam de atenção para evitar maior

comprometimento da dinâmica natural na reserva (GOMES DA SILVA; BELTRÃO; MORALES, 2021).

Ainda no contexto nacional, os SE foram avaliados para a Reserva da Biosfera do Cinturão Verde (RBCV) da cidade de São Paulo, localizado em uma das maiores metrópoles do planeta e em sua área periurbana, considerando o serviço de provisão de alimentos, recursos florestais madeireiros e derivados, produtos bioquímicos, medicamentos naturais e produtos farmacêuticos, serviço de provisão e regulação de água, regulação do ar, serviço de fixação de carbono em superfície e redução de gases de efeito estufa na atmosfera, dentre outros, destacando-se os serviços culturais folclóricos, representados pelo folclore caipira (SÃO PAULO, 2020).

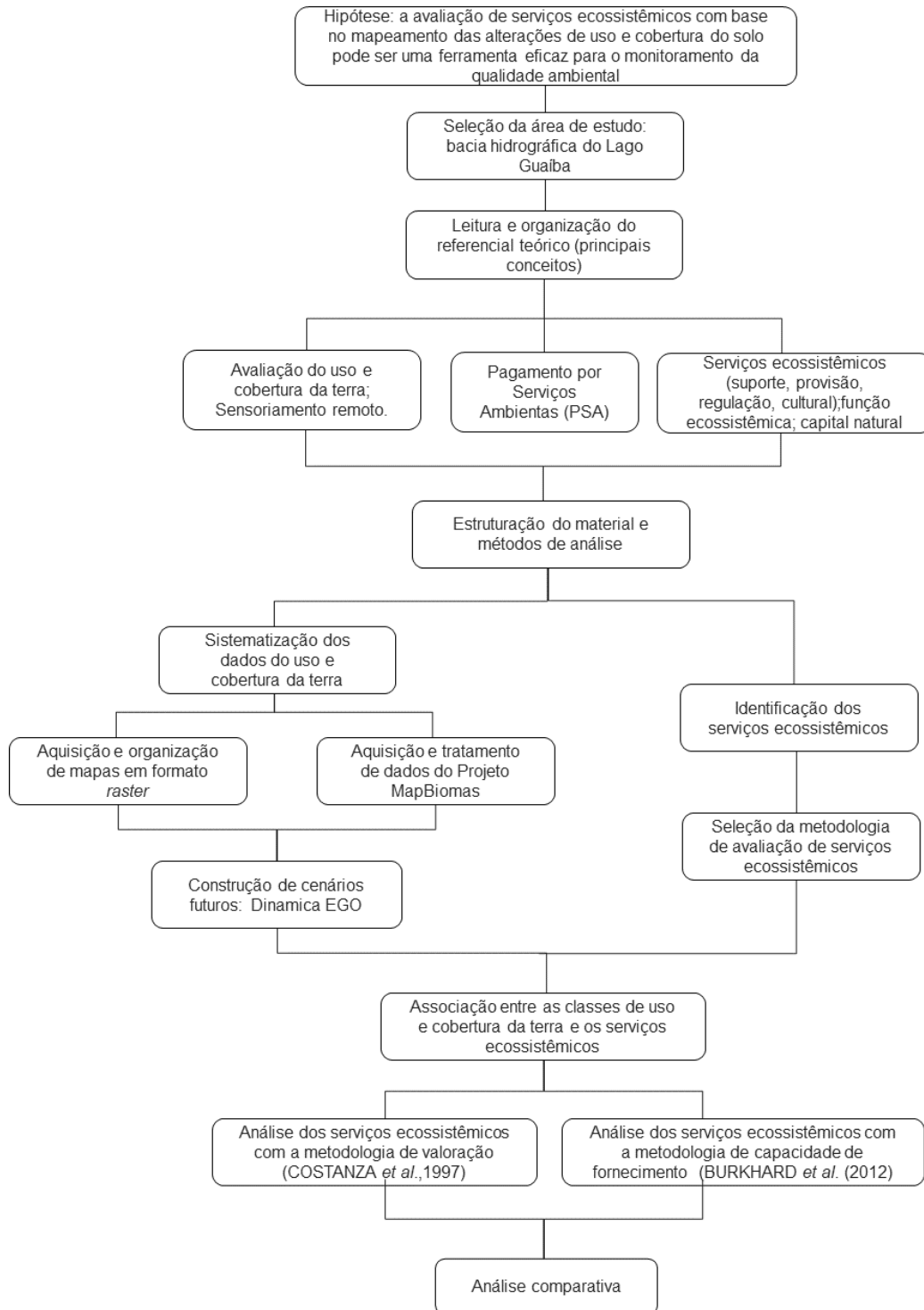
3 CAPÍTULO III: MATERIAL E MÉTODOS

Essa pesquisa orienta-se pelo método hipotético-dedutivo, que parte de um problema ou lacuna do conhecimento científico, apresentando-se como solução uma conjectura (nova ideia ou nova teoria) deduzida a partir de uma hipótese sujeita a testes (PRODANOV; FREITAS, 2009).

Conforme referido no Item 1, o problema desta pesquisa consiste na lacuna de metodologia para avaliação dos SE no tempo e no espaço, que pode ser aplicável para avaliação e gestão ambiental. A proposta para solucionar essa questão consiste na avaliação de dois métodos distintos para avaliação dos SE: um com base em critérios de valoração monetária, e outro com base na capacidade de fornecimento de serviços. O fluxograma apresentado na Figura 6 a seguir mostra as etapas seguidas para resposta à questão.

A Etapa 3 de construção do método de análise inicial consistiu em estabelecer uma base de referência que viabilizasse a associação do mapeamento do uso e cobertura da terra com os respectivos serviços ecossistêmicos. Definido esse apoio, o passo posterior demandou a tomada de decisão para identificar quais serviços seriam fornecidos por tipo de ecossistema, de acordo com as classificações propostas (BURKHARD *et al.*, 2012; COSTANZA, R. *et al.*, 2017). A descrição das etapas está apresentada a seguir.

Figura 6 - Fluxograma das etapas da pesquisa.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.1 COLETA E ORGANIZAÇÃO DE DADOS DE USO E COBERTURA DA TERRA

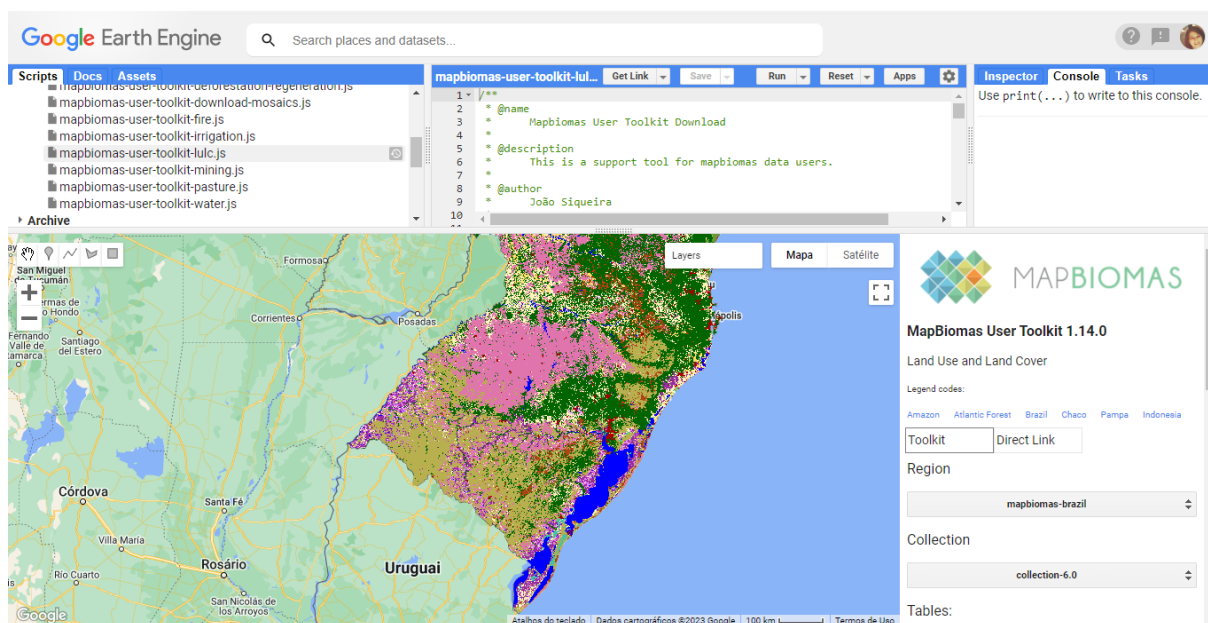
As bases utilizadas para o mapeamento das classes fazem parte da Coleção 6 do Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil Mapbiomas, que oferecem cobertura temporal para o período de 1985-2020. O MapBiomas é uma iniciativa brasileira que envolve uma rede colaborativa de especialistas das mais diversas áreas, compreendendo biomas, usos da terra, sensoriamento remoto, SIG e ciência da computação, que utiliza processamento em nuvem e classificadores automatizados, desenvolvidos e operados para gerar uma série histórica de mapas anuais de cobertura e uso da terra do Brasil.

Os mapas são produzidos a partir da classificação pixel a pixel de imagens dos satélites da série Landsat com resolução de 30 metros. Este projeto tem como propósito contribuir para o entendimento da dinâmica do uso da terra no Brasil e em outros países tropicais tendo como base o desenvolvimento e implementação de uma metodologia rápida, confiável e de baixo custo para gerar mapas anuais de uso e cobertura do Brasil a partir de 1985 com atualização anual (MAPBIOMAS, 2022).

Considerando-se que esta base de dados já recebeu tratamento antes de ser disponibilizada, não foi necessário realizar pré-processamento de imagens ou atividades preparatórias de sensoriamento remoto. Estudos sugerem que os Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Projeto MapBiomas apresentam alto grau de confiabilidade, oferecendo importante conjunto de dados de forma gratuita para a realização de mapeamentos temáticos (CRUZ; CRUZ, 2021).

Os dados utilizados no mapeamento da BHLG corresponderam à Coleção 6 do MapBiomas, publicada em agosto de 2021, que cobriu o período de 1985 - 2020 (35 anos) dos mapas anuais de cobertura e uso da terra do Brasil. O acesso e o *download* da base de dados no formato matricial (pixel de 30x30m) foram realizados através da plataforma *Google Earth Engine* (Figura 7), sendo o recorte territorial correspondente aos limites da bacia hidrográfica do Lago Guaíba.

Figura 7 - Plataforma de acesso aos dados do Mapbiomas no *Google Earth Engine*.







Fonte: Google Earth Engine.





Os arquivos em formato *raster* foram processados e convertidos para formato vetorial (*shapefile*) no software ArcGIS versão 10.5. Os códigos das classes da legenda e paleta de cores foram disponibilizados pelo próprio Mapbiomas, e compreenderam as tipologias: Afloramento Rochoso, Área Urbanizada, Arroz, Campo Alagado e Área Pantanosa, Formação Campestre, Formação Florestal, Mosaico de Agricultura e Pastagem, Outras Áreas não Vegetadas, Outras Lavouras Temporárias, Praia, Duna e Areal, Rio e Lago, Silvicultura e Soja. A ferramenta *Identity* do ArcGIS permitiu calcular uma interseção geométrica dos recursos de entrada (tipologias de uso e cobertura) e dos recursos de identidade (bacia hidrográfica), gerando uma sobreposição desses atributos.

Os anos selecionados para *download* de dados foram de 1985 a 2020, as áreas de cada tipologia foram calculadas em hectares, sendo todas pertencentes ao bioma Pampa. No Quadro 6 são apresentadas a descrição e um recorte da imagem de cada feição, para melhor entendimento do tipo de uso e cobertura da terra.

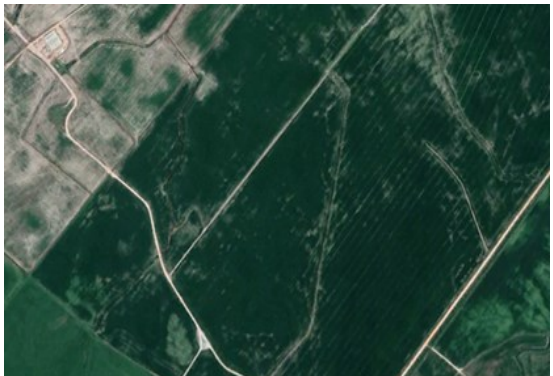
As cores originais do projeto receberam adaptações, dada a similaridade de algumas feições, que dificultariam a interpretação pelo leitor. Os dados quantitativos foram tabulados e exportados para análise no programa Excel, permitindo a análise comparativa entre os dados.

Quadro 6 - Legenda da Coleção 6 do MapBiomas para os tipos de uso e ocupação da terra existentes na BHLG.

MapBiomas Coleção 6	Feição	Descrição
Floresta		
Formação Florestal		Vegetação lenhosa com espécies arbóreas ou arbóreo-arbustivas, com predomínio de dossel contínuo. Inclui as tipologias florestais: ombrófila, decidual e semidecidual e parte das formações pioneiras.
Formação natural não florestal		
Afloramento rochoso		Rochas naturalmente expostas na superfície terrestre sem cobertura de solo, muitas vezes com presença parcial de vegetação rupícola.
Campo Alagado e Área Pantanosa		Áreas pantanosas, denominadas regionalmente de banhados ou marismas (influência salina). Vegetação tipicamente higrófila, com plantas aquáticas emergentes, submersas ou flutuantes. Ocupam planícies e depressões do terreno com solo encharcado e também as margens rasas de lagoas ou reservatórios de água.
Formação Campestre		Vegetação com predomínio de estrato herbáceo graminoide. A composição botânica é influenciada pelos gradientes edáficos e topográficos e pelo manejo pastoril (pecuária). Ocorrem em solos profundos até solos rasos, incluindo terrenos rochosos (campos rupestres) e arenosos. Ocupam desde solos bem drenados, até solos com maior teor de umidade. Na maioria dos casos corresponde à vegetação nativa, mas podem estar presentes manchas de vegetação exótica invasora ou de uso forrageiro (pastagem plantada).

MapBiomas Coleção 6	Feição	Descrição
Corpo d'água		
Rio e Lago		Rios, lagos, represas, reservatórios e outros corpos d'água.
Área não vegetada		
Outras Áreas não Vegetadas		Classe mista que contempla áreas naturais e áreas antropizadas. As áreas naturais incluem superfícies arenosas como as praias fluviais e os areais. As áreas antropizadas incluem áreas de solo exposto e superfícies não permeáveis (infraestrutura, expansão urbana ou mineração).
Praia e Duna		Cordões arenosos, de coloração branco brilhante, onde não há o predomínio de vegetação de nenhum tipo.
Área Urbanizada		Áreas urbanizadas com predomínio de superfícies não vegetadas, incluindo estradas, vias e edificações.

MapBiomas Coleção 6	Feição	Descrição
Agropecuária		
Arroz		<p>Áreas cultivadas com cultura de arroz, exclusivamente sob sistema de irrigação.</p>
Mosaico de Agricultura e Pastagem		<p>Áreas de uso agropecuário, onde não foi possível distinguir entre pastagem e agricultura. Pode incluir áreas de cultivos, pastagens de inverno ou de verão e de horticultura. Inclui as áreas de descanso entre safras agrícolas (pousio).</p>
Outras Lavouras Temporárias		<p>Áreas ocupadas com cultivos agrícolas de curta ou média duração, geralmente com ciclo vegetativo inferior a um ano, que após a colheita necessitam de novo plantio para produzir.</p>
Silvicultura		<p>Espécies arbóreas plantadas para fins comerciais (ex. pinus, eucalipto, araucária).</p>

MapBiomias Coleção 6	Feição	Descrição
Soja		Áreas cultivadas com a cultura da soja.

Fonte: MapBiomias (2020). Imagens Google Earth. Elaborado pela autora.

O dado original apresentava a classe “Não observado”, correspondente a áreas bloqueadas por nuvens ou ruído atmosférico, ou com ausência de observação. Houve uma ocorrência dessa tipologia nos mapas selecionados, mas ficou evidente que se tratava do limite da massa d’água do Lago Guaíba, sendo verificado através da função *Select by attributes* do ArcGIS. Dada a importância do lago para fins de avaliação dos SE, a classe “Não observado” foi somada à “Rio e Lago”.

3.2 CENÁRIOS FUTUROS DE USO E COBERTURA DA TERRA

As mudanças no uso e cobertura da terra são um motor de mudança global que afeta diretamente o status e a integridade dos ecossistemas e, por consequência, sua capacidade de fornecer SE.

A partir das variações ocorridas no intervalo de 35 anos, sendo a paisagem inicial definida como ano de 1985 e a paisagem final o ano de 2020, foi possível modelar o cenário tendencial para os anos de 2030 e 2050, seguindo a tendência histórica recente de mudança, através do *software open source* DINAMICA EGO versão 6.1.0.

O DINAMICA EGO permite a avaliação de questões ambientais através da composição de um modelo de simulação espacialmente explícito, possibilitando a evolução de diferentes cenários com base na situação ambiental existente (RODRIGUES; SOARES-FILHO; COSTA, 2007). Esta ferramenta oferece como vantagens acesso fácil e gratuito, processamento rápido dos resultados do modelo e uso relativamente fácil e manuais que podem ser consultados na página do programa.

Sobre a importância dos modelos, Liu (2009) sustenta que seu uso permite que sistemas complexos da realidade sejam simplificados para que possam ser compreendidos e gerenciados, e sua aplicação em pesquisas científicas é importante em muitos aspectos. O autor adverte que os modelos

são estruturas simplificadas da realidade que apresentam características ou relacionamentos supostamente significativos de forma generalizada, e eles não incluem todas as observações ou medições associadas aos sistemas que modelam. Assim, a característica fundamental dos modelos é que sua construção envolve uma atitude seletiva perante a informação, ou seja, apenas os aspectos fundamentais, relevantes ou interessantes do sistema real aparecem de alguma forma generalizada. A característica seletiva dos modelos também implica que os modelos se assemelham ao sistema do mundo real em algum aspecto; eles são estruturas aproximadas da realidade. Um bom modelo representa o mundo real de forma simplificada, porém válida e adequada. O modelo deve ser simples o suficiente para que seja entendido facilmente e utilizado na tomada de decisões. Deve ser adequado para conter todos os elementos importantes do sistema do mundo real e deve ser válido porque todos os elementos modelados devem estar corretamente inter-relacionados de acordo com suas conexões ou estruturas (LIU, 2009, p. 3)

O modelo utiliza o método de inferência estatística e as abordagens de alocação de autômatos celulares (SOARES-FILHO; PENNACHIN; CERQUEIRA, 2002). Autômatos celulares são entendidos como sistemas espaciais dinâmicos, que têm por base a ideia de que o estado de uma célula (pixel) da matriz depende do estado prévio das células que se encontram dentro de uma determinada vizinhança, de acordo com um conjunto de regras de transição (ROCHA, 2012).

O ano de 2030 foi selecionado por ser o horizonte para os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil da ONU, especialmente o Objetivo 15 – Vida terrestre, que visa “Proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da terra e deter a perda de biodiversidade” (ONU, 2022) e 2050 por ser referência para a Avaliação Ecosistêmica do Milênio (MEA, 2005).

O Dinamica EGO segue dez etapas que consistem em: 1) Calcular matrizes de transição; 2) Calcular intervalos para categorizar variáveis contínuas; 3) Calcular os Pesos de Evidência; 4) Analisar a correlação de mapas; 5) Montar e rodar o modelo de simulação de uso e cobertura da terra; 6) Validar a simulação usando a função de decaimento exponencial; 7) Validar a simulação usando a função de decaimento constante; 8) Rodar a simulação com a formação de manchas (*patch*); 9) Rodar a

simulação com a formação e expansão de manchas; 10) Projetar as trajetórias de uso e cobertura da terra.

Além dos mapas de paisagem inicial e final, correspondentes aos mapas em arquivo *raster* do Projeto Mapbiomas para os anos 1985 e 2020, respectivamente, o modelo recebeu um conjunto de mapas denominado *cubo raster* composto por uma série de mapas estáticos, assim denominados porque não mudam durante a iteração do modelo. Os mapas que compuseram o *cubo raster* foram elevação, provenientes do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), declividade (em graus, a partir da elevação SRTM), solos (STRECK *et al.*, 2008), hidrografia (SEMA, 2018), rodovias pavimentadas (SEMA, 2018) e áreas urbanas (SEMA, 2018). Os limites desses mapas foram estabelecidos no *software* ArcGis a partir do recorte da bacia do Lago Guaíba (SEMA, 2018). Com a ferramenta “envelope” foi gerado um polígono regular abrangendo toda a área e feito um *buffer* de 500 m para garantir que todas as feições de interesse permanecessem dentro do limite. Por fim, os arquivos foram reprojatados para SIRGAS UTM 22 e convertidos de polígonos para *raster*.

A proposta dos autômatos celulares no Dinamica EGO permite aos usuários definir ou editar parâmetros para controlar o tamanho médio das manchas que orientam a transição específica das classes de uso e cobertura, podendo ser utilizado de forma automática ou para uma abordagem tendencial, sendo que o próprio *software* oferece ferramentas para validação do modelo (WOLDEYOHANNES *et al.*, 2020; SOARES-FILHO; RODRIGUES; COSTA, 2009).

Como uma plataforma para modelagem ambiental, o Dinamica EGO tem sido aplicado em uma variedade de estudos. Além da expressivo número de trabalhos relacionados à modelagem de mudanças de uso e cobertura da terra (BRANCO; ALMEIDA; FRANCISCO, 2022; CRUZ; BLANCO; OLIVEIRA JÚNIOR, 2022; GOMES *et al.*, 2021), outros estudos contemplam o impacto das queimadas sobre os biomas no Brasil (REIS *et al.*, 2021; OLIVEIRA *et al.*, 2022), mudanças climáticas (MENDOZA-PONCE *et al.*, 2021) e alteração de uso e cobertura da terra correlacionadas aos serviços ecossistêmicos (BACHI *et al.*, 2020; DIB *et al.*, 2020; HINATA; BASSO; SANTOS, 2021; PETRONI; SIQUEIRA-GAY; GALLARDO, 2022; WOLDEYOHANNES *et al.*, 2020).

Através da abordagem temporal que considera o passado como fator que deixou marcas impressas no presente, a modelagem dinâmica que se faz possível

através do emprego de autômatos celulares permite avaliar quais as condições atuais e quais os diferentes tipos de cenários podem ser vislumbrados no futuro, permitindo a gestores, políticos e público em geral prever situações futuras com base em escolhas atuais (VIÉGAS; CRUZ; SOUZA, 2021).

3.3 MÉTODO DE VALORAÇÃO DOS SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS

Decorridos 25 anos da publicação original, a metodologia empregada por Robert Costanza e colaboradores (1997) ainda é uma das mais coerentes e referenciadas, por isso foi escolhida para valoração dos serviços ecossistêmicos na BHLG. A atribuição dos valores para a maior parte dos SE partiu de uma síntese da revisão pormenorizada de mais de cem estudos de valoração dos serviços ecossistêmicos nos diversos biomas do planeta disponíveis à época, debatida por equipe multidisciplinar durante um workshop intensivo de uma semana no Centro Nacional de Análise e Síntese Ecológica da Universidade da Califórnia em Santa Bárbara (Estados Unidos).

Para composição dos valores, o primeiro critério adotado foi a divisão entre sistemas marinho e terrestre. O sistema terrestre fornece um grande número de serviços, e ainda que sua contribuição seja indiscutível para os processos naturais, foram encontradas poucas informações econômicas para avaliação da formação do solo, tratamento de resíduos, regulação de gases, controle biológico, polinização ou refúgio. Muitas dessas contribuições para as quais não foram encontradas informações, foram incluídas em estudos de maior escala e na contagem de serviços ecossistêmicos globais totais (COSTANZA *et al.*, 1997).

A etapa seguinte consistiu em associar cada SE a um bioma, considerando-se as estimativas de valor conforme os métodos de avaliação, localização e valores declarados. A Tabela 2 mostra os valores médios em dólares (por hectare) para o ano de 1994, do estudo de Costanza e colaboradores (1997), estimando os 17 serviços ecossistêmicos selecionados. Esses valores serão corrigidos para valores atuais, o que permitirá calcular o valor total por bioma junto com a respectiva área de superfície estimada atual, por tipo de serviço.

Tabela 2 - Resumo do valor médio global dos serviços ecossistêmicos anuais (US\$/ha/ano) (COSTANZA *et al.*, 1997).

Bioma	Serviços Ecossistêmicos																	
	1 Regulação de gás	2 Regulação do clima	3 Regulação de distúrbios	4 Regulação da água	5 Suprimento de água	6 Controle da erosão e retenção sedimentar	7 Formação do solo	8 Ciclagem de nutrientes	9 Tratamento de resíduos	10 Polinização	11 Controle biológico	12 Habitat/Refúgio	13 Produção de alimentos	14 Matéria prima	15 Recursos genéticos	16 Recreação	17 Cultural	Valor total (dólares/ha/ano)
Floresta		141,00	2,00	2,00	3,00	96,00	10,00	361,00	87,00		2,00		43,00	138,00	16,00	66,00	2,00	969,00
Tropical		223,00	5,00	6,00	8,00	245,00	10,00	922,00	87,00				32,00	315,00	41,00	112,00	2,00	2.007,00
Temperada/boreal		88,00					10,00		87,00		4,00		50,00	25,00		36,00	2,00	302,00
Pastagens	7,00			3,00		29,00	1,00		87,00	25,00	23,00		67,00			2,00		244,00
Zonas úmidas	133,00		4.539,00	15,00	3.800,00				4.177,00			304,00	256,00	106,00		574,00	881,00	14.785,00
Manguezais/estuários			1.839,00						6.696,00			169,00	466,00	162,00		658,00		9.990,00
Pântanos/várzeas	265,00		7.240,00	30,00	7.600,00				1.659,00			439,00	47,00	49,00		491,00	1.761,00	19.580,00
Lagos/rios				5.445,00	2.117,00				665,00				41,00			230,00		8.498,00
Deserto																		
Tundra																		
Gelo/rocha																		
Terras cultivadas										14,00	24,00		54,00					92,00
Ambiente urbano																		

Células sombreadas indicam os serviços que não ocorrem ou são considerados insignificantes. Células em branco indicam falta de informação disponível.

Fonte: elaborado pela autora.

A composição de valores para a regulação do clima no bioma Floresta Tropical foi elaborada com base no método de avaliação os custos de danos evitados e custos marginais de redução na Amazônia, Costa Rica, Indonésia, Malásia e México. Nas áreas de pastagem, o serviço de regulação dos gases nocivos como CO₂ (dióxido de carbono), NO_x (óxidos de nitrogênio) e CH₄ (metano), regulação do clima, regulação da água e formação do solo, foram avaliados segundo o custo de oportunidade em áreas de pastagem nos Estados Unidos; o controle da erosão foi avaliado e a produção de alimentos foram avaliados pela renda líquida em áreas de pastagem.

O custo de oportunidade é um conceito fundamental usado na economia para indicar o custo de algo em termos de uma oportunidade renunciada, ou seja, o custo, até mesmo social, causado pela renúncia do ente econômico, bem como os benefícios que poderiam ser obtidos a partir desta oportunidade renunciada ou, ainda, a mais alta renda gerada em alguma aplicação alternativa.

No contexto de recursos naturais e atividades econômicas, o custo de oportunidade pode ser o “valor perdido por não se optar por atividade econômica considerada lucrativa, em prol da conservação de florestas” (WUNDER *et al.*, 2009, p. 61) ou “o valor econômico que o produtor rural poderia receber caso estivesse realizando alguma atividade econômica em uma porção de sua propriedade, mas prefere dar outra aplicação nessa mesma área (JUNIOR; REIS, 2020, p. 140).

Em termos de valoração dos serviços ambientais,

Em muitos casos, o valor dos serviços ambientais não é percebido pelos potenciais provedores, que fazem uso alternativo dos ecossistemas para obter benefícios econômicos imediatos. Há produtores rurais que desenvolvem atividades agropecuárias em função de seus valores culturais e econômicos, em detrimento da conservação da vegetação nativa, que lhes poderia oferecer produtos extrativos (madeira, alimentos, resinas, óleos medicinais), água limpa, absorção de carbono, dentre outros. Por outro lado, se o produtor rural renunciar a uma prática agropecuária, arcará com um custo, que é denominado “custo de oportunidade”. Desse modo, o custo de oportunidade pode ser entendido como a receita que o produtor rural deixa de auferir quando destina uma determinada área para ser ocupada com vegetação nativa (ANA, 2012, p. 21-22).

No âmbito da classe Rios e Lagos, o serviço de Regulação da Água foi avaliado segundo preços de mercado relacionados a produção de energia hidrelétrica e análise de custo-benefício da navegação, assim como o serviço de Suprimento de água foi avaliado considerando preços de mercado da irrigação, abastecimento doméstico e industrial. O valor do serviço Produção de Alimentos foi calculado com

base na produção de pescados e o serviço de Recreação com base na pesca esportiva.

A escolha por um modelo de valoração de SE tendo como base metodologias fundamentadas em outros países pode mostrar discrepâncias em relação ao tipo de uso da terra e valor atribuído a cada serviço no Brasil, mas ainda assim representa uma adaptação segura e homogênea em relação a SE tão diversificados.

Para representar a realidade brasileira, poderiam ter sido utilizados dados do Censo Agropecuário do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que historicamente têm se mostrado razoavelmente realísticos em termos de preços e produtividade média das culturas agrícolas, mas há menos confiança em dados sobre expansão das pastagens e culturas anuais e perenes, uma vez que as taxas de desmatamento publicadas pelo INPE e calculadas com base em imagens de satélite são geralmente mais altas do que aquelas sugeridas nos bancos de dados do IBGE (WUNDER, 2009).

O território brasileiro por si só já apresenta ampla heterogeneidade de biomas, bem como custos de produção locais, diversidade de ecossistemas e uso e cobertura da terra e, mesmo que houvesse estudos que pudessem ser incorporados para valoração do SE em âmbito nacional, ainda assim não seriam representativos para a totalidade.

3.4 MÉTODO DE CAPACIDADE DE FORNECIMENTO DE SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS

A avaliação de Costanza realizada em 1997 recai sobre uma escala global, com base na valoração de SE, que fornece informações importantes do ponto de vista da economia. Entretanto, há controvérsia se esse tipo de avaliação seria diretamente aplicável a decisões em escalas regionais ou locais, já que a falta de dados apropriados para esse tipo de quantificação seria insuficiente, além de ser criticada por negligenciar diferenças espaciais dos tipos de habitat (BURKHARD *et al.*, 2009). As avaliações em termos não monetários são muito poucas, embora sejam necessárias abordagens padronizadas para quantificar os serviços ecossistêmicos (VANDEWALLE *et al.*, 2009).

Avaliar os serviços ecossistêmicos através de uma abordagem pautada no conceito de integridade ecológica, sem considerar a valoração do serviço, foi a

metodologia adotada por Burkhard e colaboradores (2009). A integridade ecológica expressa o suporte e preservação daqueles processos e estruturas que são pré-requisitos essenciais da capacidade ecológica de auto-organização dos ecossistemas (MÜLLER; BURKHARD, 2007), e tem comportamento similar aos serviços de suporte conforme os critérios da MEA (2005), integrando os serviços de regulação, provisão e culturais.

Na prática, a avaliação através da integridade ecológica é representada através de uma matriz descritiva que pode ser transformada em mapas que ilustram o potencial de determinadas áreas para fornecer SE, sem considerar questões de dependência e interações de escala, heterogeneidade de habitat e aspectos temporais (BURKHARD *et al.*, 2009). Mas o foco dos autores com essa avaliação consiste em discutir principalmente qual o potencial que diferentes unidades de cobertura da terra têm para fornecer SE, e se é possível derivar uma metodologia de avaliação geral para várias áreas e escalas. Os autores advertem que

*toda a análise é um modelo da realidade que tenta reduzir a complexidade dos sistemas humano-ambientais de maneira apropriada, lógica e reprodutível. Assim, generalizações e simplificações devem ser toleradas para receber uma imagem holística de sistemas complexos (BURKHARD *et al.*, 2009, p. 5).*

Para avaliar as capacidades de diferentes tipos de cobertura da terra para fornecer serviços ecossistêmicos, foi criada uma matriz que apresentou em seu eixo y 44 tipos de classes de cobertura da terra do projeto CORINE da União Europeia (EEA, 1994), definidos pelos níveis: 1) superfícies artificiais, 2) áreas agrícolas, 3) florestas e áreas seminaturais, 4) zonas úmidas e 5) corpos d'água. No eixo x foram definidos 29 SE selecionados com base em (COSTANZA *et al.*, 1997; DE GROOT, 2006; MEA, 2005) e a lista de componentes de integridade ecológica descritos por Müller e Burkhard (2007) e Müller (2005), identificados anteriormente no Quadro 3 do item 2.3.3.

Nos cruzamentos (no total 1276) foram avaliadas as capacidades dos diferentes tipos de ocupação da terra para a prestação do serviço individual, numa escala composta por: 0 = sem capacidade relevante, 1 = capacidade relevante baixa, 2 = capacidade relevante, 3 = capacidade relevante média, 4 = capacidade relevante alta e 5 = capacidade relevante muito alta. Esses resultados são apresentados no Quadro 7 abaixo.

Quadro 7 - Matriz para a avaliação das capacidades dos diferentes tipos de cobertura da terra para fornecer serviços ecossistêmicos.

Uso e cobertura da terra conforme CORINE (BURKHARD <i>et al.</i> , 2009)		Integridade Ecológica Σ	Heterogeneidade abiótica	Biodiversidade	Fluxos bióticos de água	Eficiência metabólica	Captura de energia	Redução da perda de nutrientes	Capacidade de armazenamento	Serviços de Regulação Σ	Regulação do clima local	Regulação do clima global	Proteção contra inundações	Recarga de águas subterrâneas	Regulação da qualidade do ar	Regulação da erosão	Regulação de nutrientes	Purificação da água	Polinização	Serviços de Provisão Σ	Plantações	Pecuária	Forragem	Pesca	Aquicultura	Alimentos silvestres	Madeira	Combustível de madeira	Energia	Bioquímicos e medicamentos	Água fresca	Serviços Culturais Σ	Recreação e valores estéticos	Valor intrínseco da biodiversidade
Continuous urban fabric	Tecido urbano contínuo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Discontinuous urban fabric	Tecido urbano descontínuo	7	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Industrial or commercial units	Unidades industriais ou comerciais	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Road and rail networks	Redes rodoviárias e ferroviárias	4	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Port areas	Áreas portuárias	2	1	1	0	0	0	0	0	3	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	
Mineral extraction sites	Locais de extração mineral	4	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Dump sites	Sites de despejo	8	2	1	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Construction sites	Canteiros de obras	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Green urban areas	Áreas urbanas verdes	18	3	3	2	1	4	3	2	11	2	1	0	2	1	2	1	1	1	2	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	3	3	0	
Sport and leisure facilities	Instalações desportivas e de lazer	16	2	2	2	1	4	3	2	9	1	1	0	2	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	0	
Non-irrigated arable land	Terra arável não irrigada	22	3	2	3	4	5	1	4	5	2	1	1	1	0	0	0	0	0	21	5	5	5	0	0	0	0	0	5	1	0	1	1	0
Permanently irrigated land	Terra permanentemente irrigada	21	3	2	5	2	5	1	3	5	3	1	1	0	0	0	0	0	0	18	5	5	2	0	0	0	0	0	5	1	0	1	1	0
Ricefields	Campos de arroz	20	3	2	5	1	5	1	3	4	2	0	0	2	0	0	0	0	0	7	5	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	
Vineyards	Vinhedos	14	3	2	3	1	3	0	2	3	1	1	0	1	0	0	0	0	0	5	4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	5	5	0	
Fruit trees and berries	Árvores de fruto e bagas	21	4	3	4	2	3	2	3	19	2	2	2	2	2	2	1	1	5	13	5	0	0	0	0	4	4	0	0	0	5	5	0	
Olive groves	Oliveiras	17	3	2	3	2	3	1	3	7	1	1	0	1	1	1	1	1	0	12	4	0	0	0	0	4	4	0	0	0	5	5	0	
Pastures	Pastagens	24	2	2	4	5	5	2	4	8	1	1	1	1	0	4	0	0	0	10	0	5	5	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	
Annual and permanent crops	Culturas anuais e permanentes	18	2	2	3	2	4	2	3	7	2	1	1	1	1	1	0	0	0	21	5	5	5	0	0	0	0	5	1	0	1	1	0	
Complex cultivations patterns	Padrões de cultivos complexos	20	4	3	3	2	4	1	3	5	2	1	1	1	0	0	0	0	0	9	4	0	3	0	0	0	0	0	2	0	2	2	0	
Agriculture and natural vegetation	Agricultura e vegetação natural	19	3	3	3	2	3	2	3	13	3	2	1	2	1	3	0	1	0	21	3	3	2	0	0	3	3	3	1	0	5	2	3	
Agro-forestry areas	Áreas agroflorestais	27	4	4	4	3	4	4	4	13	2	1	1	1	1	2	1	1	3	14	3	3	2	0	0	3	3	0	0	0	3	3	0	
Broad-leaved forest	Floresta latifoliada	31	3	4	5	4	5	5	5	39	5	4	3	2	5	5	5	5	5	21	0	0	1	0	0	5	5	5	0	5	0	10	5	5
Coniferous forest	Floresta de coníferas	30	3	4	4	4	5	5	5	39	5	4	3	2	5	5	5	5	5	21	0	0	1	0	0	5	5	5	0	5	0	10	5	5
Mixed forest	Floresta mista	32	3	5	5	4	5	5	5	39	5	4	3	2	5	5	5	5	5	21	0	0	1	0	0	5	5	5	0	5	0	10	5	5
Natural grassland	Pastagem natural	30	3	5	4	4	4	5	5	22	2	3	1	1	0	5	5	5	0	5	0	3	0	0	2	0	0	0	0	0	6	3	3	
Moors and heathland	Mouros e charneças	30	3	4	4	5	4	5	5	20	4	3	2	2	0	0	3	4	2	10	0	2	0	0	1	0	2	5	0	0	10	5	5	
Sclerophyllous vegetation	Vegetação esclerófila	21	3	4	2	3	3	4	2	7	2	1	1	1	0	0	0	0	2	8	0	2	0	0	1	0	2	0	3	0	6	2	4	
Transitional woodland shrub	Arbusto de transição	21	3	4	2	3	3	4	2	3	1	0	0	0	0	0	0	0	2	5	0	2	0	0	1	0	2	0	0	0	4	2	2	
Beaches, dunes and sand plains	Praias, dunas e planícies de areia	10	3	3	1	1	1	0	1	6	0	0	5	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	7	5	2	
Bare rock	Rocha nua	6	3	3	0	0	0	0	0	3	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	0	
Sparingly vegetated areas	Áreas com vegetação esparsa	9	2	3	1	0	1	1	1	3	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Burnt areas	Áreas queimadas	6	2	1	0	0	0	0	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inland marshes	Pântanos insulares	25	3	2	4	4	4	3	5	14	2	2	4	2	0	0	4	0	7	0	2	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Peatbogs	Turfeiras	29	3	4	4	4	4	5	5	24	4	5	3	3	0	0	3	4	2	5	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	8	4	4	
Salt marshes	Pântanos salgados	23	2	3	4	3	3	3	5	8	1	0	5	0	0	0	2	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	
Intertidal flats	Planícies entre-marés	13	2	3	0	2	1	4	1	7	1	0	5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	0	
Water courses	Corros de água	18	4	4	0	3	3	1	10	1	0	2	1	0	0	3	3	0	12	0	0	0	3	0	4	0	0	0	0	5	10	5	5	
Water bodies	Corpos d'água	23	4	4	0	4	4	3	4	7	2	1	1	2	0	0	1	0	12	0	0	0	3	0	4	0	0	0	0	5	9	5	4	
Coastal lagoons	Lagoas costeiras	25	4	4	0	5	5	3	4	5	1	0	4	0	0	0	0	0	16	0	0	0	4	5	4	0	0	3	0	0	9	5	4	
Estuaries	Estuários	21	3	3	0	5	5	3	2	9	0	0	3	0	0	0	3	3	0	17	0	0	0	5	5	4	0	0	3	0	0	7	4	3
Sea and ocean	Mar e oceano	15	2	2	0	3	3	4	1	13	3	5	0	0	0	0	5	0	11	0	0	1	5	5	0	0	0	0	0	0	6	4	2	

0= sem capacidade relevante

1= baixa capacidade relevante

2= capacidade relevante

3= média capacidade relevante

4= alta capacidade relevante

muito alta capacidade relevante

Fonte: Elaborado pela autora. Adaptado de Burkhard *et al.* (2009).

Essa matriz foi aplicada em casos reais em diferentes países, inclusive no Brasil (ROSA, J. *et al.*, 2020; ROSA, J. C. S.; SOUZA; SÁNCHEZ, 2020), selecionando-se apenas os tipos de cobertura da terra que ocorrem nas áreas de estudo, sendo adaptadas conforme as especificidades locais.

Essa escala relativa de 0 a 5 oferece uma maneira de avaliar alternativamente a contabilidade monetária ou métodos de transferência de valor, mas os valores devem ser verificados cuidadosamente em outros estudos de caso e substituídos por números de outras pesquisas associadas, monitorizações ou estatísticas, quando disponíveis (BURKHARD *et al.*, 2012).

4 CAPÍTULO IV: RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esse capítulo apresenta os resultados em termos da avaliação o uso e cobertura da terra ocorridos nos últimos 35 anos (1985 a 2020), bem como as transformações previstas no cenário tendencial.

O item 4.1 traz as modificações no uso e cobertura da terra no período de 1985 a 2020. No item 4.2 são apresentados os resultados para a atribuição de valor dos SE para as classes Rio e Lago, Formação florestal, Formação campestre, Campo alagado e área pantanosa, Arroz, Soja e Silvicultura. O item 4.3 traz a avaliação segundo a capacidade de fornecimento dos SE. O item 4.4 exibe a análise comparativa entre as duas metodologias.

4.1 MODIFICAÇÕES NO USO E COBERTURA DA TERRA DE 1985 A 2020

As distribuições espaciais dos padrões de uso e cobertura da terra observados e projetados na BHLG e suas mudanças são apresentadas na sequência, ressaltando-se que a paisagem mudou significativamente durante os últimos 35 anos.

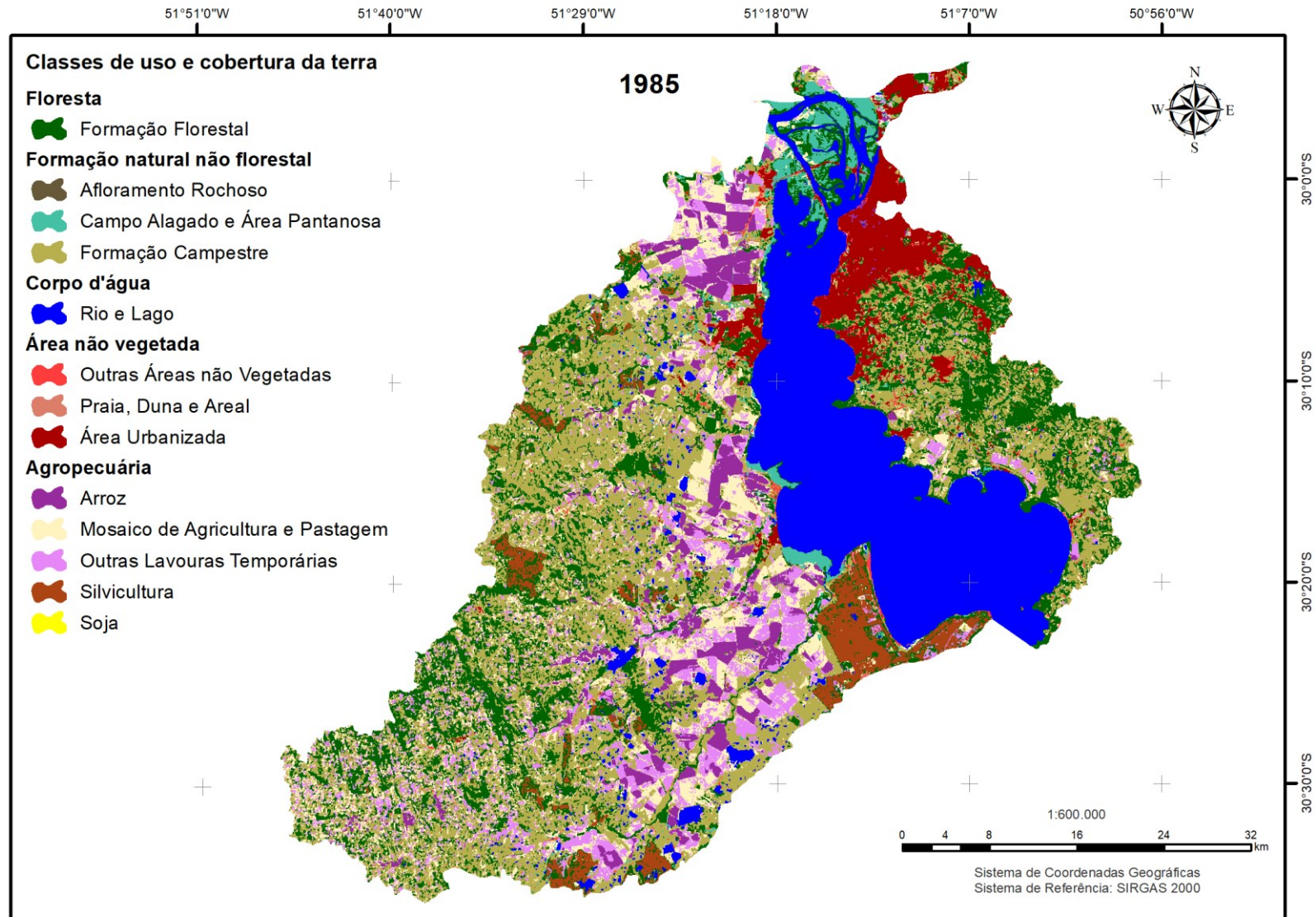
A Tabela 3 traz informações sobre a alteração em hectares para as classes de uso e cobertura da terra, sendo primeiramente averiguadas as modificações a partir de 1985 até 2020, acompanhadas pelos respectivos mapas (Figura 8 e Figura 9).

Tabela 3 - Transformações no uso e cobertura da terra observadas (1985 a 2020) e cenário tendencial (2030 e 2050) na BHLG.

Classes de uso e cobertura da terra	1985 (ha)	2020 (ha)	Variação (%) 1985-2020
Afloramento Rochoso	10,00	9,49	-5,07%
Área Urbanizada	12.509,87	18.613,05	48,79%
Arroz	14.389,00	24.597,68	70,95%
Campo Alagado e Área Pantanosa	6.352,93	8.469,68	33,32%
Formação Campestre	84.912,40	54.357,31	-35,98%
Formação Florestal	55.946,12	65.779,14	17,58%
Mosaico Agricultura/Pastagem	30.546,09	24.969,89	-18,26%
Outras Áreas não Vegetadas	2.997,20	1.645,49	-45,10%
Outras Lavouras Temporárias	23.972,98	15.491,60	-35,38%
Praia, Duna e Areal	36,93	25,85	-30,02%
Rio e Lago	56.073,00	55.889,00	-0,33%
Silvicultura	9.540,19	21.639,28	126,82%
Soja	0,00	5.801,41	-
Total Geral	297.286,70	297.288,86	-

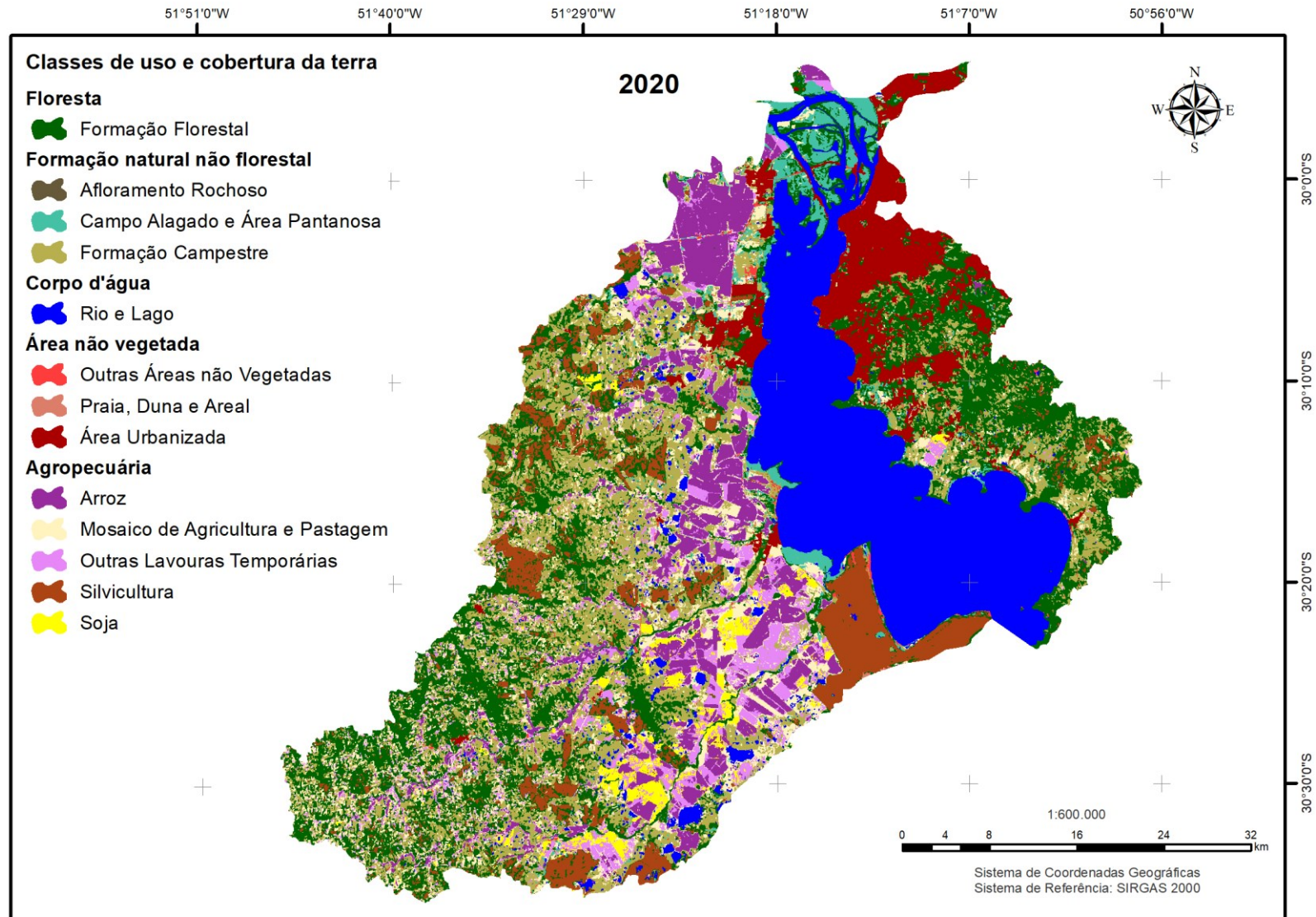
Fonte: elaborado pela autora.

Figura 8 - Uso e cobertura da terra observadas em 1985 na BHLG.



Fonte: elaborado pela autora.

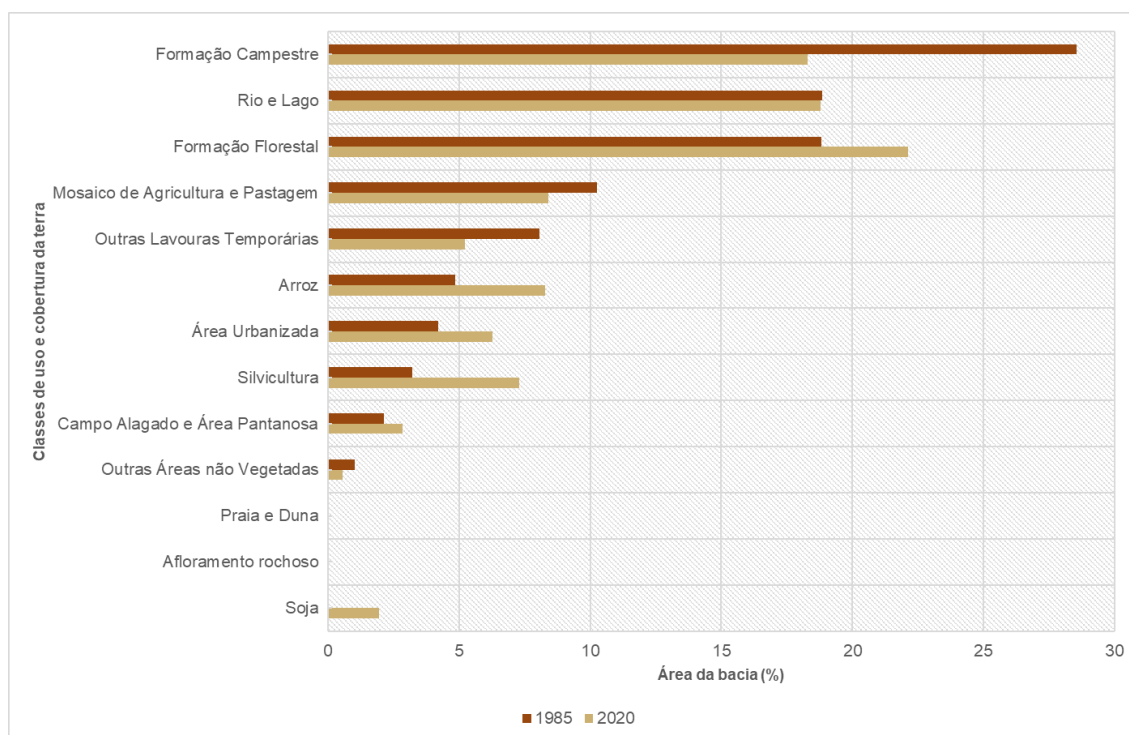
Figura 9 - Uso e cobertura da terra observadas em 2020 na BHLG.



Fonte: elaborado pela autora.

Os usos com ocupação expressiva e que sofreram as maiores perdas foram Formação Campestre, Outras Lavouras Temporárias e Mosaico de Agricultura e Pastagem (-35,98%, -35,38% e -18,26%, respectivamente), conforme mostrado na Tabela 3 e Figura 10.

Figura 10 - Variação (%) nas classes de uso e cobertura da terra para os anos 1985 e 2020.



Fonte: elaborado pela autora.

A Formação Campestre corresponde à vegetação com predomínio de estrato herbáceo graminoide, com presença de manejo pastoril (pecuária), e está diretamente relacionada ao bioma Pampa. Na maioria dos casos equivale à vegetação nativa, mas podem estar presentes manchas de vegetação exótica invasora ou de uso forrageiro (pastagem plantada) (MAPBIOMAS, 2021). Essa cobertura predominou na BHLG em 1985, e sofreu uma perda expressiva de 35,98% no período 1985-2020, passando de uma ocupação de 28,56% da área da bacia em 1985 para 18,28% em 2020.

A diminuição da Formação Campestre ocorreu em toda a bacia, mas foi mais evidente em municípios da porção oeste com atividade agropecuária predominante, como Barra do Ribeiro (-55,38%), Eldorado do Sul (-79,06%), Guaíba (-37,73%), Mariana Pimentel (-76,45%), Sertão Santana (-50,81%) e Tapes (-73,35%). A diminuição dos serviços prestados pela Formação Campestre é um *trade-off* entre os serviços prestados pela Silvicultura, Arroz, Soja e Formação Florestal, sendo que o avanço da Soja sobre esse uso já foi constatado no município de Guaíba (HINATA; BASSO; SANTOS, 2021). A diminuição das pastagens e crescimento das lavouras

também foi percebido na comparação dos dados do Censo Agropecuário de 2006 e 2017 (IBGE, 2020), onde as pastagens tiveram queda de -3,3 pontos percentuais em comparação ao crescimento de mais de 2,0 pontos percentuais das lavouras. A parcela da área dos estabelecimentos agropecuários ocupada com matas e florestas também cresceu no mesmo período (SPGG/DEE, 2022). Ressalta-se que os quantitativos apresentados com recorte municipal correspondem somente a área do município inserida na BHLG.

As áreas de pastagem são consideradas o principal uso da terra no Brasil, estando vinculadas à subsistência do maior rebanho comercial do mundo. De 1985 a 2017, as áreas de pastagem sofreram retração apenas nos biomas Mata Atlântica (11,3 Mha) e Pampa (4,04 Mha), principalmente nos últimos anos do período, onde cederam lugar para cultivos mais intensivos e rentáveis economicamente, como soja e cana-de-açúcar (PARENTE *et al.*, 2019).

Em termos percentuais, o aumento mais expressivo ocorreu com o avanço das áreas de Silvicultura (Figura 11).

Figura 11 - Uso identificado como Silvicultura no município de Guaíba/RS.



Foto: Sumirê Hinata.

Se em 1985 esse cultivo ocupava 9.540,19 ha da área da BHLG, em 2020 alcançou 21.639,28 ha, o que se traduz em um aumento de 126,82%. Barra do Ribeiro, Eldorado do Sul, Guaíba, Mariana Pimentel, Sentinela do Sul, Sertão Santana

e Tapes passaram a desenvolver intensamente a silvicultura ao longo dos 35 anos analisados. Esse uso tem grande importância na região em função da planta de beneficiamento de celulose de uma empresa multinacional chilena localizada no município de Guaíba.

A empresa oferece alguns benefícios aos produtores rurais gaúchos, em função de limitações impostas pela legislação, que restringe a compra de terras por empresas estrangeiras. Estudo realizado nos municípios de Barra do Ribeiro e Mariana Pimentel registrou o crescimento da área cultivada com eucalipto de 126,27 km² para 194,87 km² entre 1986 e 2010 (ARAÚJO, 2011).

Outro uso com aumento significativo na BHLG é o cultivo de Arroz, que ocupava 14.389 ha da bacia em 1985 passando para 24.597,68 ha em 2020, um acréscimo de 70,95%. Os municípios que se destacaram nesse uso foram: Barra do Ribeiro, onde os arrozais abrangiam 8.176,91 ha em 1985 e ampliaram-se para 12.290,71 ha em 2020 (aumento de 50,31%), Eldorado do Sul, que passou de 3.741,32 ha em 1985 para 6.897,78 ha em 2020 (aumento de 84,34%) e Guaíba com aumento de 3.651 ha em 1985 para 11.133,77 ha em 2020 (aumento de 204,95%).

O avanço das lavouras de arroz ocorreu principalmente sobre a Formação Campestre e Outras Lavouras Temporárias. Apesar da ampliação da área destinada ao arroz, esse cultivo também cedeu espaço para as lavouras de soja. Este também é um *trade-off* que favorece a *commodity* soja, que nos últimos anos tornou-se um dos maiores setores exportadores do agronegócio gaúcho, respondendo por mais da metade do total das exportações (SPGG/DEE, 2022).

Junto com a proteína animal (carnes), a proteína vegetal (complexo soja) concentrou as vendas externas do agronegócio no estado, “desempenho diretamente vinculado ao crescimento demográfico e da renda e à diversificação da cesta de consumo alimentar de países asiáticos, com destaque para a China” (FEIX *et. al.*, 2022, p. 17). No primeiro semestre de 2022, a soja foi o setor com maior participação nas exportações (26,9%).

Nota-se através da Figura 8 e Figura 9 que a classe Soja passa a figurar na bacia a partir dos anos 2000, estabelecendo-se com maior intensidade especialmente nos municípios de Barra do Ribeiro e Tapes, ocupando em 2020 áreas de 3.668,68 ha e 1.576,25 ha, respectivamente, expandindo-se por Guaíba (364,17 ha), Sentinela do Sul (215,03 ha) e a zona sul de Porto Alegre (111,65 ha) (Figura 12), área da capital que possui características rurais e conta com produtores engajados neste cultivo.

Figura 12 - Propriedade com cultivo de soja na zona sul de Porto Alegre.



Foto: Jefferson Botega / Agência RBS.

Avaliando-se o volume de produção, o uso da terra e o comércio internacional, a soja destaca-se como uma das culturas mais importantes do mundo atualmente. Investimentos na agroindústria promovidos pelo estado em conjunto com outros atores do agronegócio expandiram as fronteiras da soja, de modo que, nos últimos 60 anos, a produção global aumentou quase 1.000%, enquanto as áreas com cobertura destinada ao cultivo dessa planta mais do que quadruplicou (OLIVEIRA; SCHNEIDER, 2016).

A produção global de soja em 2022/23 está prevista para um recorde de 394,7 milhões de toneladas, um aumento de 13% em relação a 2021/2022. A produção de soja do Brasil deve acompanhar essa tendência e aumentar 24 milhões de toneladas, atingindo 149 milhões em 2022/2023, registrando-se o 17º ano consecutivo de expansão desse plantio, resultado da forte demanda das exportações e excelente retorno dos produtores, apesar dos altos preços dos fertilizantes (USDA, 2022).

A partir da mudança do padrão de consumo da população chinesa, conforme explicado no item 2.2, a condição da soja de *commodity* industrial, e não agrícola na China, permitiu a liberalização de suas importações a partir de 2002, o que trouxe como resultado o aumento quase exponencial das importações, predominantemente dos Estados Unidos e Brasil (OLIVEIRA; SCHNEIDER, 2016)

Esses fatores, associados ao favorecimento do mercado internacional, explicam o aumento das áreas de cultivo para a soja na BHLG a partir dos anos 2000, e a sua expansão em municípios predominantemente urbanizados como Porto Alegre em anos mais recentes.

Silva e colaboradores (2021) mostraram que as relações homem-natureza dentro de um sistema afetam os sistemas adjacentes, ou seja, mudanças de uso e cobertura da terra em um município influenciam a dinâmica de mudanças em municípios adjacentes. A facilidade de logística e comércio, e a proximidade de polos de produção mais desenvolvidos acabam impulsionando os produtores a expandir para novas áreas adjacentes, promovendo ainda mais a expansão da soja.

O aumento vertiginoso da produção e exportação do cultivo da soja vêm acompanhado de problemas ambientais severos, que acarretam em mudanças diretas e indiretas no uso e cobertura da terra nos biomas brasileiros (OLIVEIRA; SCHNEIDER, 2016). No Rio Grande do Sul, os danos causados pela deriva de agrotóxicos utilizados na produção de soja já foram sentidos sobre a produção de uvas (WENZEL, 2018), oliveiras e outras culturas (ROLLSING, 2021). Outros 480 milhões de abelhas morreram somente entre o final de 2018 e o início de 2019 envenenadas por agrotóxicos, sendo mais de 60% das amostras contaminadas pelo fipronil, inseticida usado na soja (COSTA, 2019).

Fora dos limites territoriais nacionais, mas não menos preocupante, o cultivo de soja na Argentina traz sérios riscos ao meio ambiente e à população rural, que tem sofrido com aumento de casos de câncer, provavelmente em função da dispersão de produtos químicos aplicados naquela lavoura, que tem como maior importador a Alemanha. Este caso, que é considerado um dilema moral e legal, deve abrir precedentes para que o país importador tenha responsabilidade jurídica sobre os danos causados no local onde ocorre a produção (ESSWEIN; ZERNACK, 2022).

A Área Urbanizada teve aumento de 48,79% na BHLG passando de 12.509,87 ha em 1985 para 18.613,05 ha em 2020, com destaque para os municípios de Porto Alegre (Figura 13), Guaíba e Canoas, que possuem as maiores áreas urbanas da bacia. Ainda que Canoas possua a maior parte de seu território inserido na bacia como Área Urbanizada, vale apontar que houve crescimento da classe associada ao campo em todo o município, pois espécies pioneiras tendem a ocupar áreas degradadas ou desmatadas, mantidas sem ocupação para fins de especulação imobiliária (HOFMANN; MARCOS; HASENACK, 2017).

Figura 13 - Área urbanizada no município de Porto Alegre/RS.



Foto: Sumirê Hinata.

A zona sul do município de Porto Alegre apresenta uma interessante confluência de usos que devem se tornar divergente conforme o avanço de diferentes interesses econômicos. Se por um lado essa área sofre com as intervenções urbanas inerentes à especulação imobiliária, acarretando impactos como impermeabilização do solo, retificação de cursos d'água e problemas de escoamento de canais, que condicionam maior ou menor suscetibilidade a inundações (MOURA *et al.*, 2016), por outro prisma pode ser alvo de interesses do agronegócio.

Dentre tantos outros fatores economicamente atrativos, a soja recebe por parte do governo nacional estímulos fiscais (questões tributárias, financiamento, desburocratização de negociações comerciais), além da demanda do mercado internacional de países em crescimento como China e Índia, mais a abertura comercial de países do Leste Europeu (CUIABANO, 2019). A expansão das lavouras de soja deve se consolidar cada vez mais em quase todos os municípios da BHLG.

Uma das coberturas mais importantes em termos de áreas conservadas na BHLG consiste na Formação Florestal (Figura 14). Esse uso corresponde à vegetação lenhosa com espécies arbóreas ou arbóreo-arbustivas, com predomínio de dossel contínuo, e inclui as tipologias florestais ombrófila, decidual e semidecidual e parte

das formações pioneiras (MAPBIOMAS, 2022). Esse uso passou de 55.946,12 ha em 1985 para 65.779,14 ha em 2020, um aumento de 17,58% em 35 anos, informação que pode ser corroborada pelo aumento da área dos estabelecimentos agropecuários ocupada com matas e florestas registrado nos censos agropecuários de 2006 e 2017 (FEIX *et al.*, 2022).

Figura 14 - Formação florestal (ao fundo) e Campo alagado e área pantanosas (primeiro plano) no município de Guaíba/RS.



Foto: Sumirê Hinata.

Uma análise temporal de 1976 a 2002 para todo o Rio Grande do Sul evidenciou o comportamento distinto entre a perda da cobertura natural florestal e a campestre. A cobertura campestre teve 27.350,42 km² convertidos para agricultura, enquanto as regiões florestais apresentaram acréscimo de 3.412,31 km² (CORDEIRO; HASENACK, 2009).

Ainda que a zona sul de Porto Alegre apresente impactos decorrentes da atividade antrópica, como assoreamento e solapamento das margens dos rios e arroios devido à falta de mata ciliar, plantio de culturas, pisoteio de animais e plantações de eucalipto (LEITE *et al.*, 2004), essa região abriga áreas de preservação como o Parque Estadual de Itapuã, que mantém a cobertura vegetal original da região, composta por restingas, florestas e campos, sendo uma das últimas amostras do ecossistema original na região metropolitana do município (CZYKIEL; ALVES; RITTER, 2015; BERETTA *et al.*, 2008). A porção de Viamão inserida na bacia também apresentou aumento da cobertura Formação Florestal, passando de 10.112,28 ha em 1985 para 17.720,09 ha em 2020, um aumento de 75,23%.

Por último, mas não menos importante, destaca-se a importância em área do Lago Guaíba (Figura 15), que compõe a maior parte da classe “Rio e Lago”. Esse corpo hídrico contempla usos consuntivos como abastecimento humano (urbano e rural), irrigação da agricultura, uso para indústrias, por exemplo, e não consuntivos, como a pesca, esportes, navegação, lazer e contemplação da paisagem.

Figura 15 - Classe “Rio e lago” representada pelo Lago Guaíba, zona sul do município de Porto Alegre/RS.



Foto: Sumirê Hinata.

Essa classe sofreu uma perda mínima de 0,33% entre 1985 e 2020, provavelmente em função do assoreamento das margens do lago e de outros reservatórios menores. A importância dessa classe é ímpar para a manutenção de todo o equilíbrio dos outros ecossistemas e serviços ecossistêmicos que integram a BHLG.

Em síntese, para o período de 1985 até 2020 pode-se observar a expansão de classes de uso e cobertura da terra associadas a *commodities* como Soja, Arroz e madeira da Silvicultura sobre usos como Outras Lavouras Temporárias e Mosaico de Agricultura e Pastagem, tendo maior perda a Formação Campestre. Esse é um exemplo explícito de *trade-off* onde produtos com maior valor econômico e que oferecem maiores lucros aos proprietários se sobrepõem a usos onde prevalecem os aspectos de melhoria e conservação do meio ambiente.

4.1.1 Transformações para os cenários futuros (2030 e 2050)

Cenários são narrativas que mostram como futuros alternativos podem se desdobrar a partir de uma conjunção de fatores incertos, e não são previsões ou modelos preditivos, mas explorações plausíveis (não prováveis) do futuro (HERNÁNDEZ-BLANCO *et al.*, 2020).

O planejamento de cenários é baseado em quatro premissas: 1) o futuro é diferente do passado e é significativamente moldado pelas escolhas e ações humanas, 2) o futuro não pode ser previsto, mas pode explorar possíveis futuros que influenciem as decisões presentes, 3) há muitas possibilidades futuras, e os cenários, portanto, mapeiam dentro de um “espaço de possibilidade”, e 4) o desenvolvimento do cenário envolve tanto a análise racional quanto o pensamento criativo (COSTANZA, 2014).

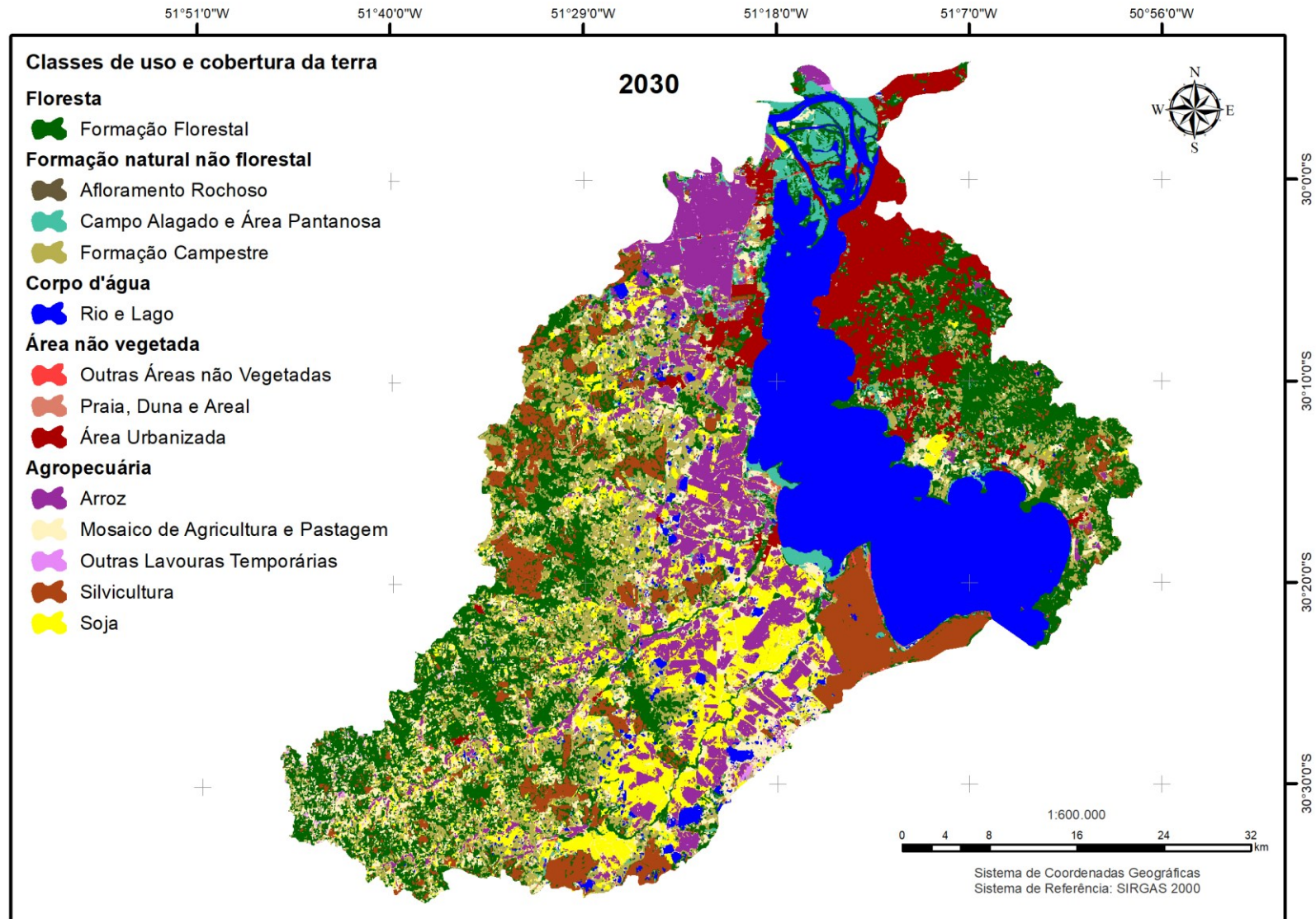
O cenário tendencial resultante do modelo do Dinamica EGO também indica uma mudança significativa de uso e cobertura da terra para os anos 2030 e 2050 como mostra a Tabela 4, a Figura 16 e a Figura 17 a seguir. Outras Lavouras Temporárias, Formação Campestre e Outras Áreas não Vegetadas tendem a perder considerável superfície na bacia com o avanço de outros usos.

Tabela 4 - Transformações no uso e cobertura da terra para o cenário tendencial (2030 e 2050) na BHLG.

Classes de uso e cobertura da terra	2030 (ha)	2050 (ha)	Variação (%)	
			2020-2030	2020-2050
Afloramento Rochoso	9,48	9,66	-0,09%	1,79%
Área Urbanizada	19.896,77	21.929,72	6,90%	17,82%
Arroz	31.399,41	42.198,07	27,65%	71,55%
Campo Alagado e Área Pantanosa	8.469,59	8.465,14	0,00%	-0,05%
Formação Campestre	38.849,87	19.802,33	-28,53%	-63,57%
Formação Florestal	67.574,17	67.629,89	2,73%	2,81%
Mosaico Agricultura/Pastagem	25.548,10	22.508,32	2,32%	-9,86%
Outras Áreas não Vegetadas	1.350,78	904,37	-17,91%	-45,04%
Outras Lavouras Temporárias	947,33	586,51	-93,88%	-96,21%
Praia, Duna e Areal	21,89	21,89	-15,30%	-15,30%
Rio e Lago	55.889,00	55.884,00	0,00%	-0,01%
Silvicultura	23.838,65	28.319,60	10,16%	30,87%
Soja	23.494,57	29.030,96	304,98%	400,41%
Total Geral	297.289,61	297.290,46	-	-

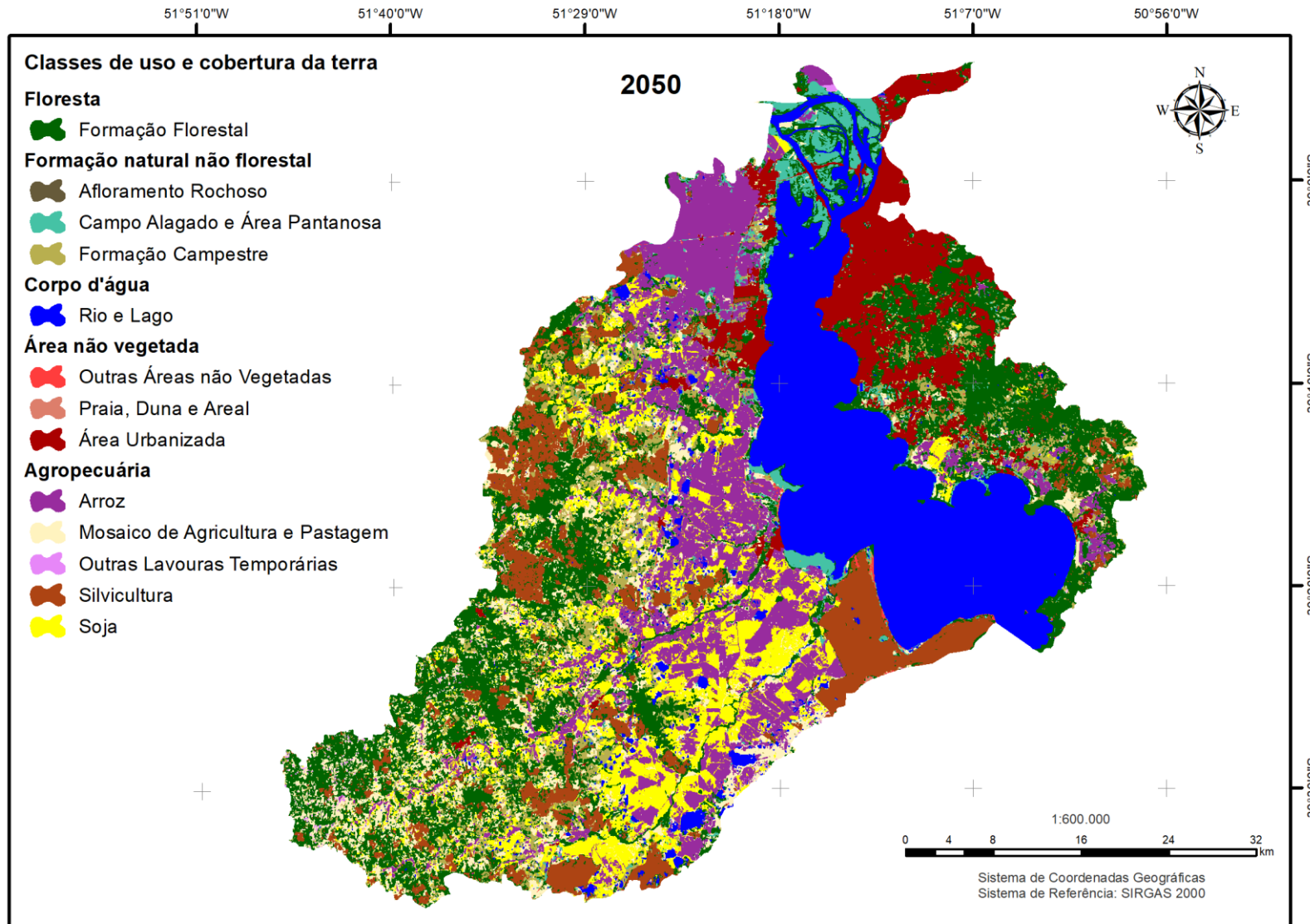
Fonte: elaborado pela autora.

Figura 16 - Uso e cobertura da terra para o cenário tendencial 2030 na BHLG.



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 17 - Uso e cobertura da terra para o cenário tendencial 2050 na BHLG.



Fonte: elaborado pela autora.

Assumindo que o padrão de evolução dos usos e cobertura da terra tenha comportamento semelhante ao do período 1985 a 2020, observa-se que a Formação Campestre pode sofrer uma significativa defasagem em área, com uma diminuição de -28,53% (2020 a 2030) e -63,57% (2020 a 2050). Arroz, Soja e Silvicultura são os principais usos que avançariam sobre a Formação Campestre.

Seguindo a evolução do cenário tendencial, a classe Outras lavouras temporárias deve ter a pior variação, com decréscimo de -93,88% de 2020 a 2030 e -92,21% de 2020 a 2050, passando de 23.972,98 ha em 1985 para 947,33 ha em 2030 e 586,51 ha em 2050. Esse cenário representa uma degradante perda de cultivos associados a agricultura de menor escala e diversidade de cultivos, evidenciando a priorização da produção de *commodities* com maior valor de mercado em detrimento de processos produtivos que promovem maior conservação do meio ambiente e menores impactos sobre o uso e cobertura da terra. Esse *trade-off* fica bem claro ao observar-se o avanço em ritmo vertiginoso da Soja, que tende a aumentar 304,98% de 2020 a 2030 e 400,41% de 2020 até 2050. O Arroz, outro uso agrícola expressivo na bacia, avança 27,65% até 2030 e 71,55% até 2050, e a Silvicultura aumenta 10,16% até 2030 e 30,87% até 2050.

Seguindo a mesma tendência, a classe Outras Áreas não Vegetadas pode perder -17,91% até 2030 e -45,04% até 2050. Essa classe pode conter tanto áreas naturais com superfícies arenosas, como as praias fluviais, como podem já ser áreas com solo exposto e superfícies com atividade antrópica consolidada.

Embora ocupe uma área menor da bacia, a Área Urbanizada deve ter um crescimento moderado até 2030 (6,90%), avançando para 17,82% até 2050 no modelo proposto. Ainda que a BHLG abrigue a capital Porto Alegre, bem como a sede de municípios importantes da Região Metropolitana, como Canoas, Barra do Ribeiro, Guaíba e Eldorado do Sul, os resultados mostram uma evidente predominância da agricultura, que deve apresentar expansão em área principalmente nos municípios da margem direita do lago nas próximas décadas, enquanto a área urbana apresenta crescimento mais concentrado.

Formação Florestal, Campo Alagado e Área Pantanosa, Afloramento Rochoso, Praias, Duna e Areal, e Rios e lagos, tendem a se manter estáveis ou apresentam pouca variação, sendo importantes para a manutenção de ecossistemas naturais e preservação da qualidade ambiental, no mínimo, correspondente a atual.

Hernández-Blanco *et al.* (2020) estimaram as mudanças do valor de uso e cobertura da terra (urbano, plantio, floresta, pastagem e deserto) para o ano de 2050 na América Latina e Caribe, considerando quatro cenários (forças do mercado, reforma política, mundo fortaleza e grande transição). A escala adotada para representação de toda essa grande área não permitiu adequada observação das classes rios e áreas alagadas, por exemplo, que tem grande importância enquanto ecossistema, e as estimativas para as demais classes foram uma simplificação da realidade, mas foram suficientes para fins de exercício exploratório.

Se não forem adotadas medidas contingenciais para controlar o avanço da agricultura sobre a Formação Campestre, as consequências sobre os demais ecossistemas são imprevisíveis. Boldrini (2009) chama a atenção para a descaracterização da paisagem natural dos campos em função da sua substituição pela produção de grãos ou celulose, e ressalta que o uso de agrotóxicos, manejo inadequado e sobrepastejo de animais, são responsáveis pela destruição do ecossistema natural e implicações sobre o meio ambiente.

Alterações sobre os recursos naturais impactam diretamente sobre os serviços ecossistêmicos, entendidos como as características, funções ou processos ecológicos que contribuem direta ou indiretamente para o bem-estar humano (COSTANZA *et al.*, 1997; MEA, 2005). Nesse sentido, devem ser adotados esforços de conservação sobre os remanescentes de bioma, recuperando e manejando ecossistemas incorporados em terras já antropizadas (ELLIS *et al.*, 2010).

Usos já consolidados e que são fundamentais para a manutenção e bem-estar da sociedade devem ter melhor gestão, com adoção de tecnologias alternativas e maior eficácia, que tragam maior sustentabilidade para o meio ambiente. O uso de agrotóxicos nas lavouras de arroz, por exemplo, pode ser substituído com manejo de recursos naturais, como a adoção da técnica que usa marrecos de Pequim, rizipiscicultura (integração de arroz e peixes) e a biodinâmica (alimentos sem agrotóxicos onde a natureza está em equilíbrio com a produção de forma homeopática) verificadas em Barra do Ribeiro (JESUS; SILVA; LAUX, 2015).

O Brasil apresenta perdas além do limite aceitável na produção de soja desde a colheita até o transporte ao destino final (MACHADO *et al.*, 2012; ROMANI *et al.*, 2019), sendo que existem técnicas que podem auxiliar o produtor a ter maior rentabilidade da sua lavoura (SILVEIRA; CONTE, 2013).

Nas áreas de maior urbanização, deve-se prever a redução das descargas orgânicas e de resíduos industriais e urbanos nos corpos hídricos contribuintes da bacia (ANDRADE *et al.*, 2019), além de aumentar a eficiência do tratamento de resíduos.

4.2 ATRIBUIÇÃO DE VALORES AOS SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS

Vinte anos após a publicação da proposta de valoração dos SE para o planeta proposta por Costanza *et al.* (1997), constatou-se que a ideia inicial possibilitou a criação de uma economia ecológica transdisciplinar, com maior capacidade de entender e gerenciar o sistema complexo e interconectado do Antropoceno (COSTANZA *et al.*, 2017).

Partindo deste pressuposto, este estudo quantificou os SE na BHLG com base nos valores propostos inicialmente por Costanza *et al.* (1997), considerando-se os totais em área por hectare para as classes de uso e cobertura da terra do Projeto MapBiomas observados em 1985 e 2020 e projetados para 2030 e 2050 na bacia. Os SE foram correlacionados a essas classes, obtendo-se o valor por tipo de serviço, o total por classe de uso e cobertura da terra e o valor total em dólares americanos (US\$) atualizados conforme a taxa de inflação para o ano de 2022 (Tabela 5). Observou-se que as classes Afloramento Rochoso, Área Urbanizada e Outras Áreas não Vegetadas não receberam nenhum tipo de classificação para os valores de SE, por não existir correspondência para tal.

Na Figura 18 pode-se comparar a distribuição do uso e cobertura da terra (*a, b, c, d*) com o valor proporcional dos serviços ecossistêmicos (*e, f, g, h*) para cada uso e cobertura na BHLG (gráficos na coluna da direita) para os anos 1985 e 2020 e cenários tendenciais 2030 e 2050. No Apêndice I são apresentadas a distribuição dos valores (US\$) por serviço ecossistêmico, por classe e ano.

Os resultados mostraram que em 1985 a BHLG forneceu o total de US\$ 2.017.408.581,00 em SE, passando para US\$ 2.147.051.738,00 no ano 2020. Classes de uso e cobertura tiveram pesos relativos que contribuíram para esse resultado de diferentes maneiras. Os próximos itens trazem uma discussão mais detalhada sobre a valoração dos SE por classe de uso e cobertura da terra, com base nos resultados da Tabela 5.

Tabela 5 - Valor global médio anual dos serviços ecossistêmicos para a BHLG, uso e cobertura da terra em 1985 e 2020, e cenário tendencial para 2030 e 2050).

Classes de uso e cobertura da terra	Serviços Ecossistêmicos (valor em US\$ para o ano 2022*/ha/ano) (adaptado de COSTANZA <i>et al.</i> , 1997)																	Valor total (total SE/área em ha) (em US\$ de 2022)				
	1 Regulação de gás	2 Regulação do clima	3 Regulação de distúrbios	4 Regulação da água	5 Suprimento de água	6 Controle da erosão e retenção sedimentar	7 Formação do solo	8 Ciclagem de nutrientes	9 Tratamento de resíduos	10 Polinização	11 Controle biológico	12 Habitat/Refúgio	13 Produção de alimentos	14 Matéria prima	15 Recursos genéticos	16 Recreação	17 Cultural	Valor total SE (ha/ano)	Ano			
																			1985	2020	2030	2050
Arroz										40,00	68,00		153,00					260,00	3.746.320,00	6.404.252,00	8.175.150,00	10.986.690,00
Campo Alagado e Área Pantanosa	376,00		12.845,00	42,00	10.754,00				11.821,00			860,00	724,00	300,00		1.624,00	2.493,00	41.842,00	265.816.579,00	354.384.360,00	354.380.731,00	354.194.369,00
Formação Campestre	20,00			8,00		82,00	3,00		246,00	71,00	65,00		190,00			6,00		691,00	58.633.708,00	37.534.807,00	26.826.615,00	13.673.902,00
Formação Florestal		631,00	14,00	17,00	23,00	693,00	28,00	2.609,00	246,00				91,00	891,00	116,00	317,00	6	5.683,00	317.921.631,00	373.799.154,00	383.999.662,00	384.316.332,00
Mosaico de Agricultura e Pastagem										40,00	68,00		153,00					260,00	7.952.981,00	6.501.160,00	6.651.704,00	5.860.265,00
Outras Lavouras Temporárias										40,00	68,00		153,00					260,00	6.241.604,00	4.033.394,00	246.647,00	152.704,00
Praia, Duna e Areal			249,00					10.406,00			108,00	23,00	263,00	11,00		232,00	175,00	11.467,00	423.501,00	296.367,00	251.026,00	251.026,00
Rios e Lagos				15.409,00	5.991,00				1.882,00				116,00			651,00		24.049,00	1.348.518.642,00	1.344.093.563,00	1.344.093.563,00	1.343.973.317,00
Silvicultura		249,00					28,00		246,00		11,00		142,00	71,00		102,00	6,00	855,00	8.153.615,00	18.494.225,00	20.373.937,00	24.203.632,00
Soja										40,00	68,00		153,00					260,00	-	1.510.455,00	6.117.046,00	7.558.501,00
Total																			2.017.408.556,00	2.146.755.371,00	2.150.865.054,00	2.144.919.712,00

*A taxa de inflação nos Estados Unidos entre 1984 e 2022 foi de 182,69%, o que se traduz em um aumento total de US\$ 1,83. Isso significa que 1 dólar em 1984 equivale a 2,83 dólares em 2022. Em outras palavras, o poder de compra de US\$ 1,00 em 1984 equivale a US\$ 2,83 hoje. A taxa média de inflação anual entre esses períodos foi de 2,77%. Fonte <https://www.inflationtool.com/us-dollar/1984-to-present-value?amount=1>. As células sombreadas indicam os serviços que não ocorrem ou são considerados insignificantes. Células em branco indicam falta de informação disponível.

Fonte: Elaborado pela autora.

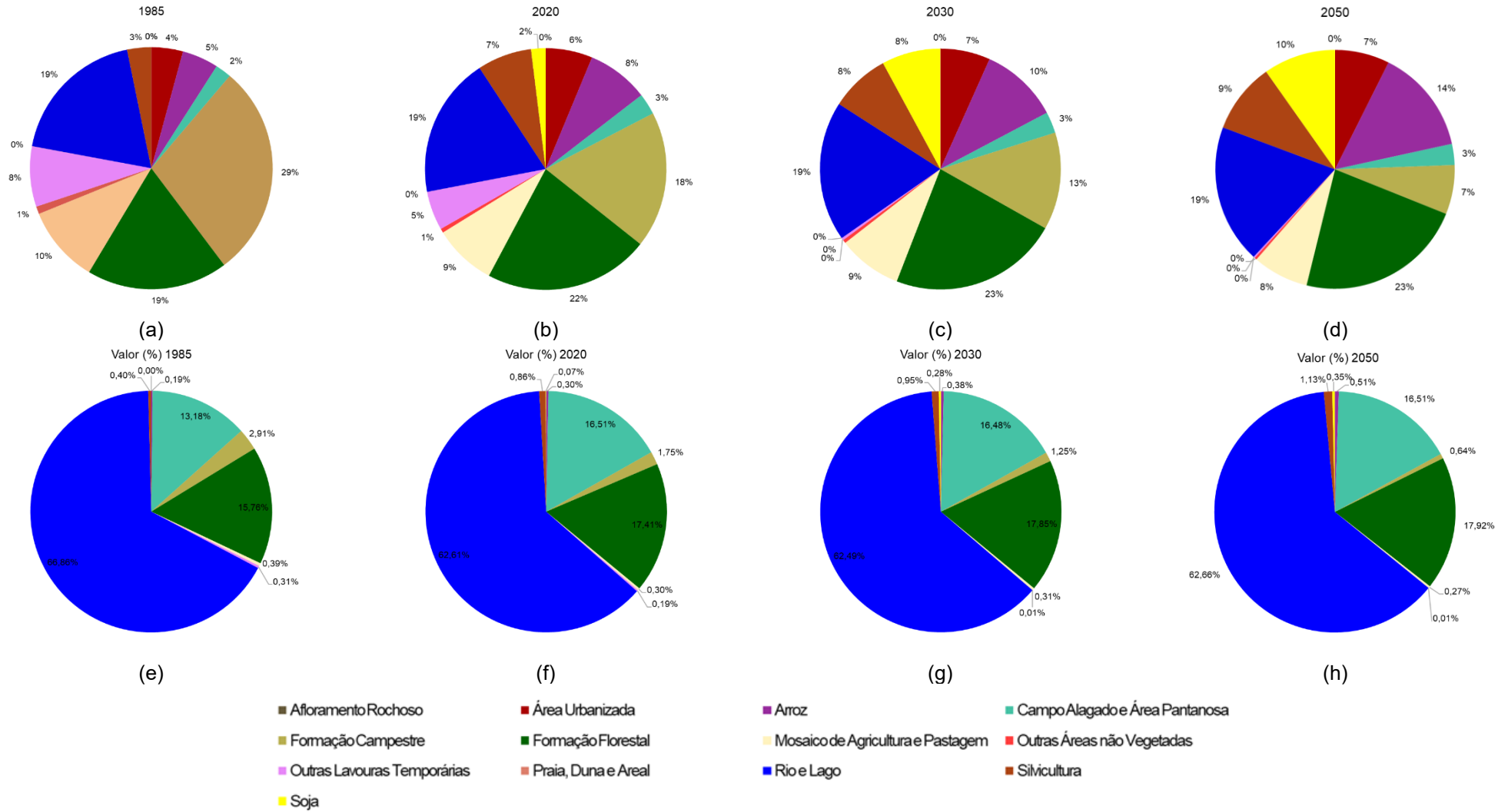


Figura 18 - Distribuição do uso e cobertura da terra (a, b, c, d) e valor proporcional dos serviços ecossistêmicos (e, f, g, h) para cada uso e cobertura da terra na BHLG nos anos 1985 e 2020 e cenários tendenciais 2030 e 2050.

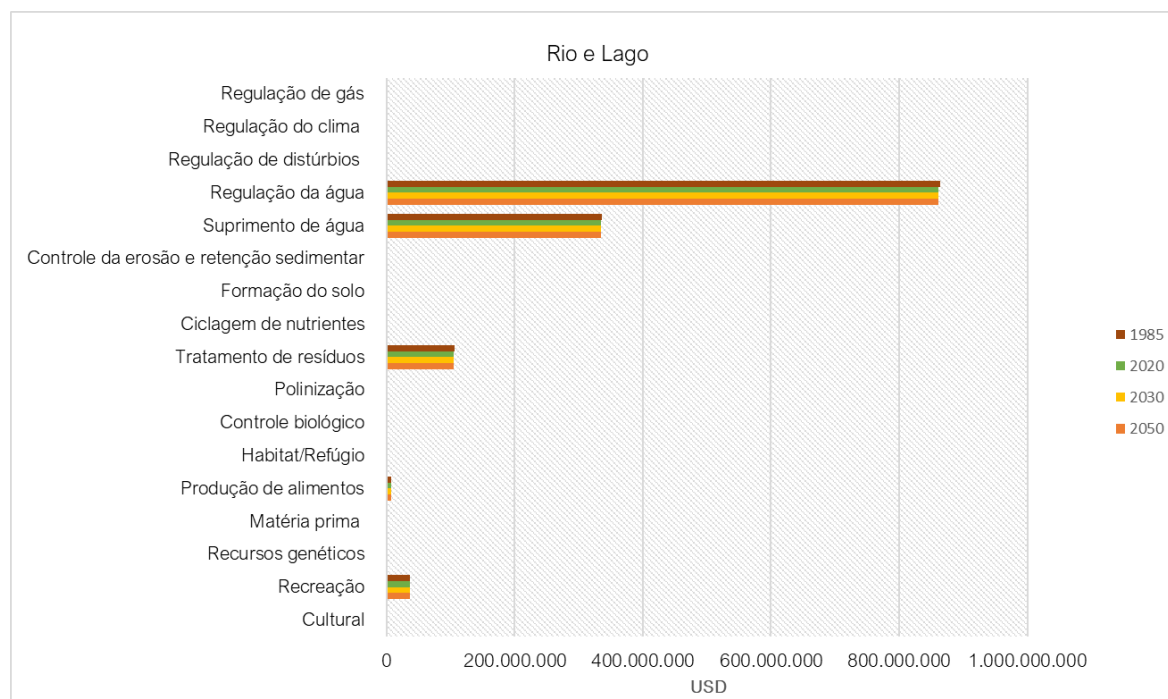
Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.1 Rio e Lago

O maior percentual dos valores observados na BHLG concentrou-se na classe Rio e Lago, tendo como expoente a massa d'água que compõe o Lago Guaíba. Essa classe tinha o valor de US\$ 1.348.518.642,00 (66,86%) em 1985 e US\$ 1.344.093.563,00 (62,61%) em 2020, sendo que a variação possivelmente seja decorrente da diminuição em área de alguns corpos hídricos, por razões de processos de sedimentação nas margens e assoreamento. Através dos gráficos e, f, g, e h da Figura 18, fica evidente a importância em termos de valor de SE dessa classe, ainda que ela não seja a predominante em termos de ocupação territorial.

As águas doces prestam vários serviços de valor econômico: pesca de água doce, redução do excesso de nutrientes, redução da poluição, irrigação, abastecimento de água industrial, para uso doméstico, geração de energia hidrelétrica, recreação e navegação baseadas na água. A classe Rio e Lago fornece serviços essenciais como Regulação e suprimento de água, Tratamento de resíduos, Produção de alimentos e Recreação (Figura 19).

Figura 19 - Distribuição dos SE (US\$/ha/ano) segundo a classe de uso e cobertura da terra “Rio e Lago” nos anos 1985 e 2020 e cenários tendenciais 2030 e 2050.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os serviços “Regulação de água” e “Suprimento de água” forneceram cada um US\$ 15.409,00 e US\$ 5.991,00 por hectare, respectivamente, e alcançaram

grandes proporções na BHLG considerando toda a extensão em área dessa classe. Para os cenários tendenciais observou-se estabilidade para 2030 e declínio leve para 2050.

De forma geral, o Lago Guaíba representa o mais importante provedor de serviço ecossistêmico na bacia, e dada a manutenção de sua expressiva massa d'água, dificilmente haverá perda em termos territoriais. Todavia, questões de qualidade relacionadas às questões hídricas podem comprometer alguns serviços, especialmente na questão do Tratamento de resíduos, incluindo aspectos relacionados ao abastecimento urbano.

Segundo Brauman *et al.* (2007) os serviços hidrológicos terrestres envolvem a) Suprimento de água para usos extrativos diversos: água destinada ao abastecimento público, agricultura, indústria, comércio, termoelétricas; b) Suprimento de água in situ: produção de água nos corpos hídricos propriamente, que possibilita serviços como produção de energia hidrelétrica, recreação, transporte, pesca e outros produtos do ambiente aquático em que não há consumo de água, em oposição à categoria anterior; c) Mitigação de danos relacionados à água: redução de danos, como cheias, salinização de solos em regiões áridas, intrusões salinas, assoreamento de corpos hídricos (rios, lagoas, reservatórios) e eutrofização de sistemas aquáticos; d) Serviços culturais relacionados à água: relacionados a valores estéticos, espirituais, históricos, educacionais e turísticos; e e) Serviços hidrológicos de suporte ao ecossistema: possibilitam a geração de serviços das outras categorias, e compreendem, por exemplo, a provisão de água e de nutrientes essenciais para o crescimento da vegetação e a formação de habitat de organismos aquáticos.

Outros serviços como Regulação de gases de efeito estufa, Regulação do Clima, Habitat/Refúgio também foram fornecidos, fazendo-se necessária avaliação em escala local para valoração dos mesmos. A adoção de outros valores e critérios específicos locais para essa classe permitiriam uma análise mais detalhada para fins de valoração dos SE. O serviço Suprimento de água poderia ser calculado com estimativas de consumo anual (doméstico, industrial e irrigação), assim como o Tratamento de resíduos poderia considerar o custo das estações de tratamento de efluentes.

A estimativa do valor do SE Produção de alimentos pode ter como referência o valor da produção pesqueira local. Nesse sentido, é importante salientar que há expressivo número de pescadores artesanais organizados em associações e cooperativas que pertencem à BHLG, que utilizam valores de referência para suas atividades.

A valoração atribuída ao SE Recreação utilizou como base gastos com pesca esportiva nos Estados Unidos, mas o Lago Guaíba (Figura 20) oferece outras inúmeras atividades que poderiam ser consideradas. Atividades de recreação, esportes, pesca esportiva, contemplação da natureza, poderiam ser mensuradas e definidos valores específicos para cada serviço.

Figura 20 - SE Recreação relacionado à classe de uso e cobertura da terra “Rio e Lago” (Lago Guaíba, município de Guaíba/RS).



Foto: Sumirê Hinata.

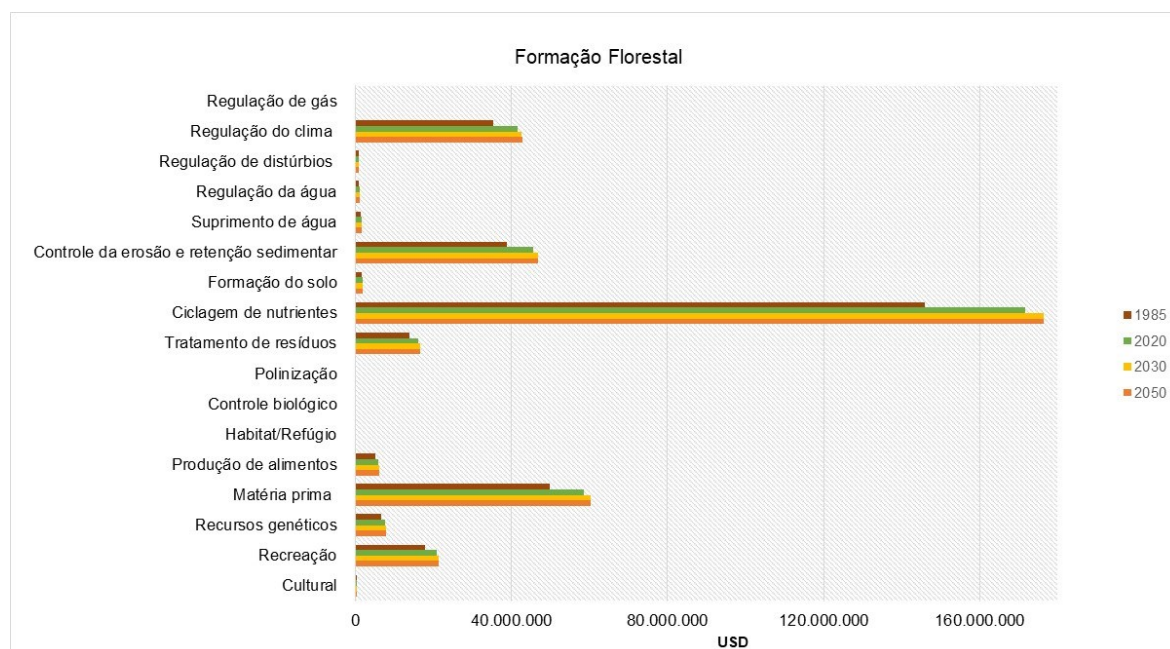
Outra forma não contemplada nesta avaliação refere-se aos serviços Culturais, um importante indicador que pode ser medido através de atividades religiosas, turísticas, contemplação da paisagem, valores estéticos e históricos. Cada uma dessas abordagens poderia ser detalhada em escala local.

4.2.2 Formação Florestal

Essa classe corresponde à segunda maior contribuinte para o valor global dos SE na BHLG, sendo o valor total por hectare de US\$ 5.683,00. Em 1985 tinha valor de US\$ 317.921.631,00 (15,76%) e em 2020 teve valor de US\$ 373.799.154,00 (17,41%), conforme pode ser observado nos gráficos e e f da Figura 18, respectivamente, uma variação de 17,58% em 35 anos. Para o cenário tendencial de 2030 observa-se aumento para US\$ 383.999.662,00 e para o cenário de 2050 pode alcançar US\$ 384.316.332,00.

Essa classe teve aumento significativo de área ao longo dos 35 anos, que também pode ser consequência de áreas de plantio de sistemas agroflorestais (SAFs). A Formação Florestal tem representação significativa e é a classe que fornece a maior variedade de SE: Regulação de gás, do clima, de distúrbios e da água, Controle da erosão e retenção sedimentar, Formação do solo, Ciclagem de nutrientes e matéria-prima, dentre outros apresentados no gráfico da Figura 21.

Figura 21 - Distribuição dos SE (US\$/ha/ano) segundo a classe de uso e cobertura da terra “Formação Florestal” nos anos 1985 e 2020 e cenários tendenciais 2030 e 2050.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Formação Florestal tem valor evidente de uso direto, como fonte de produtos de espécies frutíferas que podem ser colhidos, madeira para diversos fins e até produtos farmacêuticos, mas possuem ainda maior valor indireto ao fornecer uma variedade de serviços ecossistêmicos. Através de seu papel na moderação dos

impactos da chuva e na absorção de água, a Formação Florestal aumenta a estabilidade geofísica, reduzindo a erosão dos solos. A erosão excessiva interfere não só em processos aquáticos, mas reduz a fertilidade do solo e impede a ciclagem de nutrientes.

Os SE fornecidos pela Formação Florestal tem papel fundamental na purificação do ar e sequestro de CO₂, além de proteger os ecossistemas contra disseminação de pragas e realizar o abastecimento de água de qualidade. Em termos de valoração dos SE fornecidos pela Formação florestal, a maior parte dos programas de PSA hídricos estão voltados à produção quanti e qualitativa de água, geralmente com ênfase em práticas para recuperação da vegetação nativa e plantio de mudas, que promovem a diminuição da erosão e da poluição hídrica (PAGIOLA; VON GLEHN; TAFFARELLO, 2013; LAVRATTI; TEJEIRO, 2014).

As árvores desempenham papel fundamental nos processos de armazenamento de água e na evapotranspiração, além de serem condutoras para a retenção de água em reservatórios subterrâneos. Esses processos resultam em um fluxo de água constante a jusante, com redução nos eventos de inundação e estoque médio maior de suprimento de água (COSTANZA *et al.*, 1997).

Florestas fornecem importantes serviços de regulação do clima em escalas locais e globais. Esses serviços são resultado de processos de transpiração, efeitos de albedo e rugosidade e ciclagem de carbono. A precipitação local pode ser reduzida como resultado do desmatamento, uma vez que o armazenamento de água e a evapotranspiração são diminuídos. As florestas servem para proteger contra os danos das tempestades, atuando como quebra-ventos e criando efeitos de rugosidade na diminuição da intensidade das tempestades (KRAMER; HEALY; MENDELSON, 1992; PEARCE; MORAN, 1994).

Assim como em outros tipos de ecossistemas, os valores dos serviços fornecidos pela classe Formação Florestal não são globalmente homogêneos. As castanhas do Pará são colhidas nas florestas tropicais do Brasil, mas não em Madagascar. A proteção da pesca contra a erosão pode ser uma função importante no México, mas não igualmente em todos os locais florestais. Além disso, o valor desses serviços pode diferir significativamente, dependendo das condições de oferta

e demanda e receitas (PEARCE; MORAN, 1994). Novamente adverte-se para a escala generalizada dos resultados dos valores, que necessitam de detalhamento conforme a realidade de cada local.

A Ciclagem de nutrientes assume protagonismo dentro da Formação Florestal, tendo alcançado o valor de US\$ 171.634.870,00 em 2020. A ciclagem de nutrientes ocorre em ecossistemas florestais plantados ou naturais, e tem sido amplamente estudada a fim de aprimorar o conhecimento sobre a dinâmica de nutrientes nesses ambientes, não só para o conhecimento do funcionamento dos ecossistemas, mas também para aumentar as informações para práticas de manejo florestal para recuperação de áreas degradadas e manutenção da produtividade de sítios degradados em recuperação (SOUZA; DAVIDE, 2001).

A ciclagem de nutrientes ocorre de maneira diferente em cada ecossistema, dependendo de condições pluviométricas, do tipo de floresta, da temperatura e estação do ano (SELLE, 2007).

As florestas, em grande parte, estão estabelecidas em solos pobres em nutrientes minerais, o que torna sua manutenção dependente dos ciclos geoquímico, bioquímico e biogeoquímico. Desse modo, os nutrientes no processo de ciclagem passam do meio biótico para o abiótico e vice-versa, sendo esse processo denominado de equilíbrio dinâmico. Com a remoção da floresta esse ciclo é quebrado, alterando a qualidade e a quantidade de matéria orgânica do solo. Com isso ocorre uma diminuição da atividade da biomassa microbiana, principal responsável pela ciclagem de nutrientes e pelo fluxo de energia dentro do solo, e que exerce influência tanto na transformação da matéria orgânica na estocagem do carbono e minerais, ou seja, na liberação e na imobilização de nutrientes (SELLE, 2007, p. 29).

O serviço de Controle da erosão da Formação Florestal refere-se às funções de retenção do solo. A perda da floresta resultaria no aumento do assoreamento de córregos e represas. A degradação da qualidade de um córrego impediria a pesca e as atividades recreativas, enquanto o assoreamento de uma barragem resultaria em uma vida útil mais curta. Esses dados foram utilizados para a valoração desse serviço, considerando os danos evitados, e podem ser aperfeiçoados para condições específicas na bacia. Uma avaliação alternativa poderia utilizar os custos evitados para mitigar os danos do assoreamento, como a instalação de dispositivos de retenção de sedimentos ou o plantio de espécies nativas próximas aos cursos d'água.

Os SE advindos da Formação Florestal são fluxos provenientes do estoque de capital natural. Portanto, os serviços têm uma conotação inerente de

"sustentabilidade" (COSTANZA *et al.*, 1997). As florestas têm valor por seu fluxo sustentável de matéria-prima madeireira, produtos alimentícios, sequestro de carbono, controle de erosão, etc., mas questiona-se se os fluxos existentes de serviços, particularmente madeireiros, são sustentáveis.

As estimativas para o valor de regulação do clima das florestas foram amplamente baseadas em estudos de custos médios de danos evitados ou custos evitados de controles alternativos (LAMPIETTI; DIXON, 1995). Esses estudos estimaram a capacidade de armazenamento de carbono que seria perdida sob várias formas de degradação florestal e os relacionaram a danos futuros ou custos evitados. Portanto, a conversão da floresta para outros usos da terra, como agricultura ou pastagem, libera um fluxo de carbono durante a conversão e reduz a capacidade global de armazenamento de carbono (COSTANZA *et al.*, 1997).

A questão das mudanças climáticas globais tem ocupado papel central na discussão sobre os impactos a sociedade atual e às gerações futuras, em um futuro nem tão distante assim. Os cenários para emissões de gases de efeito estufa (GEE) (principalmente CO₂, CH₄ e N₂O) apontam para a possibilidade de impactos significativos aos ecossistemas nos próximos 100 anos, pois além da elevação da temperatura, devem ser contabilizadas mudanças na precipitação pluviométrica e na frequência de eventos climáticos extremos, como secas, inundações, geadas, tempestades severas, vendavais, granizo, etc. (NOBRE, 2001).

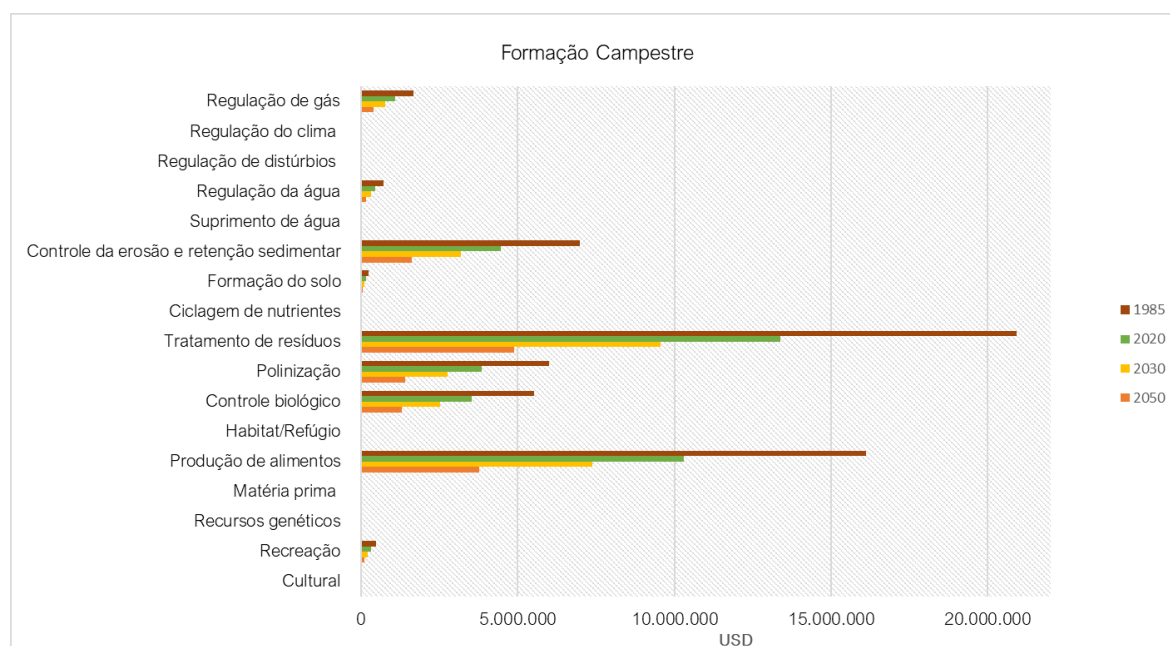
Dessa forma, a função ecossistêmica desempenhada pela Formação Florestal vai muito além do valor estimado, mas esse estudo traz uma aproximação para avaliar minimamente a importância desses serviços não só para a bacia hidrográfica, mas como reflexo em escala regional.

Ressalta-se que a variação entre 1985 a 2020 foi positiva (17,58%), mas o modelo para o cenário tendencial indicou um avanço tímido de 2020 a 2030 (2,73%) e de 2020 a 2050 (2,81%), necessitando-se maiores investimentos e ações voltadas para políticas públicas que promovam maior avanço dessa classe sobre as demais.

4.2.3 Formação Campestre

A Formação Campestre tem entre os principais SE a Regulação de gás e água, Controle da erosão e retenção sedimentar, Tratamento de resíduos, Produção de alimentos, dentre outros (Figura 22). De 1985 a 2020 esse serviço teve uma diminuição de -36%, e o cenário tendencial aponta uma diminuição de -64% de 2020 a 2050.

Figura 22 - Distribuição dos SE (US\$/ha/ano) segundo a classe de uso e cobertura da terra “Formação Campestre” nos anos 1985 e 2020 e cenários tendenciais 2030 e 2050.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Formação Campestre tem maior relação com a vegetação característica do bioma Pampa, e tem importante contribuição para o serviço de Regulação de gás. Estudos recentes realizados a partir da coleta de dados sobre trocas de carbono e metano nos ecossistemas, mostram que a absorção de CO₂ na pastagem natural do Pampa está relacionada à precipitação e temperatura, e apontam que o bioma Pampa pode ser um potencial absorvedor de GEE, em condições de manejo adequado, produzindo proteína animal de qualidade e preservando a fauna e a flora locais (REVISTA ARCO, 2021). Com a diminuição da Formação Campestre, o SE de Regulação de gás teve uma diminuição de US\$ 1.682.115,00 em 1985 para US\$ 1.076.818,00 em 2020, uma perda de -36% em 35 anos, caindo para US\$ 769.616,00 no prognóstico para 2030 e US\$ 392.285,00 em 2050.

Em relação ao SE Regulação da água, sabe-se que o aumento da cobertura vegetal melhora as condições de absorção de água, ao passo que o aumento do escoamento pela falta de cobertura, leva a uma redução da disponibilidade de água, ocasionando falta de retenção de água para açudes, que permitem a dessedentação animal e irrigação de lavouras, deficiência de recarga de aquíferos e aumento da erosão.

Sobre o serviço de Controle de erosão, o valor estimado por Costanza e colaboradores (1997) para perda de solos teve como base a redução dos rendimentos agrícolas, assumindo que perder os primeiros 10 cm do solo resultaria em uma redução de 50% dos rendimentos agrícolas. Uma redução de rendimentos de 50% reduziria o lucro do arrendamento das pastagens, pelo menos, proporcionalmente. Com base em um aluguel líquido médio para pastagens em todo o mundo de US\$ 57,04/ha, os custos do serviço de controle da erosão do solo seriam de US\$ 28,5 ha/ ano. Para a estimativa da BHLG, de 1985 a 2020 a perda com a diminuição desse serviço foi de 36%, passando de US\$ 6.968.760,00 para US\$ 4.461.104,00. No cenário tendencial, esse valor chegaria a US\$ 1.625.177,00 em 2050.

Tornquist e Bayer (2009), considerando que o equilíbrio nos estoques de C orgânico leva em torno de 20 a 30 anos para ser alcançado, afirmaram que

é possível estimar taxas anuais lineares de conservação do C orgânico no solo de 2,4t/ha (8,8 t CO₂/ha). Utilizando US\$ 4,43 por tonelada de CO₂, que foi o valor médio ponderado da tonelada de CO₂ na Chicago Carbon Exchange em 2008 (CCX 2009), e considerando a conversão do campo nativo para agricultura convencional como o pior cenário possível, neste caso poder-se-ia estimar que a conservação de C pela manutenção do campo nativo corresponderia a um valor anual de US\$ 38,9 (4% oferta) a US\$ 60,2 (8-16% oferta) por hectare. Esta abordagem é similar à proposta de valoração da Floresta Amazônica pelo mecanismo de redução de emissões de GEE do desmatamento e degradação das florestas Reduction in Emissions from Deforestation and Forest Degradation (REDD), a qual vem sendo defendida pelo Brasil e alguns outros países nos fóruns internacionais sobre mudanças climáticas (p. 126).

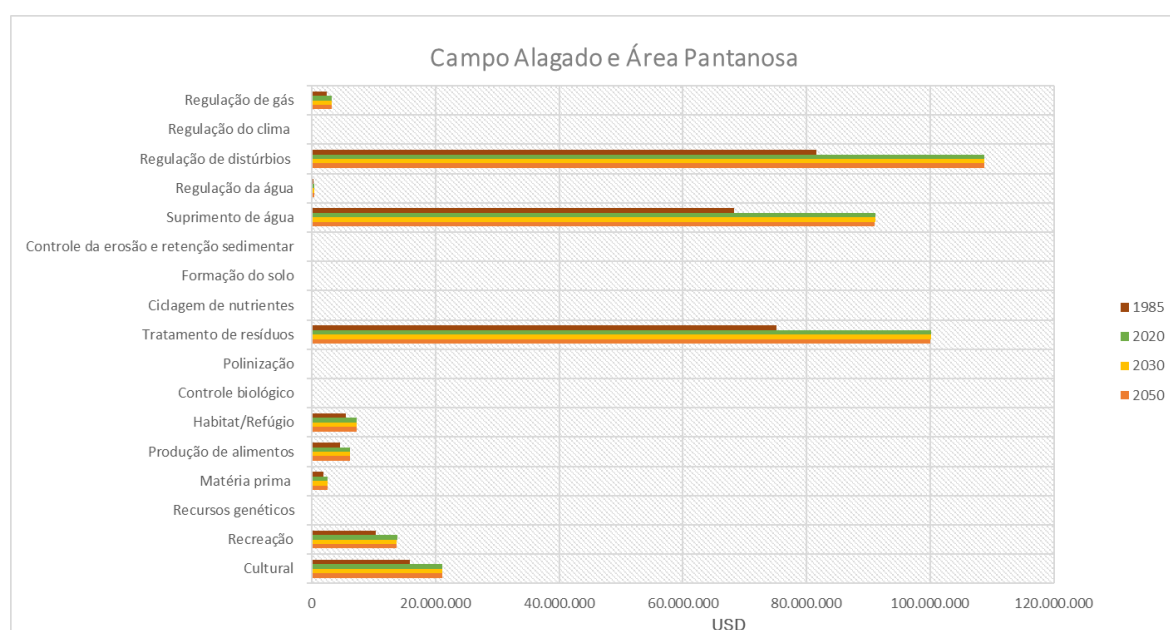
Essa abordagem mostra que há muitas outras formas de cálculo possíveis de serem empregadas para valoração do serviço de Controle de erosão.

4.2.4 Campo Alagado e Área Pantanosa

A classe Campo Alagado e Área Pantanosa apresentou a segunda maior contribuição. Ainda que tenha ocupado apenas 2% em 1985 (Figura 18 a) e 3% em

2020 (Figura 18 b) da BHLG, concentra importantes SE de Regulação de gás, Regulação de distúrbios, Regulação e Suprimento de água, Tratamento de resíduos, Habitat/refúgio, Produção de alimentos, Matéria-prima, Recreação e Cultural (Figura 23), que totalizaram US\$ 265.816.579,00 (13,18%) em 1985 e US\$ 354.384.360,00 (16,51%) em 2020. Essas áreas concentram-se principalmente no delta do Jacuí e na orla do Lago Guaíba, especialmente nos municípios de Barra do Ribeiro, Guaíba e Eldorado do Sul.

Figura 23 - Distribuição dos SE (US\$/ha/ano) segundo a classe de uso e cobertura da terra “Campo Alagado e Área Pantanosa” nos anos 1985 e 2020 e cenários tendenciais 2030 e 2050.



Fonte: Elaborado pela autora.

Por definição, a classe Campo alagado e área pantanosa constituem-se em áreas úmidas, que são

ecossistemas na interface entre ambientes terrestres e aquáticos, continentais ou costeiros, naturais ou artificiais, permanente ou periodicamente inundados ou com solos encharcados. As águas podem ser doces, salobras ou salgadas, com comunidades de plantas e animais adaptados à sua dinâmica hídrica” (MMA, 2015).

Essa classe corresponde às áreas úmidas, que são sistemas altamente produtivos e dinâmicos que prestam muitos serviços à sociedade em seu estado natural. Ao mesmo tempo, essas características levaram o ser humano a converter as zonas úmidas em usos de propósito único (principalmente cultivo agrícola) à custa da perda da maioria das outras funções, e a área de superfície original dos ecossistemas de áreas úmidas diminuiu drasticamente. Algumas dessas conversões levaram a

danos econômicos consideráveis, como a perda do efeito de amortecimento das florestas ribeirinhas e planícies aluviais nos picos de descarga dos rios (por exemplo, inundações no Mississippi em 1994 e inundações na Europa em 1993 e 1994) (COSTANZA *et al.*, 1997).

A estimativa de valoração adotada foi baseada em estudos de caso reais em várias partes do mundo, ponderando-se que o valor social e econômico da maioria das funções varia consideravelmente conforme a situação geográfica e econômica de cada localidade. Por exemplo, o valor da produção de alimentos de uma planície de inundação é avaliado de forma diferente na África (US\$ 12,00/ha/ano) do que na Áustria (US\$ 90,00/ha/ano), por causa da diferença nos valores de mercado e na economia informal. Enquanto na África as pessoas podem depender de uma planície de inundação para uma grande proporção de suas necessidades diárias de subsistência, em outros países equivale a apenas uma pequena porção dos alimentos disponíveis.

Apesar de ocupar uma área muito pequena em relação ao total da bacia, é notável a contribuição do Campo Alagado e Área Pantanosa: 13,18% do total do valor em 1985 e 16,51% em 2020.

O serviço de Regulação de distúrbios, que está relacionado ao controle de enchentes (em várzeas) e proteção contra tempestades, representou 31% nessa classe. Os valores de controle de enchentes e proteção contra tempestades tiveram como base estimativas de danos evitados ou nos custos potenciais e, em alguns casos, a substituição dessa função de pântanos por construções artificiais (COSTANZA *et al.*, 1997). Como não havia dados disponíveis para todos os tipos de zonas úmidas, os autores fizeram um julgamento profissional adequado para converter estes números em um valor total para todas as zonas úmidas.

Devido à sua alta produtividade e natureza dinâmica (tanto no que diz respeito aos fatores abióticos quanto às estruturas da cadeia alimentar), a classe Campo Alagado e Área Pantanosa desempenha um papel muito importante na ciclagem de nutrientes e no tratamento de resíduos. Ela pode absorver e reciclar grandes quantidades de nutrientes e outras substâncias químicas, sem ocasionar efeitos colaterais negativos para o funcionamento geral do ecossistema. A valoração do serviço tratamento de resíduos utilizou como base cálculos de economia de custos e

custos (potenciais) de substituir esta função de zona úmida por meio de tratamento artificial de resíduos (COSTANZA *et al.*, 1997).

O habitat/refúgio representou apenas 2% dentro do Campo Alagado e Área Pantanosa, mas foi identificado somente nessa classe, por isso a importância ímpar desta, tanto no que diz respeito ao seu valor como áreas de berçário para espécies comercialmente importantes (peixes e crustáceos) como como áreas de descanso e alimentação para muitas espécies migratórias (e sedentárias).

Nos cenários prospectivos para 2030 e 2050, o Campo Alagado e Área Pantanosa apresentam crescimento estagnado, o que sugere que esta classe necessita de maior acompanhamento com ações de preservação das áreas já existentes, além de investimentos e criação de políticas públicas que promovam aumento desses ecossistemas, através da criação de Unidades de Conservação e outros mecanismos previstos na legislação ambiental.

4.2.5 Arroz

Conforme apresentado no item 4.1 Modificações no uso e cobertura da terra, o cultivo de Arroz teve um acréscimo de 70,95% em área de 1985 a 2020, mas esse aumento não reflete o mesmo peso em termos de fornecimento de SE.

Essa classe tinha valor de US\$ 3.746.320,00 em 1985 (0,19%), alcançando US\$ 6.404.252,00 (0,30%) em 2020, conforme pode ser observado nos gráficos e e f da Figura 18, respectivamente, uma variação expressiva de 70,95% em 35 anos. O cenário tendencial estimado para 2030 prevê o alcance de US\$ 8.175.150,00, e para 2050, US\$ 10.986.690,00 em SE prestados por essa classe.

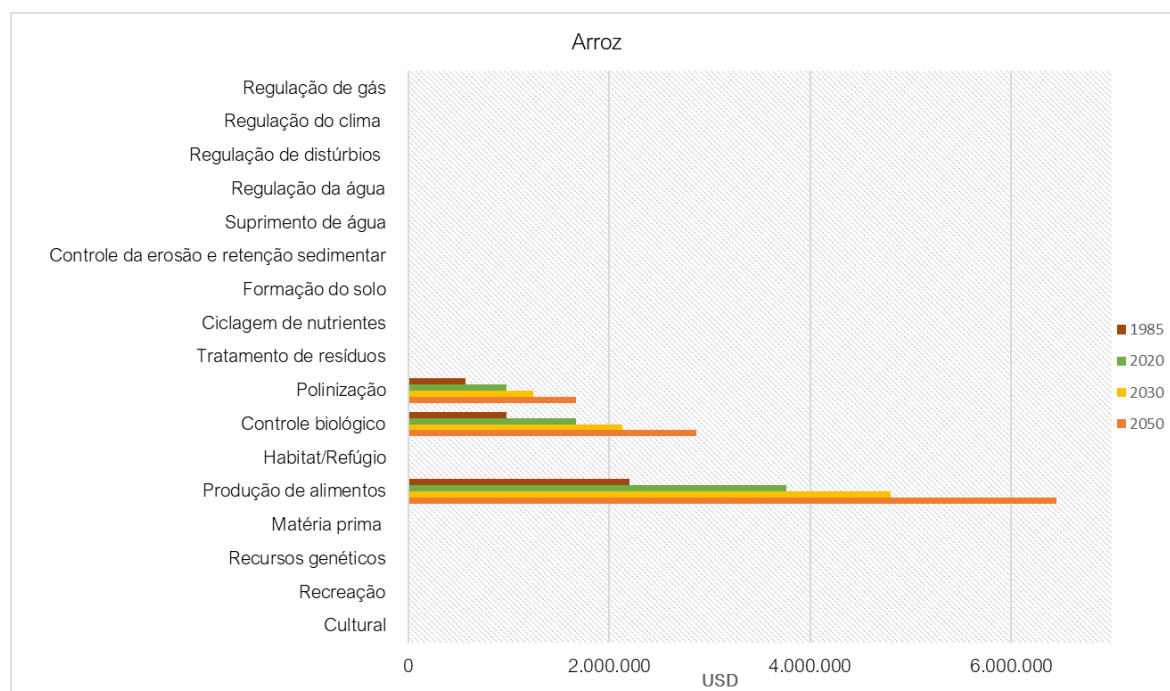
Os SE fornecidos pelo cultivo de Arroz têm obviamente sua maior importância na produção de alimentos (59%, Figura 24), que foram estimados em US\$ 2.198.927,00 em 1985 e em US\$ 3.759.018,00 em 2020.

No cenário tendencial, estima-se que esse serviço alcance US\$ 4.798.458,00 em 2030 e US\$ 6.448.709,00 em 2050. Além da produção de alimentos, essa classe de uso e cobertura da terra oferece serviços de controle biológico (26%) e de polinização (15%).

Ressalta-se que esses valores são uma estimativa que tem como referência a classe “terras cultivadas” descritas por Costanza e colaboradores (1997), sendo,

portanto, genéricas para vários cultivos. Certamente a produção de arroz por hectare, assim como a soja, tem valor muito superior aos US\$ 153,00 propostos, mas trata-se de uma representação média para cultivos diversos, que teve como base referências existentes à época.

Figura 24 - Distribuição dos SE (US\$/ha/ano) segundo a classe de uso e cobertura da terra “Arroz” nos anos 1985 e 2020 e cenários tendenciais 2030 e 2050.



Fonte: Elaborado pela autora.

O avanço das lavouras de arroz se deu principalmente sobre a Formação Campestre e Outras Lavouras Temporárias. Apesar da ampliação da área destinada ao arroz, esse cultivo também cedeu espaço para as lavouras de soja.

O serviço controle biológico teve valor de US\$ 977.301,00 em 1985, passando para US\$ 1.670.674,00 em 2020, com tendência de aumento para 2030 e 2050, em função da expansão da lavoura de arroz. O controle biológico é responsável por restringir a presença de pragas e insetos transmissores de doenças, a partir de outros organismos benéficos existentes na lavoura de arroz.

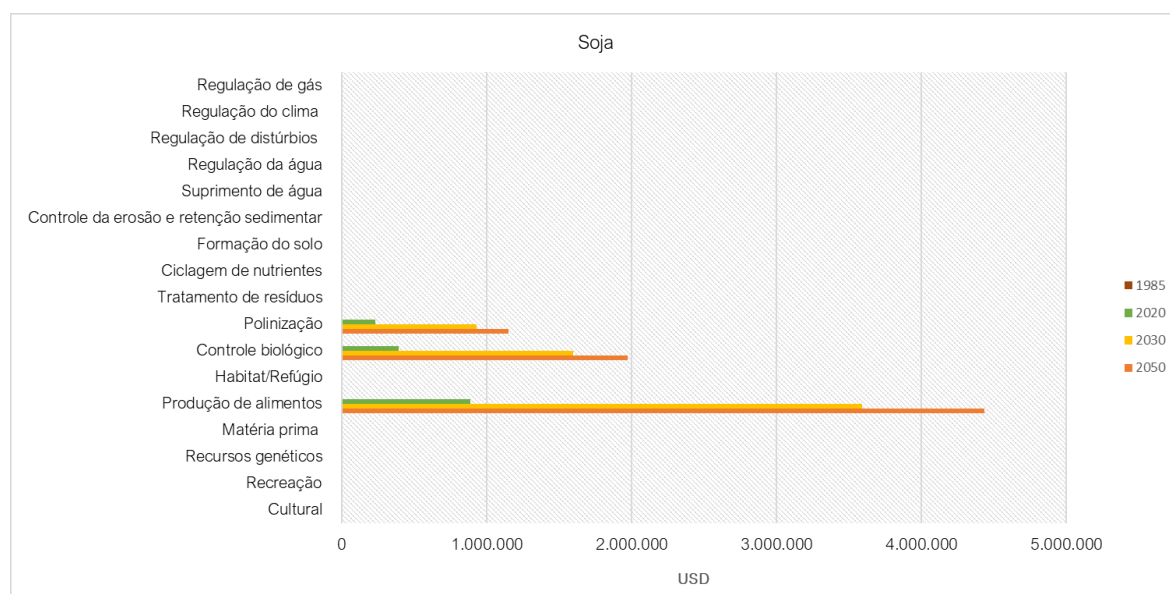
A cultura de arroz é polinizada pelo vento, e não depende de polinizadores (GIANNINI *et al.*, 2015), mas sua extensa área e volume de produção podem promover indiretamente a proteção do SE de polinização, desde que sejam adotadas técnicas de manejo que auxiliem outras culturas com maior desempenho da polinização no entorno.

4.2.6 Soja

O cultivo da Soja começa a aparecer com maior intensidade na BHLG a partir do início da década de 90 segundo o Mapbiomas, e alcançou 5801,41 ha em 2020, uma variação de 126,82%. O valor total dessa classe por hectare consiste em US\$ 260,00 e valor total em 2020 de US\$ 1.510.455,00, com previsão de US\$ 6.117.046,00 em 2030 e US\$ 7.558.501,00 em 2050, uma variação de 400% de 2020 a 2050.

A classe Soja é a que apresentou o maior crescimento no período, mas em termos de contribuição de serviços, tem uma participação limitada a três SE: polinização, controle biológico e produção de alimentos, conforme apresentado na Figura 25, sendo este último obviamente o de maior valoração, alcançando US\$ 886.572,00 em 2020 e para o cenário tendencial prevê-se que alcance US\$ 3.590.440,00 em 2030 e US\$ 4.436.511,00 em 2050. À semelhança dos valores estimados para a classe Arroz, a Soja deve ter um valor de rendimento e venda muito maior por hectare, mas trata-se de uma estimativa para avaliação em termos de SE.

Figura 25 - Distribuição dos SE (US\$/ha/ano) por classe de uso e cobertura da terra “Soja” nos anos 1985 e 2020 e cenários tendenciais 2030 e 2050.



Fonte: Elaborado pela autora.

Em termos de produção de alimentos, essa classe responde por expressivo número de exportações, especialmente para China, conforme já descrito anteriormente.

Ressalta-se que Giannini e colaboradores (2015) estimaram o valor dos serviços de polinização para cada cultura brasileira, com base na taxa de dependência de polinizadores e no valor da produção agrícola anual no Brasil, e a Soja responde por metade da contribuição econômica dos polinizadores, ainda que tenha dependência modesta destes em um primeiro momento, visto que faz-se necessário avaliar a variação desta dependência do polinizador entre as diferentes variedades cultivadas no Brasil.

4.2.7 Silvicultura

A classe Silvicultura não possui as mesmas características da Formação florestal, visto que não possui características similares às espécies nativas, por isso também oferece valores de SE diferenciados. A Silvicultura fornece SE de Regulação do clima, Tratamento de resíduos, Produção de alimento, Recreação, Matéria prima, Formação do solo, Controle biológico e Cultural, conforme apresentado na Figura 26 a seguir. Comparativamente, a classe Formação Florestal foi valorada em US\$ 5.683,00 por hectare, ao passo que a Silvicultura tem valor de US\$ 855,00/ha.

A cadeia produtiva de florestas plantadas foi introduzida no Brasil a partir do início do século XX, tem se expandido cada vez mais nos últimos anos e é caracterizada pela diversidade de produtos e serviços. Essa cadeia abrange uma série de atividades, desde a produção e colheita até a transformação da madeira em produtos finais. Essa expansão impulsionou a demanda por matérias-primas florestais e, conseqüentemente, trouxe de volta as preocupações com a sustentabilidade ambiental, que haviam sido temporariamente eclipsadas pela introdução de espécies florestais de rápido crescimento (MATEUS; PADILHA, 2017).

Essa dicotomia entre os interesses econômico produtivos e os impactos que a silvicultura exerce sobre os sistemas humanos e ecológicos, incluindo as alterações no uso e cobertura da terra, a conservação dos ecossistemas e sobre comunidades locais tem sido considerada ao longo dos anos no Rio Grande do Sul. Sobre essa produção no estado,

Desde o início dessas discussões, estabeleceram-se duas frentes conflitantes de interesse sobre esse território. Por um lado, estava o setor industrial privado, incentivado diretamente pelo Governo do estado, que buscava o apoio dos pequenos, médios e grandes produtores agrícolas da região para iniciar a expansão das áreas de floresta plantada na metade sul do estado. Este grupo defendia a expansão com base no desenvolvimento

socioeconômico que a atividade florestal iria gerar para a região, considerando o fato de que o setor promove o aumento do emprego (direto e indireto) e da renda local, investe em programas de inclusão social, saúde, educação, cultura e conservação da natureza (previsto na lei) e proporciona alternativas de renda, além da produção agrícola tradicional, melhorando a qualidade de vida rural. No extremo oposto desta contenda, uniram-se as entidades pró-ambientalistas e movimentos sociais, criticando e reprimindo constantemente a expansão da atividade silvícola em larga escala e a instalação de espécies exóticas. Esta façção mostrava-se apreensiva com os potenciais impactos negativos que essa expansão poderia originar sobre os ecossistemas naturais de uma região onde se localizam dois dos biomas mais ameaçados do Brasil (Mata Atlântica e Pampa), nomeadamente em termos de diminuição da biodiversidade, deterioração da fertilidade e permeabilidade dos solos ou a falta de capacidade hídrica regional para suportar as diversas atividades, mas também sobre as comunidades locais, por exemplo, ameaçando o modo tradicional de subsistência e de relacionamento cultural das populações residentes na região (MATEUS; PADILHA, 2017, pp. 77 e 78).

A conversão de áreas nativas em campos cultivados, especialmente com o plantio de espécies do gênero *Pinus* e *Eucalyptus* no sul do Brasil, tem despertado interesse científico devido às possíveis alterações na dinâmica do carbono orgânico total e do nitrogênio total do solo. O aumento potencial de carbono no solo nessas plantações ocorre devido à constante adição de serapilheira e à reciclagem das raízes, o que regula os níveis de matéria orgânica (BARRETO *et al.*, 2008). No entanto, é importante notar que a biomassa provavelmente será removida ao final do ciclo de cultivo, que geralmente tem duração de seis a oito anos (WINK *et al.*, 2015). Entretanto, essas alterações podem resultar na degradação do solo devido às mudanças no fornecimento de matéria orgânica, como observado em monocultivos de eucalipto estabelecidos em pradarias no Uruguai (CÉSPEDES-PAYRET *et al.*, 2012).

Estudos abordam os impactos ambientais negativos associados à introdução de monoculturas de eucalipto. Durante a implantação dessas plantações, surgem problemas que vão desde a preparação da área para o plantio até as práticas adotadas ao longo do ciclo produtivo. Na fase inicial, a utilização de maquinário pesado causa a compactação do solo, comprometendo a infiltração da água destinada aos lençóis freáticos, uso de insumos agrícolas, desbaste de áreas e construção de estradas (BARBIERI *et al.*, 1997; MOLEDO *et al.*, 2016; EBLING *et al.*, 2021). Com a presença estabelecida da monocultura de eucalipto, surgem desafios relacionados ao elevado consumo de água e nutrientes, mudanças nas características do solo e redução da biodiversidade da fauna e flora (GUERINO *et al.*, 2022).

A remoção dos indivíduos de eucalipto também causa danos ao meio ambiente, pois após o primeiro corte completo, o solo fica exposto, resultando no aumento da temperatura e tornando-o mais suscetível aos impactos da água da chuva. Isso pode levar a processos de erosão acentuada (MOLEDO *et al.*, 2016).

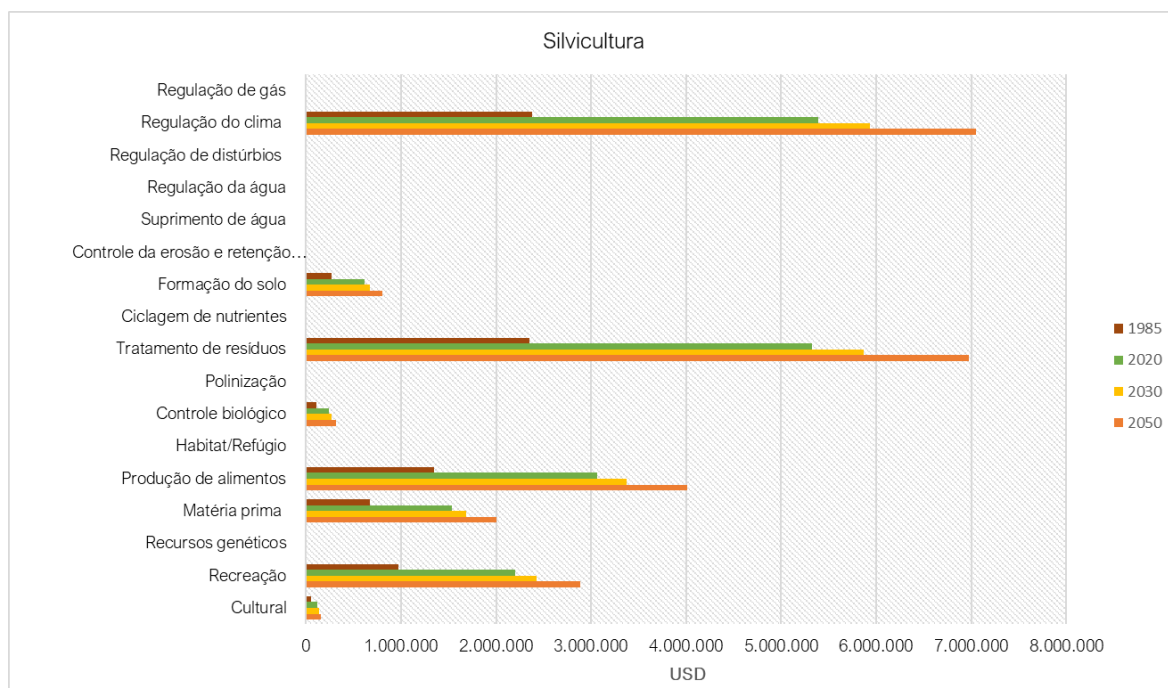
Por outro lado, silvicultura desempenha uma importante função para a conservação das florestas nativas, pois fornece celulose para a produção de papel, madeira para a produção de energia, móveis, chapas, construções de casas, e óleos essenciais usados de variadas formas na indústria farmacêutica e cosmética, entre outras, promovendo a manutenção das espécies nativas.

A exemplo do eucalipto, estes desempenham um papel benéfico ao contribuir para a recuperação de solos esgotados e absorver CO₂ da atmosfera, reduzindo assim a poluição e o aquecimento global. Além disso, a produção de eucalipto gera uma variedade de produtos para consumo interno e exportação, bem como receitas tributárias e oportunidades de emprego para a população local, o que impulsiona a economia (GUERINO *et al.*, 2022).

A classe total da Silvicultura respondeu por 0,40% do total da BHLG, alcançando US\$ 8.153.615,00 em 1985, e 0,86% em 2020, aumentando para US\$18.494.225,00, uma variação de 126,82% em 35 anos. O aumento previsto para os cenários tendenciais de 2030 e 2050 chega a US\$ 20.373.937,00 e US\$ 24.203.632,00, respectivamente.

O serviço de Regulação do clima atingiu o valor de US\$ 2.375.887,00 em 1985 e US\$ 5.389.046,00 em 2020 e para o cenário tendencial prevê-se que alcance US\$ 5.936.776,00 em 2030 e US\$ 7.052.714,00 em 2050.

Figura 26 - Distribuição dos SE (US\$/ha/ano) por classe de uso e cobertura da terra “Silvicultura” nos anos 1985 e 2020 e cenários tendenciais 2030 e 2050.



Fonte: Elaborado pela autora.

Esse serviço pode ser percebido através da regulação do microclima e do clima regional e pelo sequestro e armazenamento de C no solo e na vegetação (PARRON *et al.*, 2021).

Tomando-se como exemplo o cultivo de eucalipto, que são plantas de ciclo de vida longo, tanto em monocultura como em sistema mistos ou integrados, eles apresentam grande capacidade para remoção do CO₂ atmosférico em função de sua maior biomassa e maior capacidade de captura e utilização de recursos de crescimento (luz, nutrientes e água), comparados aos sistemas de culturas anuais ou pastagens, durante o seu crescimento (CARVALHO *et al.*, 2010).

O potencial de captura de C em eucaliptais se dá tanto pela imobilização deste elemento na biomassa florestal (especialmente na madeira), como na imobilização no solo (nas raízes e na matéria orgânica) (FEREZ *et al.*, 2015). Além disto, quando comparado a combustíveis fósseis, o uso de biomassa de eucalipto para fins energéticos pode levar a um abatimento da ordem de 80-90% na emissão de gases de efeito estufa (GABRIELLE *et al.*, 2013).

Quanto à temperatura, os ecossistemas florestais são importantes na regulação macroclimática, devido à absorção do gás carbônico, um dos gases de

efeito estufa, mas são importantes também considerando o microclima (CARBONIERI *et al.*, 2015; VIEIRA JÚNIOR *et al.*, 2019).

Ventos suaves podem ajudar a uniformizar a temperatura do ar e a umidade relativa, diminuindo o gradiente de temperatura entre a superfície do solo e as zonas de maior altitude, o que muitas vezes evita que ocorra uma geada e a distribuir a umidade do ar das zonas mais úmidas para as zonas mais secas. Os quebra-ventos formados pelos plantios de espécies arbóreas podem reduzir a velocidade dos ventos e, assim, reduzir o acamamento de plantas (DURIGAN, 1986).

Em relação ao segundo serviço de maior valoração na classe Silvicultura, apresenta-se o Tratamento de resíduos, que alcançou o valor de US\$ 2.348.889,00 em 1985 e US\$ 5.327.806,00 em 2020 e para o cenário tendencial prevê-se que alcance US\$ 5.869.313,00 em 2030 e US\$ 6.972.570,00 em 2050. Novamente citando-se o caso do eucalipto, grandes quantidades de resíduos florestais permanecem no campo após a colheita, minimizando assim o problema da exportação de nutrientes do solo e da erosão (PARRON *et al.*, 2021). Esse material é constituído em sua maior parte pela casca, ramos e folhas das copas das árvores e árvores finas, inteiras e toras (FOELKEL, 2007).

Além dos serviços observados para a classe Silvicultura proposto na metodologia de Constanza e colaboradores (1997), outros foram identificados por Parron e colaboradores (2021) especificamente para o eucalipto, como Recursos genéticos, Provisão de água, Fornecimento de bioquímicos, medicina natural e farmacêuticos, Ciclagem de nutrientes e Polinização.

Estudos específicos para avaliar a prestação de SE em cada cultivo específico são fundamentais para tomada de decisão por parte dos condutores de mudança. Escolher um cultivo que ofereça melhor desempenho em termos de serviços ecossistêmicos e que traga menor prejuízo aos ecossistemas é basilar para melhoria do meio ambiente como um todo.

4.3 CAPACIDADE DE FORNECIMENTO DE SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS

A avaliação apresentada neste item mostra a distribuição em relação à capacidade de fornecimento de diversos SE para os usos e cobertura da terra identificados na BHLG, considerando, além dos serviços de regulação, provisão e culturais, a integridade ecológica para cada classe mapeada, segundo a metodologia proposta por Burkhard e colaboradores (2009).

Observando-se os resultados da Tabela 6 a seguir foi possível identificar que a classe Formação Florestal se destacou pela “capacidade relevante muito alta” de fornecimento de SE, atingindo maior pontuação no somatório de cada grupo.

A Formação Campestre apareceu na sequência, com “muito alta capacidade relevante” para fornecimento de biodiversidade, redução da perda de nutrientes, capacidade de armazenamento, regulação da erosão, regulação de nutrientes e purificação da água.

Os tipos de cobertura da terra altamente modificados pelo homem, como área urbanizada, têm capacidade muito baixa ou nenhuma capacidade relevante para fornecer serviços ecossistêmicos, a exemplo do que acontece também com áreas industriais ou comerciais, extração mineral e lixões (BURKHARD *et al.*, 2009). A área urbanizada apresentou uma única contribuição no SE de provisão na categoria Energia, com “baixa capacidade relevante”.

A classe Afloramento Rochoso apareceu com “média capacidade relevante” para as categorias Heterogeneidade abiótica e biodiversidade, dentro da integridade ecológica, e “baixa capacidade relevante” para proteção contra inundações, recarga de águas subterrâneas e purificação da água.

Em termos de integridade ecológica na BHLG, a captura de energia, a capacidade de armazenamento e a biodiversidade foram os tipos mais representativos, e os SE regulação do clima local, proteção contra inundações e regulação de nutrientes sobressaíram dentre os serviços de regulação. Entre os serviços de provisão, destacaram-se forragem, plantações e pecuária. Os serviços culturais recreação e valores estéticos e valor intrínseco da biodiversidade apresentaram desempenho significativo na área de estudo.

Tabela 6 - Matriz de avaliação relacionado as classes de uso e cobertura da terra com a capacidade de fornecimento de serviços ecossistêmicos.

Classes Mabiomas	Integridade Ecológica Σ	Integridade Ecológica						Serviços de Regulação Σ	Serviços de Regulação								Serviços de Provisão Σ	Serviços de Provisão															
		Heterogeneidade abiótica	Biodiversidade	Fluxos bióticos de água	Eficiência metabólica	Captura de energia	Redução da perda de nutrientes		Capacidade de armazenamento	Regulação do clima local	Regulação do clima global	Proteção contra inundações	Recarga de águas subterrâneas	Regulação da qualidade do ar	Regulação da erosão	Regulação de nutrientes		Purificação da água	Polinização	Plantações	Pecuária	Forragem	Pesca	Aquicultura	Alimentos silvestres	Madeira	Combustível de madeira	Energia	Bioquímicos e medicamentos	Água fresca	Serviços Culturais Σ	Recreação e valores estéticos	Valor intrínseco da biodiversidade
Formação Florestal	32	3	5	5	4	5	5	5	39	5	4	3	2	5	5	5	5	5	22	0	0	1	0	0	5	5	5	1	5	0	10	5	5
Formação Campestre	30	3	5	4	4	4	5	5	22	2	3	1	1	0	5	5	5	0	5	0	3	0	0	0	2	0	0	0	0	0	6	3	3
Silvicultura	27	4	4	4	3	4	4	4	13	2	1	1	1	1	2	1	1	3	16	3	3	2	0	0	3	3	2	0	0	3	3	0	
Campo Alagado e Área Pantanosa	25	3	2	4	4	4	3	5	14	2	2	4	2	0	0	4	0	0	7	0	2	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rios e lagos	23	4	4	0	4	4	3	4	7	2	1	1	2	0	0	1	0	0	12	0	0	0	3	0	4	0	0	0	0	5	9	5	4
Arroz	20	3	2	5	1	5	1	3	4	2	0	0	2	0	0	0	0	0	7	5	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
Mosaico de Agricultura e Pastagem	20	4	3	3	2	4	1	3	5	2	1	1	1	0	0	0	0	0	10	4	0	3	0	0	0	0	1	2	0	2	2	0	
Outras Lavouras Temporárias	18	2	2	3	2	4	2	3	7	2	1	1	1	1	1	0	0	0	17	5	5	5	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	
Soja	18	2	2	3	2	4	2	3	7	2	1	1	1	1	1	0	0	0	17	5	5	5	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	
Praia, Duna e Areal	10	3	3	1	1	1	0	1	6	0	0	5	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	7	5	2	
Outras Áreas não Vegetadas	7	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
Afloramento Rochoso	6	3	3	0	0	0	0	0	3	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	0	
Área urbanizada	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
Total por categoria	236	35	36	33	28	40	27	37	127	21	14	19	15	8	14	16	12	8	119	23	18	24	3	0	12	8	8	9	9	5	44	30	14

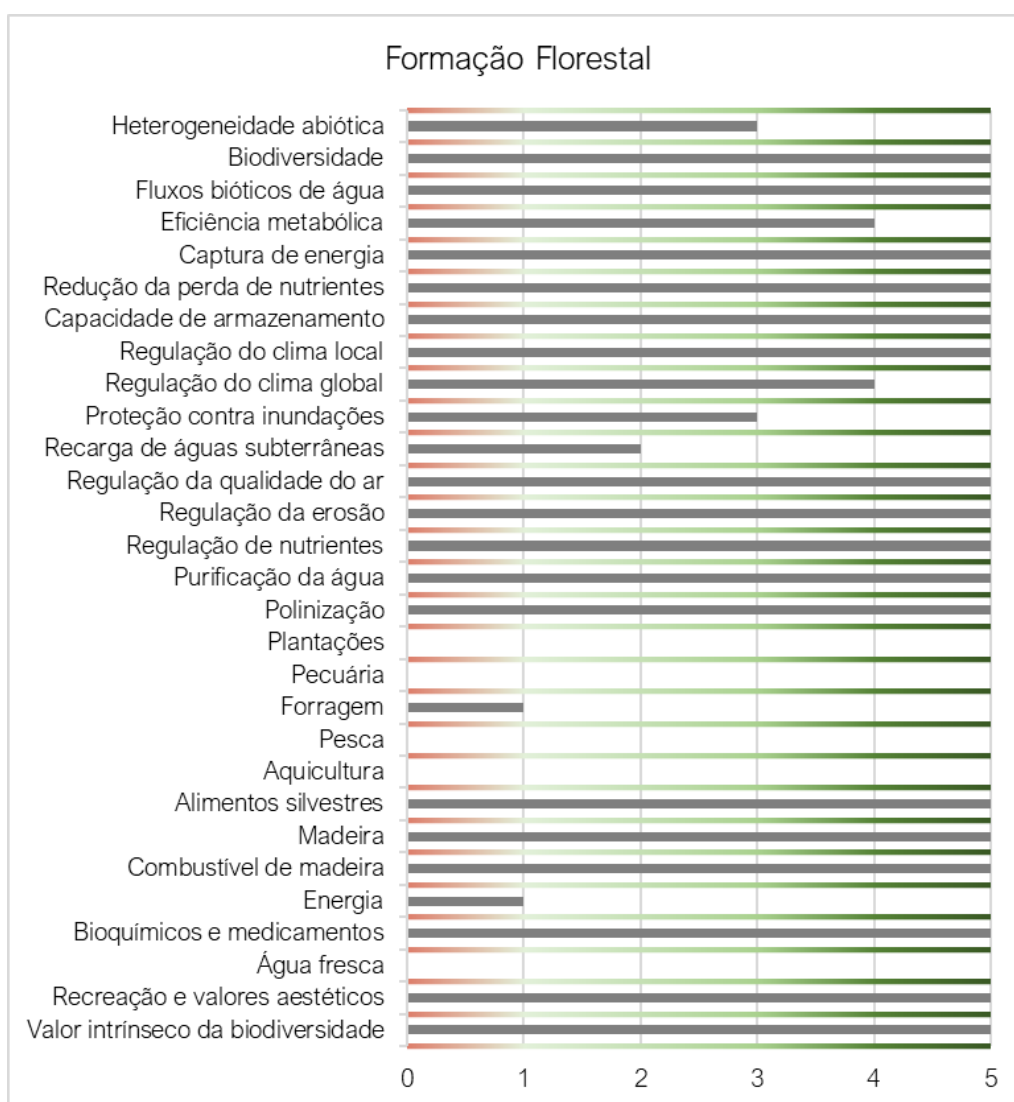
Legenda:

0= sem capacidade relevante	1= baixa capacidade relevante	2= capacidade relevante	3= média capacidade relevante	4= alta capacidade relevante	muito alta capacidade relevante
-----------------------------	-------------------------------	-------------------------	-------------------------------	------------------------------	---------------------------------

Fonte: Elaborado pela autora. Adaptado de Burkhard et al. (2009).

A Formação Florestal (Figura 27) apresentou “muito alta capacidade relevante” para biodiversidade, fluxos bióticos de água, captura de energia, redução da perda de nutrientes e capacidade de armazenamento, dentro do grupo da integridade ecológica; regulação do clima local, regulação da qualidade do ar, regulação da erosão, regulação de nutrientes, purificação da água, polinização, alimentos silvestres, madeira, combustível de madeira, bioquímicos e medicamentos, recreação e valores aestéticos e valor intrínseco da biodiversidade, dentre os demais serviços. Essa classe de uso e cobertura da terra foi a que trouxe maior capacidade de fornecimento de serviços dentre as demais analisadas.

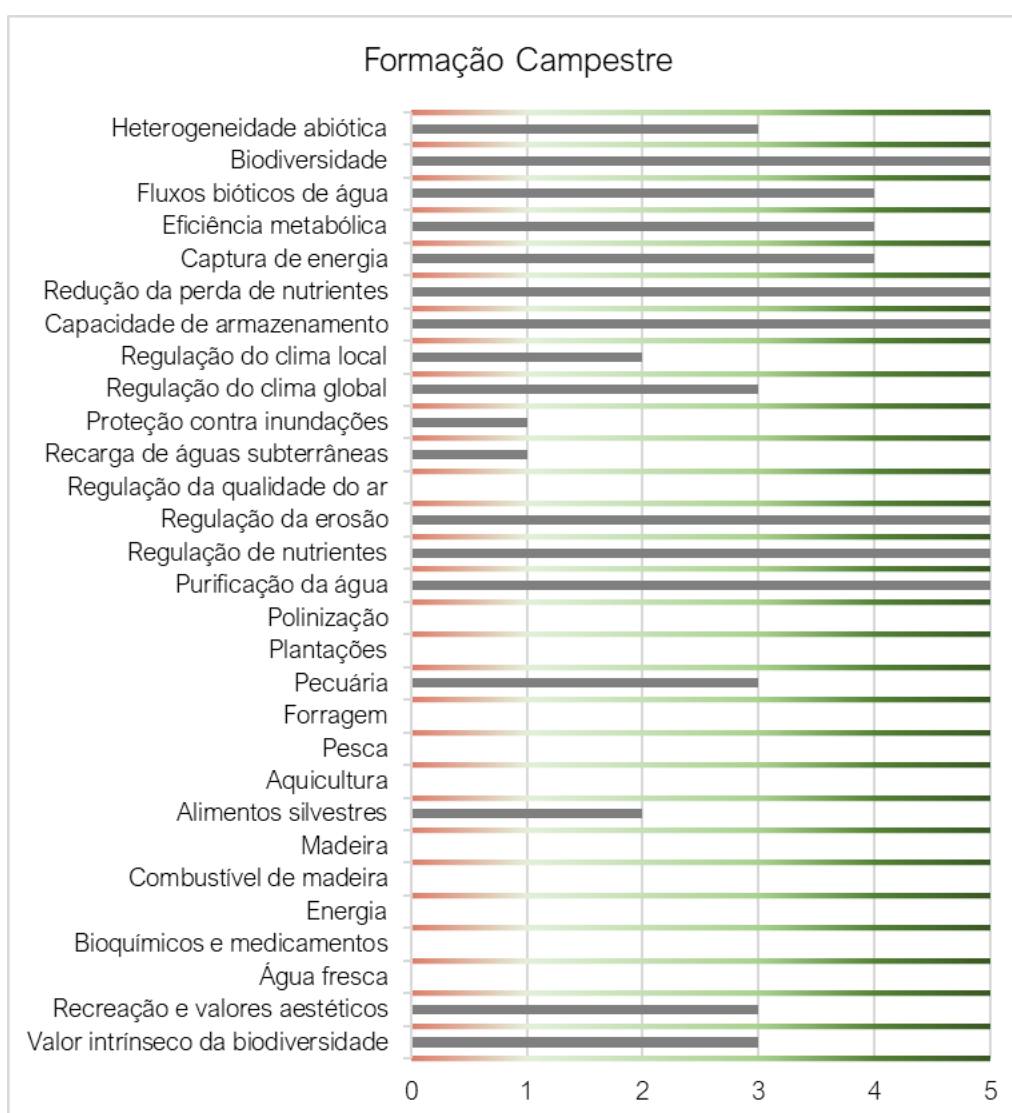
Figura 27 - Distribuição da Integridade Ecológica e dos SE pela classe de uso e cobertura da terra “Formação Florestal”.



Fonte: elaborado pela autora.

A classe Formação Campestre (Figura 28) apresentou “muito alta capacidade relevante” para biodiversidade, redução da perda de nutrientes e capacidade de armazenamento, e média e alta capacidade no grupo da integridade ecológica. Também desempenhou importante papel na regulação da erosão, regulação de nutrientes e purificação da água (alta capacidade), mas sem capacidade relevante para regulação da qualidade do ar e polinização. Destacou-se também a “média capacidade relevante” para serviços culturais Recreação e valores aestéticos e Valor intrínseco da biodiversidade.

Figura 28 - Distribuição da Integridade Ecológica e dos SE pela classe de uso e cobertura da terra “Formação Campestre”.



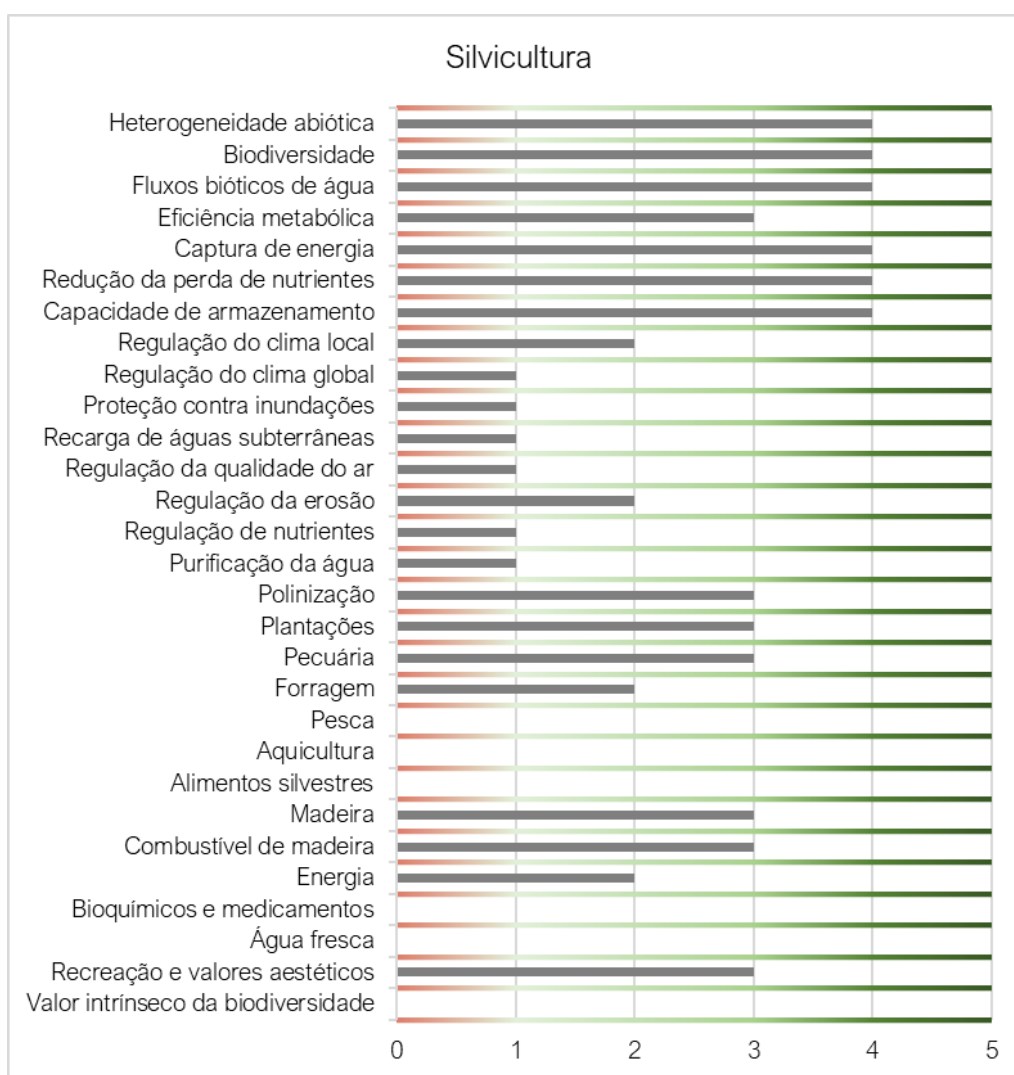
Fonte: elaborado pela autora.

A Silvicultura (Figura 29) foi relacionada à categoria “Áreas agroflorestais”, e foi considerada com “alta capacidade relevante” para quase todas as categorias da integridade ecológica, mas “baixa capacidade relevante” para a maior parte dos

serviços de regulação. Observou-se “média capacidade” para o serviço de polinização, mas como foi discutido por Parron *et al.* (2021) em relação ao eucalipto, a produção de mel contribui para a preservação de polinizadores, manutenção e até mesmo expansão do serviço de polinização (serviço de regulação), pois contribui para a presença dos polinizadores, especialmente abelhas, e produção de mel (serviço de provisão). Diante dessa observação, recomenda-se cautela e busca por maior detalhamento na avaliação sobre a capacidade de fornecimento desse tipo de SE.

A Silvicultura mostrou ainda “média capacidade relevante” para outros serviços de provisão, como plantações, madeira, combustível de madeira. Essa análise certamente necessitaria de maior complementação, visto que o fornecimento do serviço de provisão de madeira deveria alcançar “muito alta capacidade relevante”.

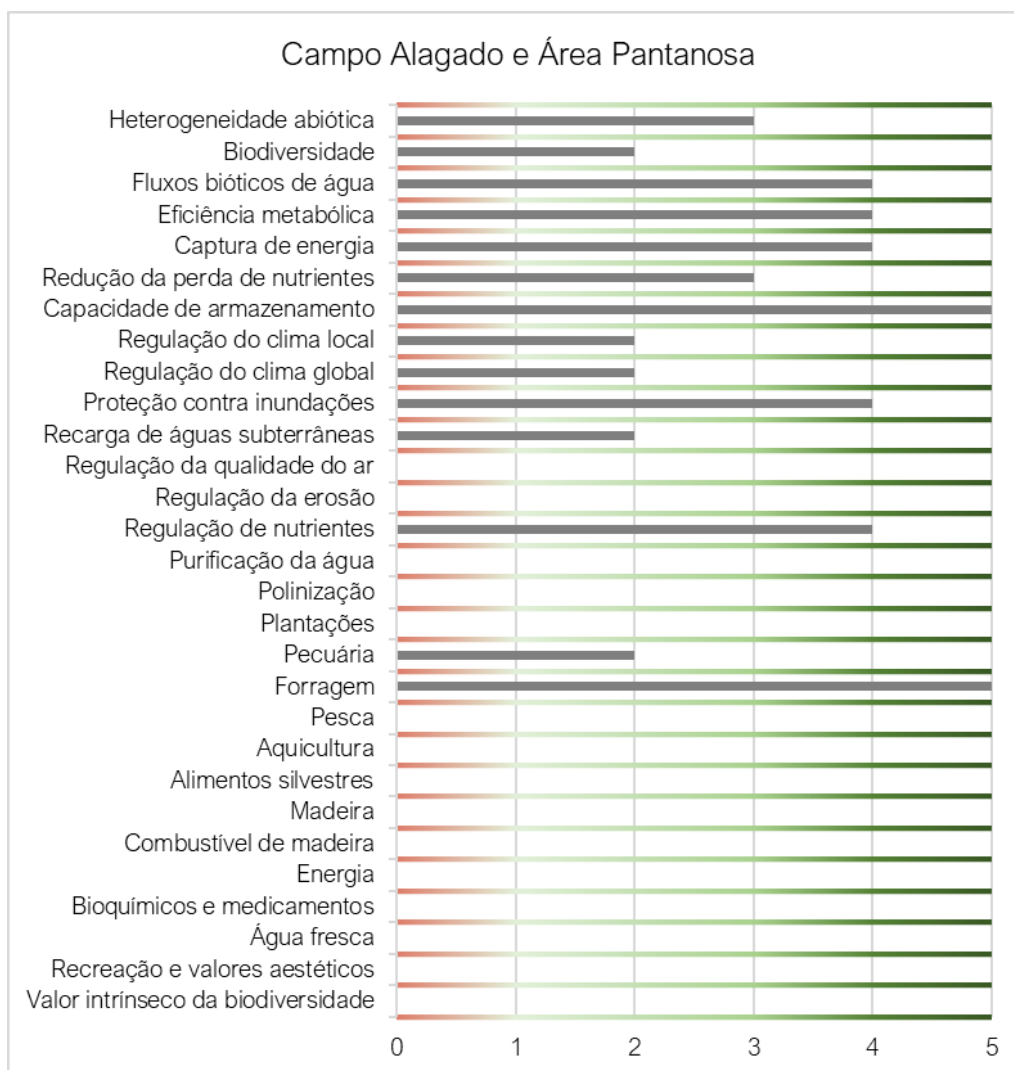
Figura 29 - Distribuição da Integridade Ecológica e dos SE pela classe de uso e cobertura da terra “Silvicultura”.



Fonte: elaborado pela autora.

A classe Campo alagado e área pantanosa (Figura 30) apresentou capacidade relevante “muito alta” para categoria “capacidade de armazenamento” dentro da integridade ecológica, e destacou-se com “alta capacidade relevante” para os SE de proteção contra inundações e regulação de nutrientes, e “muito alta capacidade relevante” como serviço de provisão de forragem.

Figura 30 - Distribuição da Integridade Ecológica e dos SE pela classe de uso e cobertura da terra “Campo Alagado e Área Pantanosa”.



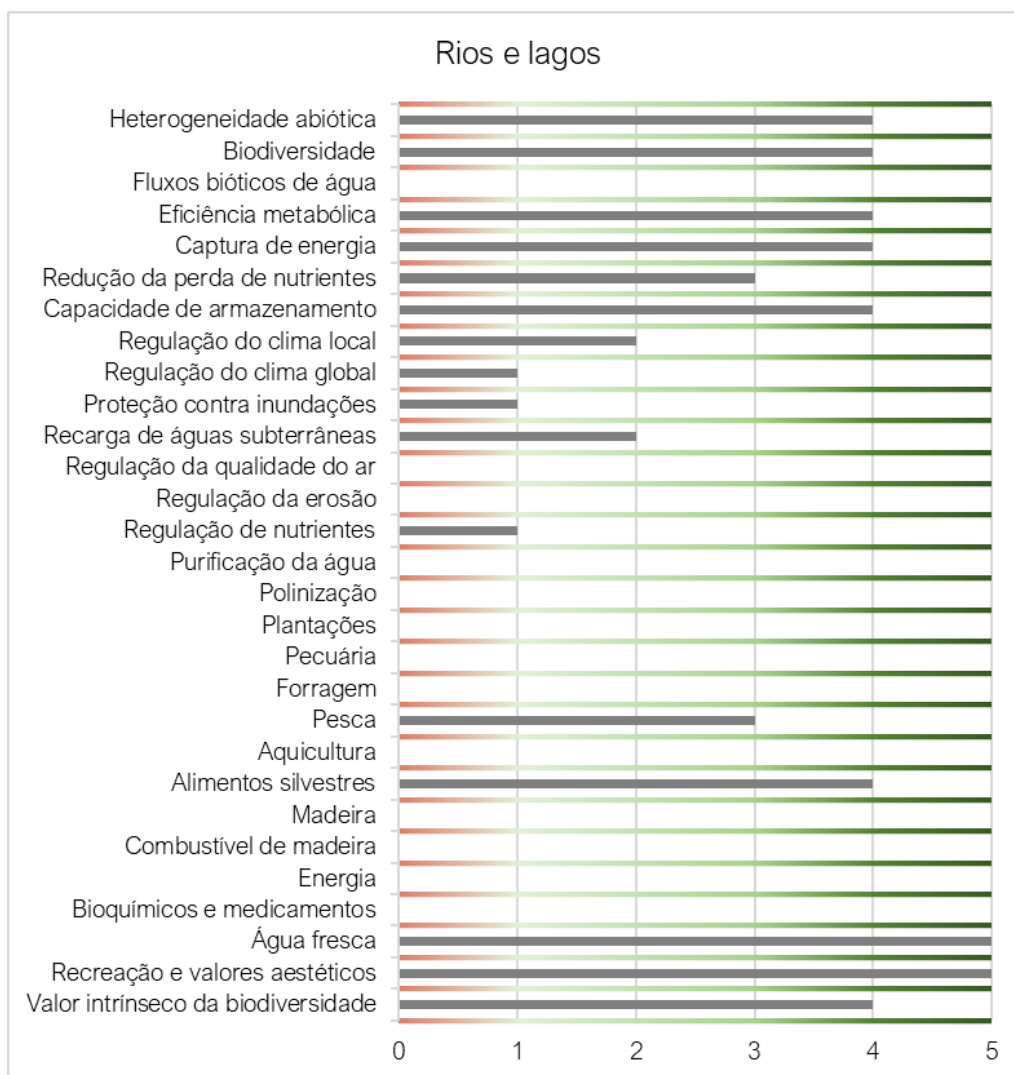
Fonte: elaborado pela autora.

A classe Rios e lagos está apresentada no gráfico da Figura 31, e mostrou “alta capacidade relevante” para heterogeneidade abiótica, biodiversidade, eficiência metabólica, captura de energia e capacidade de armazenamento, no âmbito da integridade ecológica.

Apresentou capacidade relevante “muito alta” para fornecimento dos SE água fresca e recreação e valores aestéticos, e “alta capacidade relevante” para Alimentos

silvestres e Valor intrínseco da biodiversidade. Observa-se novamente que existe uma lacuna em relação ao peso da metodologia de avaliação, visto que o serviço de provisão Aquicultura ficou “sem capacidade relevante”, assim como outros serviços de regulação que receberam a mesma categoria ou ficaram com “baixa capacidade relevante”.

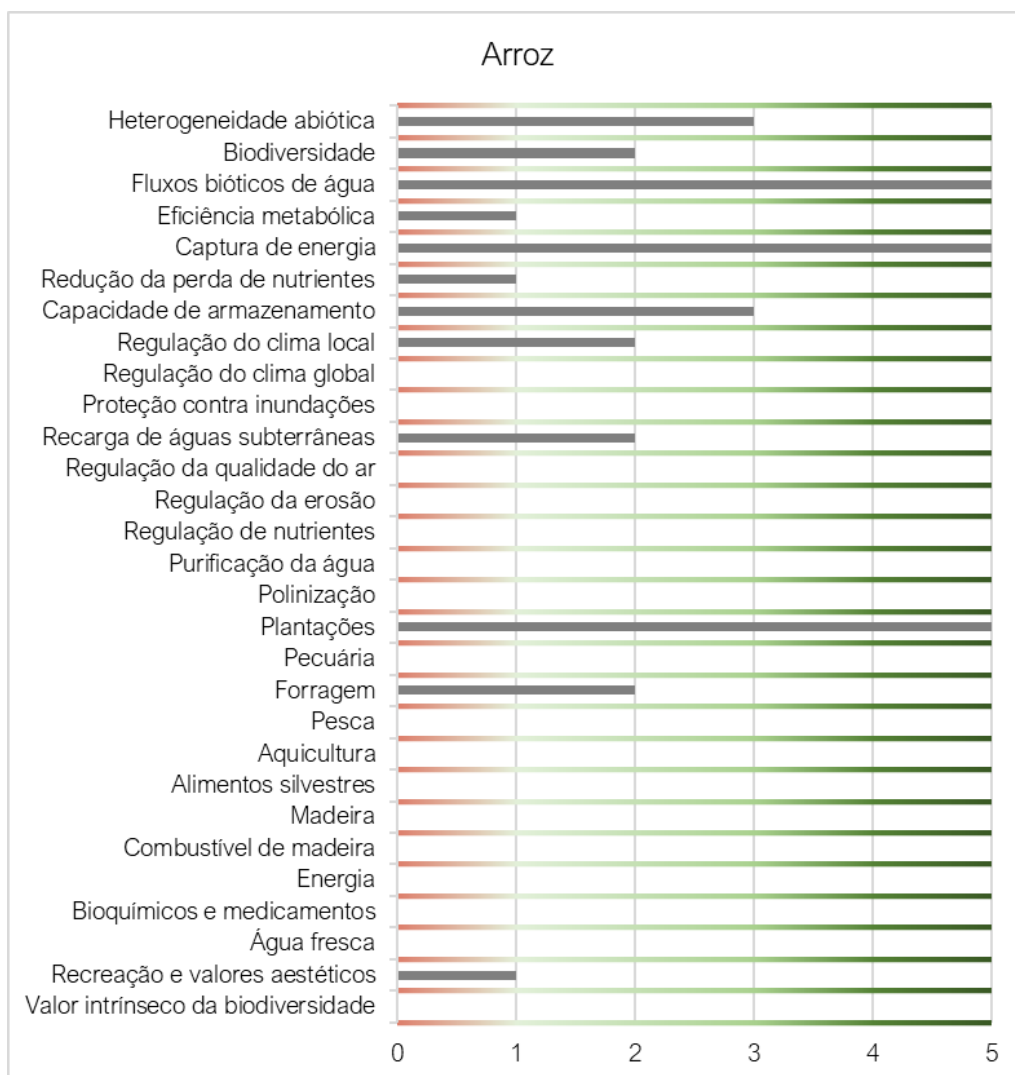
Figura 31 - Distribuição da Integridade Ecológica e dos SE pela classe de uso e cobertura da terra “Rios e Lagos”.



Fonte: elaborado pela autora.

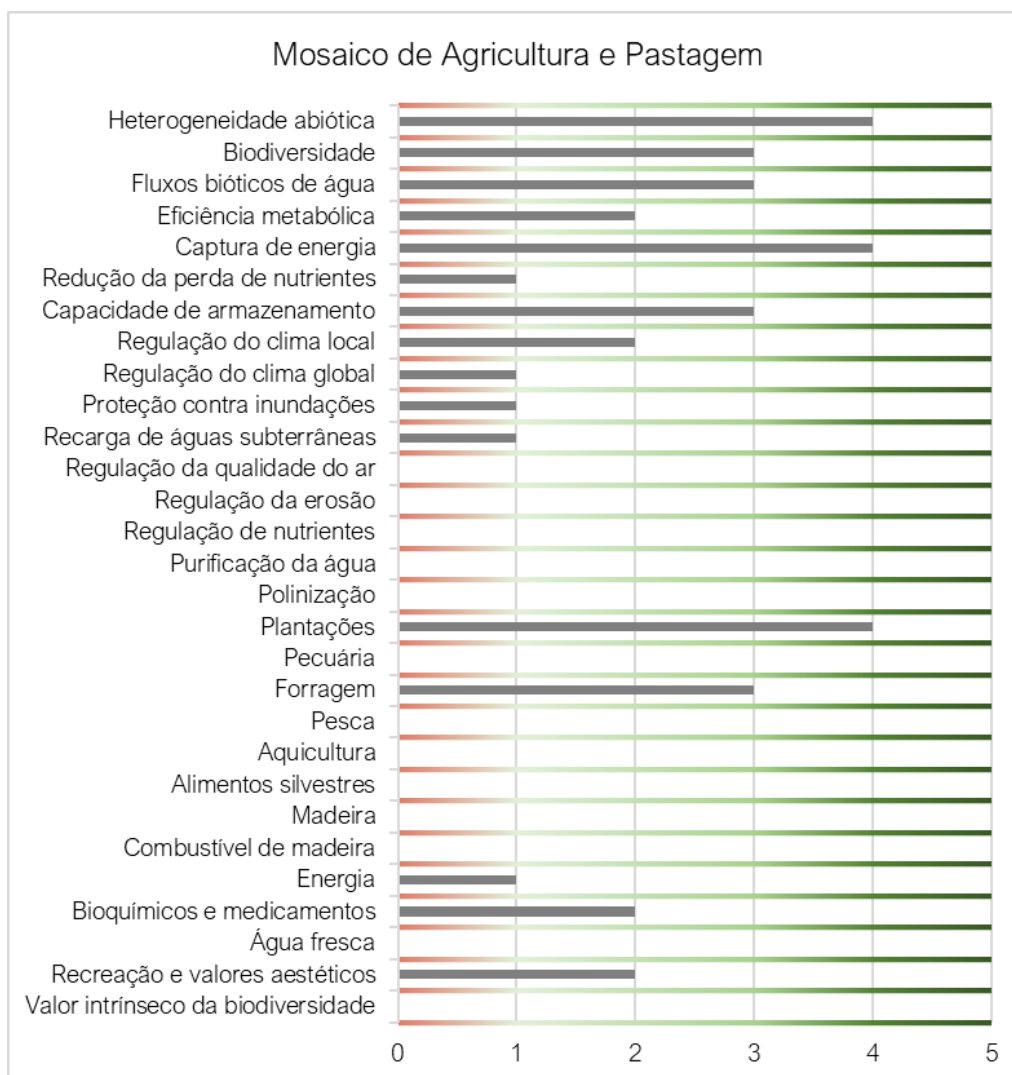
As classes de uso e cobertura da terra Arroz (Figura 32), Mosaico de Agricultura e Pastagem (Figura 33), Outras Lavouras Temporárias (Figura 34) e Soja (Figura 35), estão fortemente relacionadas com o serviço de provisão de alimentos Plantação. No caso do Arroz, apresentou capacidade relevante muito alta para fluxos bióticos de água e captura de energia, sendo que para essa última categoria os outros três classes apresentaram “alta capacidade relevante”.

Figura 32 - Distribuição da Integridade Ecológica e dos SE pela classe de uso e cobertura da terra “Arroz”.



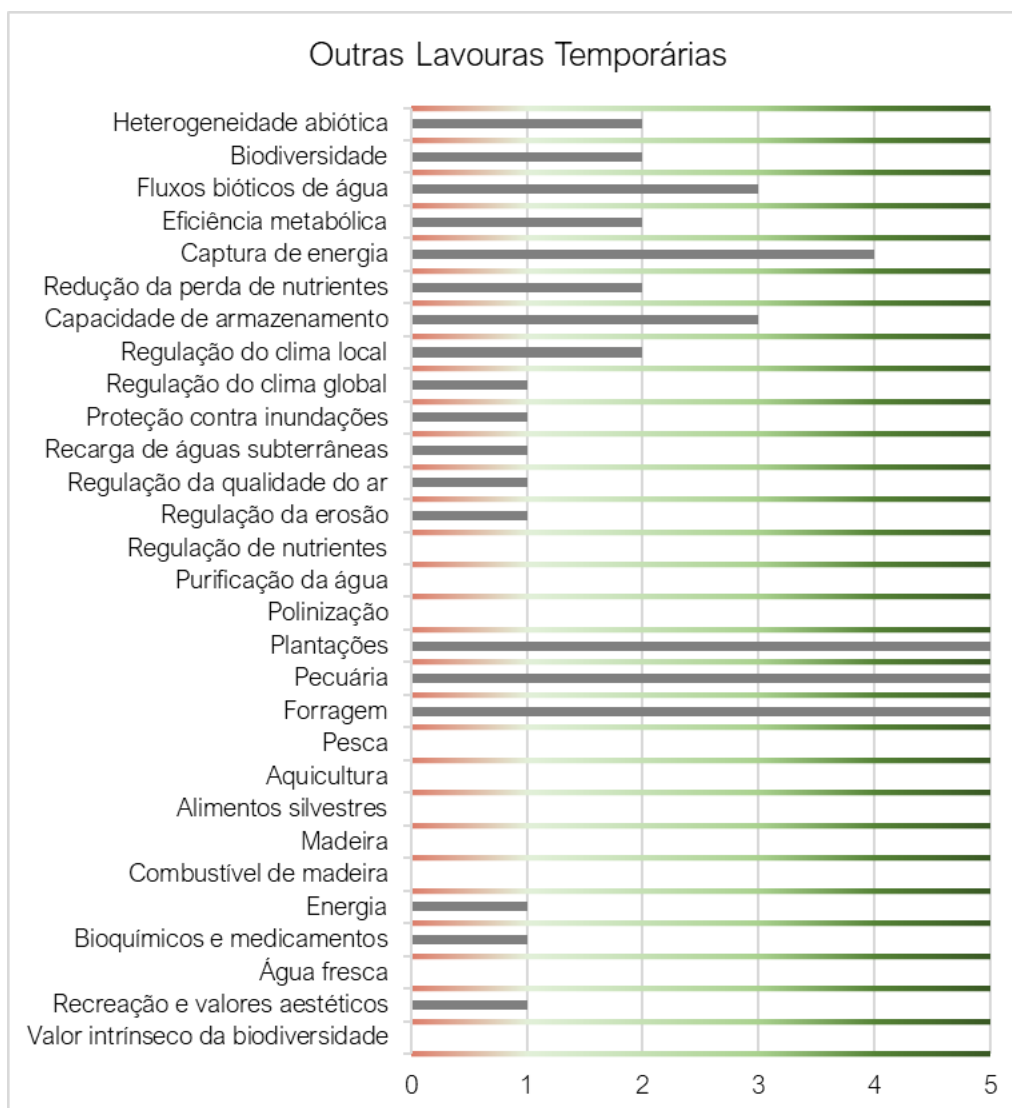
Fonte: elaborado pela autora.

Figura 33 - Distribuição da Integridade Ecológica e dos SE pela classe de uso e cobertura da terra “Mosaico Agricultura e Pastagem”.



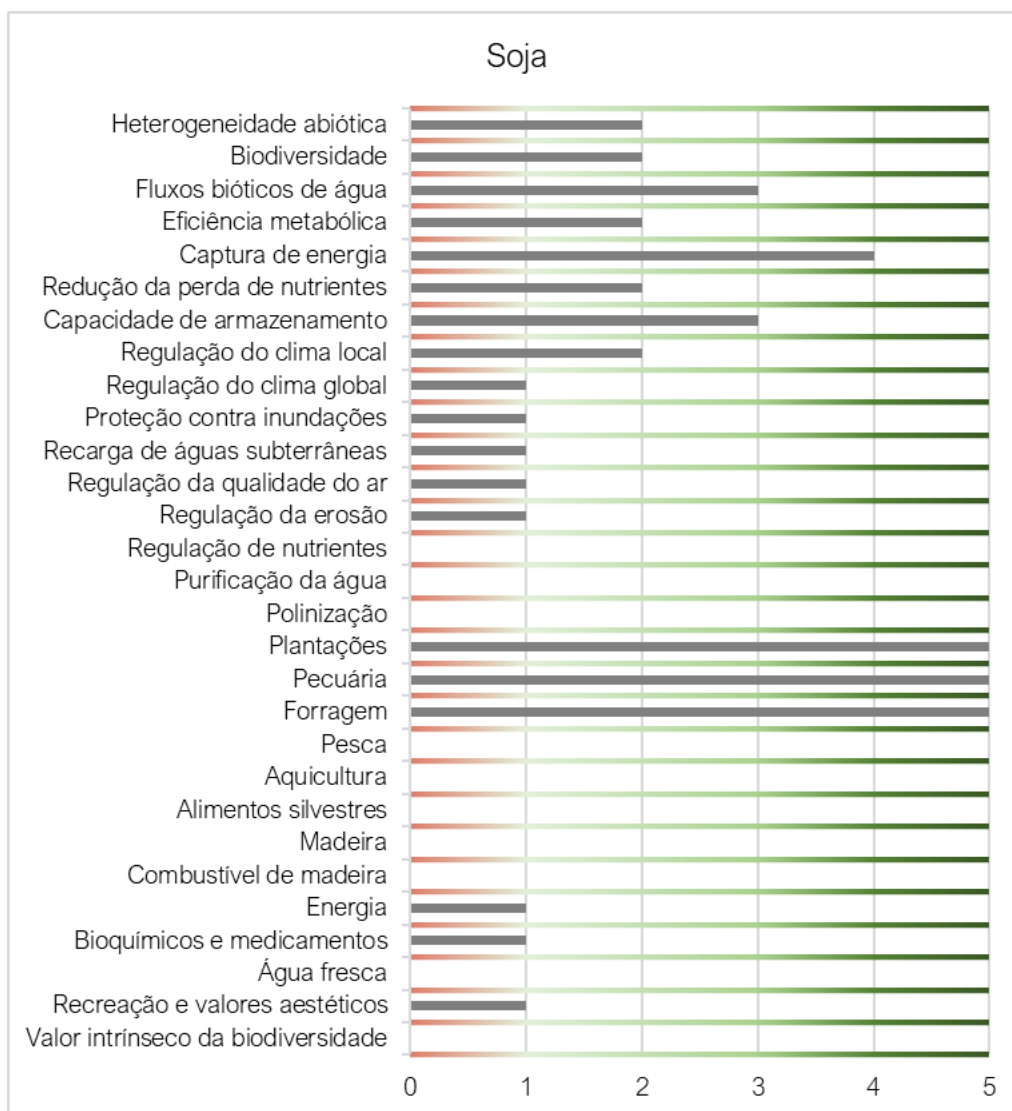
Fonte: elaborado pela autora.

Figura 34 - Distribuição da Integridade Ecológica e dos SE pela classe de uso e cobertura da terra “Outras Lavouras Temporárias”.



Fonte: elaborado pela autora.

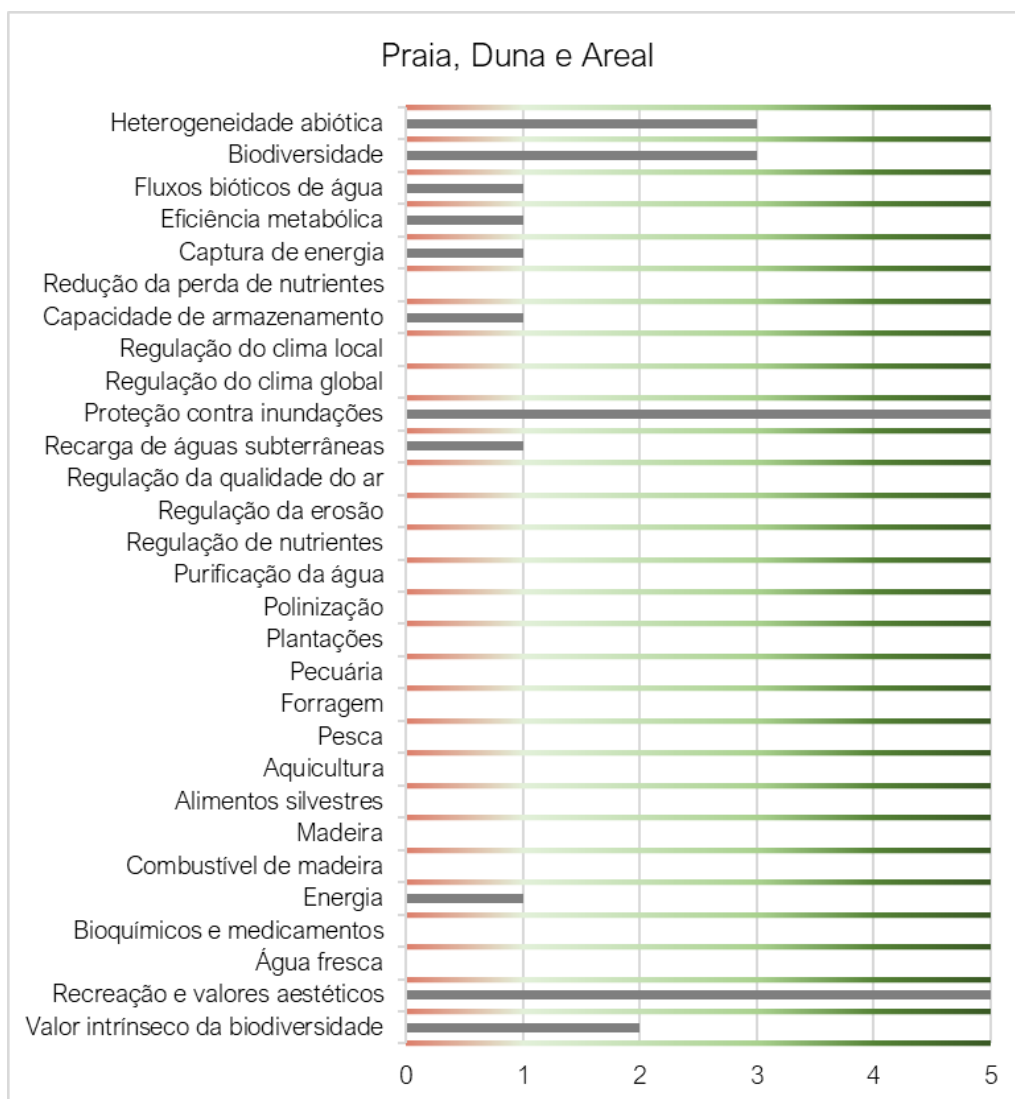
Figura 35 - Distribuição da Integridade Ecológica e dos SE pela classe de uso e cobertura da terra “Soja”.



Fonte: elaborado pela autora.

A classe Praia, Duna e Areal (Figura 36 e Figura 37) notabilizou-se pela capacidade relevante muito alta para o serviço de regulação de proteção contra inundações e serviço cultural recreação e valores estéticos, e pela média capacidade relevante nos tipos heterogeneidade abiótica e biodiversidade no grupo da integridade ecológica.

Figura 36 - Distribuição da Integridade Ecológica e dos SE pela classe de uso e cobertura da terra “Praia, Duna e Areal”.



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 37 - SE Proteção contra inundações, Recreação e valores aestéticos e valor intrínseco da biodiversidade, relacionados à cobertura da terra Praia, Duna e Areal (Barra do Ribeiro/RS).



Foto: Sumirê Hinata.

4.4 ANÁLISE COMPARATIVA: QUAL ABORDAGEM OFERECE MELHOR RESPOSTA AO MONITORAMENTO DOS SE NO TEMPO E ESPAÇO?

O serviço ecossistêmico é um conceito que se difundiu ao longo dos últimos anos e se destaca por identificar os benefícios que os seres humanos recebem da natureza, e desde que tal ideia surgiu houve uma profusão de métodos e ferramentas que procuram avaliar os serviços de maneira mais adequada. Mas na escala de tempo e espaço e em aplicações práticas, uma única ferramenta raramente é suficiente e os métodos podem ser combinados para atender às necessidades pretendidas na avaliação (DUNFORD *et al.*, 2018).

O presente estudo trouxe uma avaliação dos SE na BHLG através de uma metodologia que buscou atribuir valor monetário aos serviços e outra forma de avaliação através da classificação baseada na capacidade de fornecimento de SE (sem atribuição de valor monetário). Avaliar um mesmo tema através do entendimento em unidades monetárias (valoração) ou uma escala que vai de 'sem capacidade' até 'muito alta capacidade relevante' (qualitativa) mostra o desafio de mensurar a importância que os SE desempenham para o bem-estar humano.

Outros estudos testaram a capacidade de combinar uma ampla variedade de ferramentas de SE de diferentes maneiras, a fim de lidar com problemas complexos do mundo real que exigem abordagens interdisciplinares para abranger uma variedade de valores, serviços e partes interessadas. Mas isso não significa que toda ferramenta possa ser combinada com todas as outras ferramentas sem superar diferenças significativas na metodologia. Desafios práticos estão associados a uma combinação de métodos que diferem nos tipos de serviços abordados, tipos de valores capturados, nível de realidade local, unidades de medida e saída, unidades espaciais e escala da análise (DUNFORD *et al.*, 2018).

Através da comparação entre essas duas metodologias foi possível tecer importantes considerações a respeito da avaliação dos SE. Em primeiro lugar destaca-se como aspecto positivo a aplicabilidade de relacionar os tipos de uso e cobertura da terra apresentados pelo Projeto Mapbiomas com as terminologias utilizadas para definir os SE, tanto por Costanza e colaboradores (1997) quanto por Burkhard *et al.* (2009).

Essa similaridade entre os tipos de uso permitiu realizar um sistema de classificação, tanto para a valoração monetária quanto para a classificação de capacidade de fornecimento. Adverte-se que essa correspondência também exige cautela, visto que algumas classes específicas do Brasil no geral, e do bioma Pampa em particular, não tem necessariamente as mesmas características. Essas diferenças podem acarretar menor ou maior valoração para alguns serviços.

Ainda que os dois estudos tenham sido conduzidos por grupos de especialistas conceituados e provenientes de equipes interdisciplinares, que elaboraram em conjunto as duas metodologias, e que consideraram outros diversos estudos consolidados para atribuição dos valores e da capacidade de fornecimento - incluindo estudos globais e regionais na Amazônia, Brasil, Costa Rica, Indonésia, Malásia, México, Filipinas, Ecuador, Índia, Madagascar, Escócia, Estados Unidos, Suécia, Áustria, Escócia e África, dentre outros (COSTANZA *et al.*, 1997) - é improvável que os valores reflitam com precisão a realidade em uma escala local ou mesmo regional.

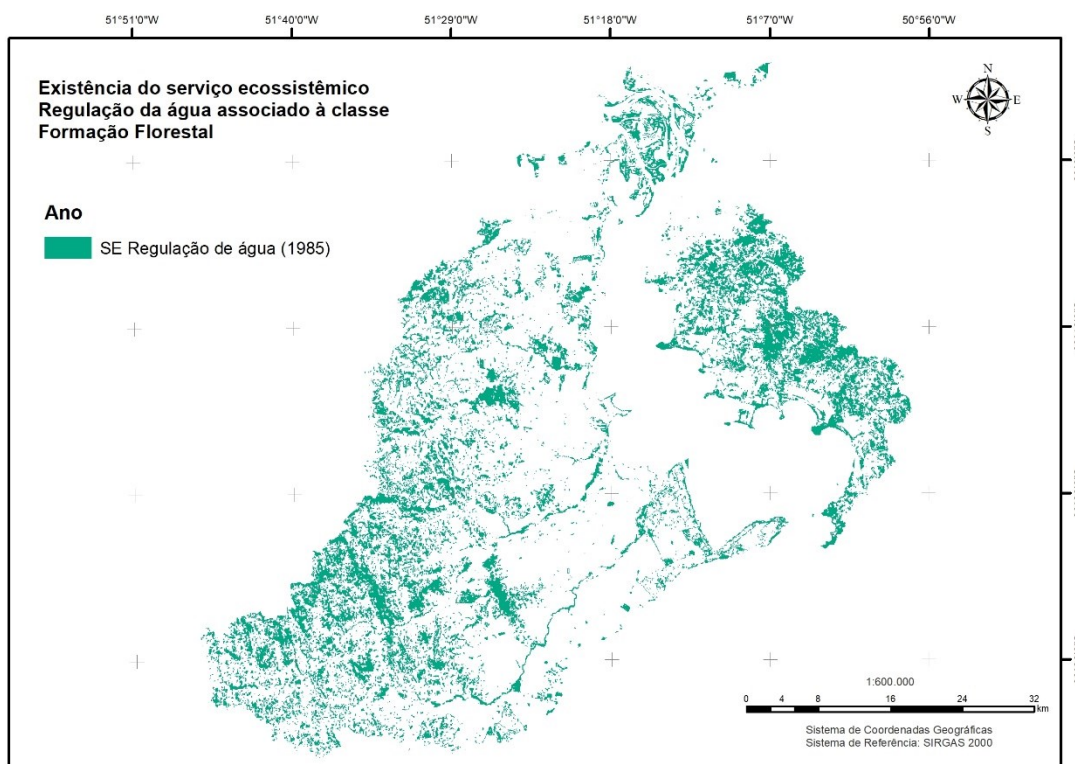
Atentando-se para a perspectiva do uso e cobertura da terra, esse estudo mostrou que a análise através da valoração tem uma resposta mais adequada para medir a variação no tempo e no espaço, visto que a metodologia prevê a variação

associada à expansão ou contração em área. Essa avaliação talvez pudesse ser feita de uma forma mais simplificada utilizando a escala de avaliação da capacidade de fornecimento, mas não traria o mesmo nível de detalhamento.

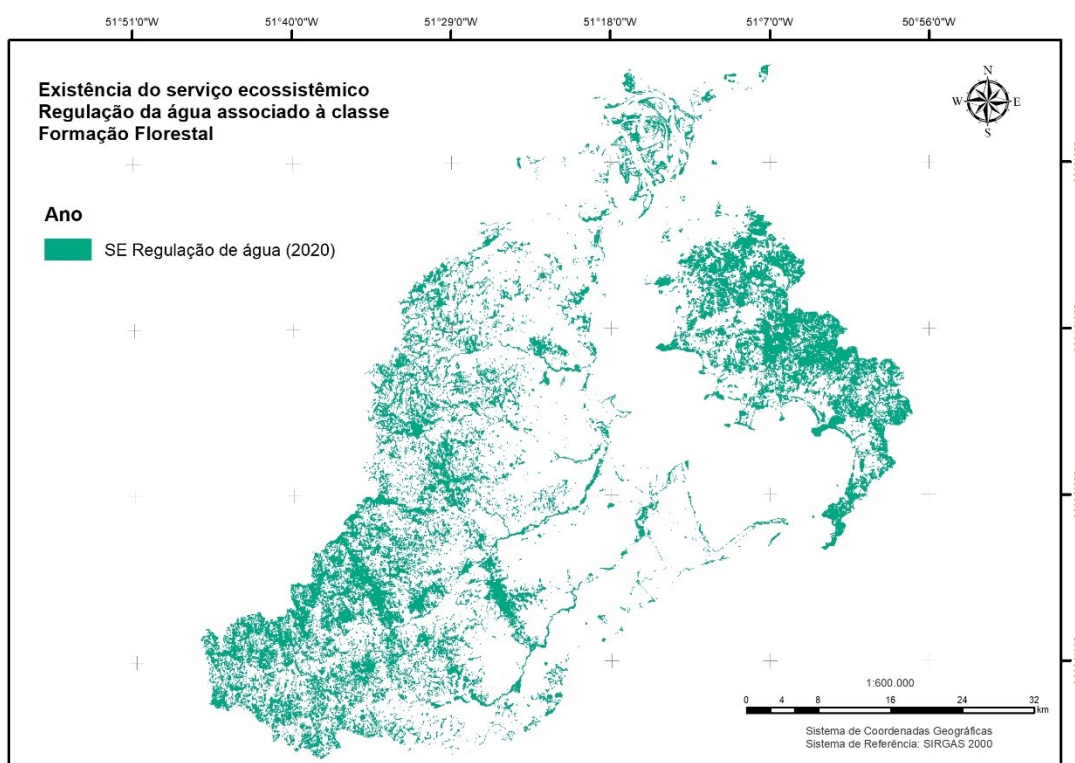
Outra conclusão basilar remete ao mapeamento dos SE: nas duas avaliações propostas, para mapear os serviços seria necessário mostrar cada um individualmente, pois cada classe de uso e cobertura da terra comporta diversos serviços. No exemplo da Figura 38 e Figura 39 a seguir, realizou-se uma simulação de como seria possível mapear o serviço Regulação de água (US\$ 17,00/ha) na avaliação através da valoração, ou como serviço de Purificação da água (muito alta capacidade relevante) na avaliação pela capacidade de fornecimento, previamente identificados dentro da classe de uso e cobertura da terra definida como Formação Florestal.

Se o objetivo da análise for espacializar o quanto a Formação Florestal contribui com o serviço Regulação da água em 1985 e 2020, parece perfeitamente aceitável que a classe de uso e cobertura da terra enfatize um único serviço, trazendo uma importância maior para a manutenção e recuperação dessas áreas em termos de legislação ambiental e promoção de políticas públicas, como forma de melhorar a situação de escassez hídrica na BHLG, por exemplo.

Ainda no âmbito da Formação Florestal, as duas avaliações mostraram o quanto essa classe oferece em termos de SE de suporte, provisão, regulação e culturais, ficando evidente tanto na avaliação com atribuição de valores quanto na avaliação pela capacidade de fornecimento. Em valores para o ano de 2020 alcançou US\$ 5.683,00/ha e US\$ 373.799.154,00 para toda a BHLG, considerando toda a área com essa classe.

Figura 38 - Espacialização do SE Regulação da água na BHLG (1985).

Fonte: elaborado pela autora.

Figura 39 - Espacialização do SE Regulação da água na BHLG (2020).

Fonte: elaborado pela autora.

Em termos de integridade ecológica, alcançou 32 pontos, e apresentou capacidade relevante ‘muito alta’ para as funções biodiversidade, fluxos bióticos de água, captura de energia, redução da perda de nutrientes e capacidade de armazenamento.

A Formação Florestal sabidamente tem papel fundamental e de destaque nos serviços de Regulação do clima e Controle da erosão e retenção sedimentar (Figura 40), fato que ficou perceptível tanto na avaliação através da valoração quanto na capacidade de fornecimento.

Figura 40 - SE Regulação e Suprimento de água, Controle da erosão e retenção sedimentar, Formação do solo e Ciclagem de nutrientes: exemplos de SE relacionado à classe Formação florestal (município de Guaíba/RS).



Foto: Sumirê Hinata.

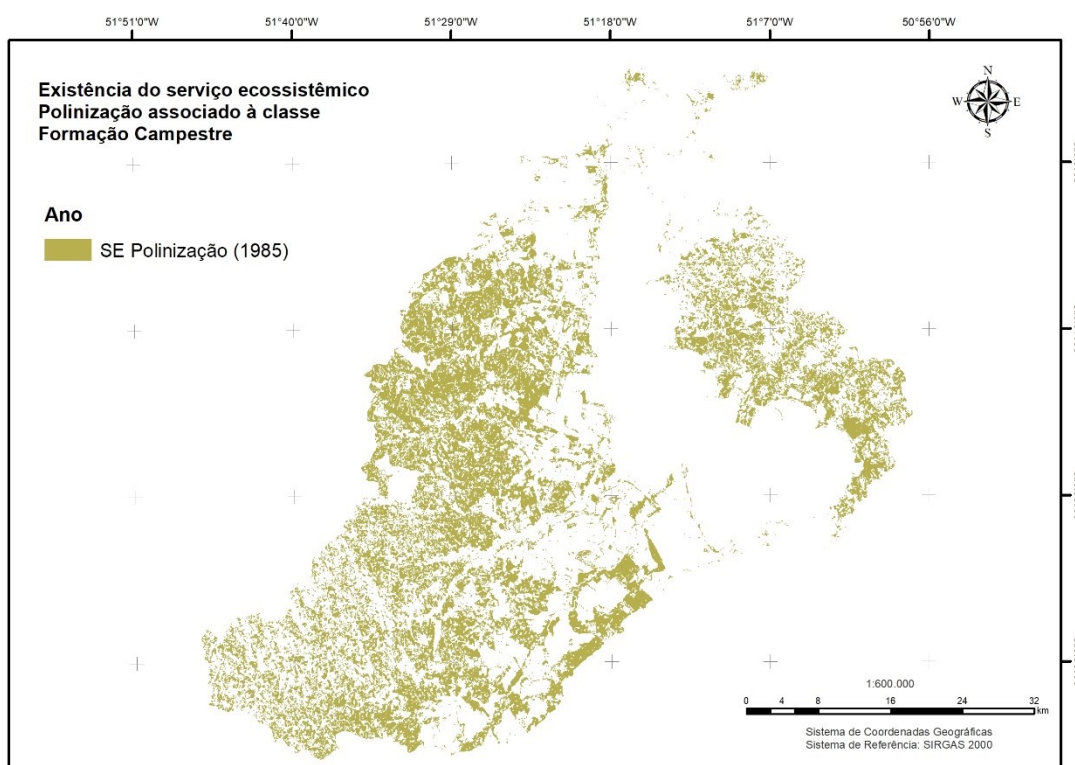
A avaliação proposta por Burkhard e colaboradores (2009) trouxe um peso maior para o SE de polinização, ‘capacidade relevante muito alta’, ao passo que Costanza *et al.* (1997) não atribuiu valor para esse serviço. De todo modo, essa classe destaca-se em ambas as análises, e mostrou crescimento em área no período de 1985 a 2020, com expectativa de expansão nos cenários tendenciais de 2030 e 2050, que pode ocorrer tanto pelo incentivo de políticas voltadas para a conservação ambiental e instrumentos legais que promovam a restauração dessas áreas de

florestas, quanto pela adoção de Sistemas Agroflorestais (SAFs) em um *trade-off* que favoreça esse tipo de cultivo em detrimento a outros usos que promovam degradação do meio ambiente.

Outra classe que merece ser destacada nas duas avaliações é a Formação Campestre, visto que teve a maior perda em área de 1985 a 2020 (-35,98%) e alcançou a segunda maior pontuação na avaliação pela capacidade de fornecimento. Ainda que não tenha os maiores valores em termos de fornecimento de SE, a Formação Campestre é a classe mais representativa do bioma Pampa, que tem valor ambiental, social e cultural fundamental para o RS.

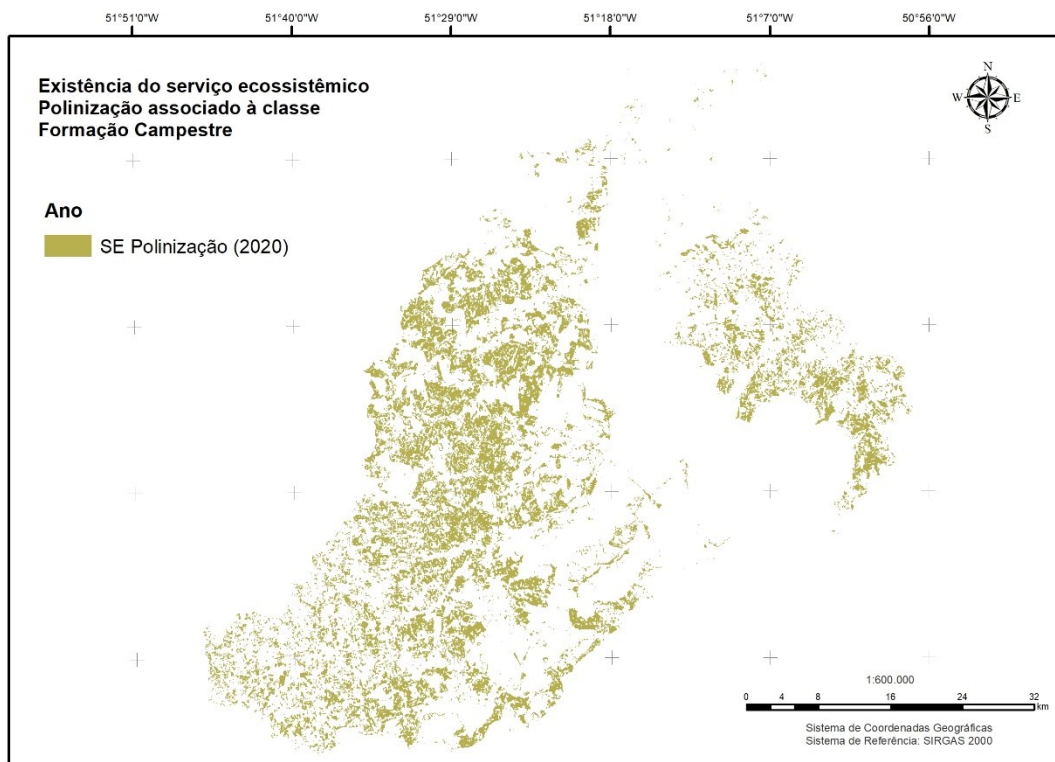
A perda em área da Formação Campestre poderia ser mostrada com maior impacto se fosse demonstrado que em 1985 essa classe de uso e cobertura da terra havia fornecido US\$ 6.007.552,00 em serviço de polinização na área mapeada (Figura 41) e em 2020 passou a fornecer US\$ 3.845.779,00 (Figura 42), uma perda de 35,98%.

Figura 41 - Espacialização do SE Polinização na BHLG (1985).



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 42 - Espacialização do SE Polinização na BHLG (2020).



Fonte: elaborado pela autora.

Uma importante vantagem da valoração tem sido permitir que os ecossistemas sejam explicitamente considerados em decisões que envolvem *trade-offs* (FARBER *et al.*, 2002). Os *trade-offs* envolvendo serviços ecossistêmicos implicam valoração implícita ou explícita (COSTANZA *et al.*, 1997).

A avaliação explícita permite que as unidades de todos os elementos sejam expressas no mesmo denominador comum para permitir a comparação direta dos *trade-offs*. Muitas vezes, isso é feito de maneira mais fácil e útil usando unidades monetárias, mas outras unidades, como tempo, energia ou área de terra, também são possíveis e uma abordagem que seja transversal a todos os SE tem melhor aplicação (COSTANZA, 2006).

Ressalta-se que expressar valores em unidades monetárias não implica privatização ou trocas de mercado (MCCAULEY, 2006; COSTANZA *et al.*, 2014). A maioria dos serviços ecossistêmicos não compete entre si ou não são excludentes, o que significa que não são adequados para transações em mercados financeiros (KUBISZEWSKI *et al.*, 2010).

Dessa maneira pode-se concluir que valorar os serviços ecossistêmicos a partir de unidades monetárias não entra em conflito com outras abordagens que consideram a sua importância, mas representa uma informação adicional que complementa outras perspectivas.

A valoração dos serviços ecossistêmicos em unidades monetárias é uma metodologia que busca atribuir um valor monetário aos benefícios que os ecossistemas fornecem aos seres humanos, como purificação da água, polinização de culturas, regulação do clima, entre outros. Essa técnica pode ajudar a conscientizar as pessoas sobre a importância desses serviços e a tomar decisões mais conscientes sobre a conservação dos ecossistemas.

Mesmo que não houvesse valoração, o processo de listagem de todos os serviços derivados de um ecossistema por si só poderia ajudar a garantir seu reconhecimento em políticas públicas, o que torna a análise de sistemas ecológicos mais transparente e pode ajudar a informar os tomadores de decisão sobre os méritos relativos de diferentes opções. No entanto, a valoração costuma ser útil, porque muitas decisões envolvem compensações entre várias coisas que afetam o bem-estar humano de maneira diferente (COSTANZA, 2017).

Ainda que existam opiniões contrárias à valoração, com argumentos de que a natureza deve ser protegida por seu valor intrínseco (MCCAULEY, 2006), a sociedade muitas vezes toma decisões onde os ecossistemas não são protegidos, pois cada vez que são construídos “casas, escolas e hospitais, essenciais para o bem-estar humano, o ser humano se apropria de ecossistemas e impacta o capital natural” (COSTANZA *et al.*, 2017). Assim, ser mais explícito sobre o valor de SE pode ajudar a sociedade a tomar melhores decisões nos muitos casos em que existem *trade-offs* (BRAAT; DE GROOT, 2012).

A valoração em unidades monetárias pode complementar outras perspectivas e fornecer informações adicionais sobre a importância dos serviços ecossistêmicos, mas não deve substituir outras abordagens ou ser vista como a única maneira de avaliar a importância dos serviços ecossistêmicos.

O uso e cobertura destinados à Área Urbanizada também apresentou variação significativa, compatível com o crescimento urbano inerente à capital Porto Alegre, e a sede dos municípios de Canoas e Guaíba. A expansão da Área Urbanizada apresenta tendência de crescimento moderado, pouco se comparado à expansão dos usos Arroz, Silvicultura e Soja.

Evidentemente que a utilização de outros dados atualizados e em escala local para atribuir valores, ou mesmo outros tipos de indicadores de viés qualitativo, podem e devem ser integrados, como por exemplo intensidade do uso da terra, informações bióticas (dados adicionais de vegetação, fauna, habitats) e informações abióticas (tipos de solo, modelos de elevação, dados climáticos, informações hidrológicas), pois provavelmente abririam mais oportunidades no processo de avaliação e maior precisão nos resultados (BURKHARD *et al.*, 2009).

Em resumo, os conjuntos básicos de serviços ecossistêmicos e tipos de uso e cobertura da terra com seus indicadores sugeridos podem não ser suficientes para cobrir todas as circunstâncias e escalas em estudos individuais. É importante integrar avaliação de ecossistemas de estudo de caso específicos e tipos de uso e cobertura da terra necessários para representar as peculiaridades locais. Além disso, as dinâmicas temporais e processos que ocorrem em diferentes escalas devem ser levados em consideração.

Além disso, é importante ter em mente que não há ponderação entre os diferentes serviços ecossistêmicos, portanto, as somas calculadas para os diferentes grupos de serviços nas matrizes fornecem apenas uma visão geral do fornecimento total de serviços e devem ser interpretadas com precisão limitada. Se houver outros estudos e metodologias detalhados no local de estudo, é importante integrar outros serviços ecossistêmicos relevantes. Portanto, é importante ser cauteloso ao interpretar esses valores para uma análise mais detalhada (BURKHARD *et al.*, 2009).

Ainda que os dados do Projeto Mapbiomas apresentem limitação quanto à resolução espacial em relação à BHLG, permitindo que pequenas mudanças deixem de ser registradas, são dados de elevada acurácia e que possibilitam realizar o monitoramento de um ano para outro, pois as tipologias e as legendas permanecem as mesmas ao longo dos anos, o que não seria possível através de outros tipos de mapeamento. Além disso, esses dados são disponibilizados de forma gratuita pela plataforma *Google Earth Engine*, que oferece atualização e aperfeiçoamentos anuais, e pode ser utilizada por qualquer pessoa que tenha conhecimento básico em Sistema de Informações Geográficas (SIG).

O objetivo inicial desta análise e comparação entre as metodologias previa reconhecer qual ofereceria melhor resposta ao monitoramento dos SE no tempo e espaço, e concluiu-se que, para uma avaliação na escala da bacia hidrográfica do

Lago Guaíba, o método através da valoração mostrou-se mais eficaz por integrar de melhor maneira a expansão e a contração das áreas ao longo do tempo e do espaço, permitindo visualizar de forma mais nítida os *trade-offs* que ocorreram no período, além de permitir uma avaliação de cenários futuros.

Kubiszewski e colaboradores (2017) reiteram que cenários são simplificações de futuros complexos, que não devem ser adotados como previsões do futuro, mas sim apresentar um conjunto de futuros plausíveis. Essa limitação é inerente a qualquer análise de cenário, mas ainda assim cobrem um leque de possibilidades e permitem projetar uma tendência de situações que podem se concretizar.

Considerando que ações de conservação são urgentemente necessárias, estudos estratégicos devem ser priorizados e implementados considerando a especificidade de cada bioma, incluindo o funcionamento de ecossistemas para direcionar o manejo local (BRANDON *et al.*, 2005). O conceito de SE vem se consolidando desde sua criação, e podem ser o melhor caminho para a criação de uma economia ecológica mais transdisciplinar, capaz de entender e administrar o sistema complexo e interconectado Antropoceno que marca o período vigente (COSTANZA *et al.*, 2017).

5 CAPÍTULO V: CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Esse estudo mostrou que mudanças no uso e cobertura da terra produzem variações nos serviços ecossistêmicos. A análise partiu da compreensão das transformações ocorridas na BHLG no período 1985 - 2020, através de dados do Projeto Mapbiomas, bem como examinou o cenário tendencial para o futuro próximo de 2030 e 2050, através da modelagem realizada pelo Dinamica EGO.

As classes de uso e cobertura da terra Formação Florestal, Formação Campestre, Rios e lagos e Campo Alagado e Área Pantanosa forneceram os maiores valores em serviços ecossistêmicos e tiveram maior pontuação na avaliação da capacidade de fornecimento, e expressam a importância da manutenção de usos que mantenham a cobertura natural, com menor influência da ação antrópica.

Ainda que a quantificação das áreas não permita uma avaliação em termos de qualidade da água, condições do solo, qualidade do ar e de outros aspectos biofísicos, a priorização de áreas que favoreçam a cobertura natural é sempre mais vantajosa para o meio ambiente como um todo e para a produção de serviços ecossistêmicos.

A expansão do uso e cobertura da terra associada a atividades agrícolas foi a principal transformação observada na BHLG até 2020. Arroz, Soja e Silvicultura avançaram sobre a Formação Campestre e sobre Outras Lavouras Temporárias nos últimos 35 anos, confirmando a predominância do fornecimento imediato de alguns usos economicamente mais lucrativos e vantajosos para alguns setores, às custas de outros usos com SE mais importantes para os ecossistemas e que ofereçam maior bem-estar humano.

Os cenários apontam que essa tendência histórica recente de mudança continue em um futuro próximo a uma taxa crescente e alarmante, visto que a área sofrerá impactos substanciais ligados ao uso de agrotóxicos, adição de fertilizantes naturais ou químicos, alta demanda por irrigação, degradação do solo por contaminação e poluição, erosão, diminuição da ciclagem de nutrientes, alterações climáticas locais, perda de biodiversidade.

O uso e a cobertura da terra são influenciados por diversas forças subjacentes que moldam as categorias associadas. Essas forças podem ser tanto endógenas,

como características do próprio sistema terrestre, quanto exógenas, relacionadas a fatores externos.

No caso da produção de soja, a demanda crescente por esse grão como *commodity* agrícola tem impacto significativo no uso da terra. Fatores como condições de solo favoráveis, tecnologias de produção disponíveis, acesso a mercados e políticas públicas também influenciam a expansão desse cultivo e, conseqüentemente, a ocupação e transformação das áreas agrícolas.

Fatores socioeconômicos, como políticas governamentais, legislação ambiental, investimentos em infraestrutura e desenvolvimento regional, são condutores de mudança na determinação do uso e cobertura da terra. Essas forças externas interagem com as características intrínsecas do relevo, disponibilidade de água e fertilidade do solo, moldando os padrões de uso da terra.

A proteção dos ecossistemas naturais enfrenta desafios devido às divergências nas percepções de valores e importância entre pessoas de diferentes culturas e grupos socioeconômicos que desempenham papéis diversos nesses ambientes. Essas diferenças podem gerar obstáculos na implementação de medidas de conservação, e ajustar um ponto de equilíbrio entre os *trade-offs* é uma difícil tarefa que precisa levar em consideração inúmeras variáveis.

Assegurar o equilíbrio ecológico no meio ambiente é fundamental para a manutenção dos serviços ecossistêmicos, e envolvem algumas ações importantes, que incluem:

1) Conservação da biodiversidade: a preservação da diversidade de espécies é essencial para o funcionamento saudável dos ecossistemas e a manutenção dos SE. Proteger habitats naturais, implementar áreas protegidas e adotar práticas de manejo que promovam a biodiversidade são estratégias-chave;

2) Restauração de ecossistemas degradados: a recuperação de áreas degradadas é fundamental para restaurar os serviços ecossistêmicos perdidos. Isso pode envolver o reflorestamento, a recuperação de áreas úmidas, a reintrodução de espécies nativas e a reabilitação de solos degradados;

3) Uso sustentável dos recursos naturais: faz-se necessário utilizar os recursos naturais de forma sustentável, evitando a sobre-exploração e a degradação

dos ecossistemas. Isso inclui práticas de manejo sustentável da terra, agricultura sustentável e uso eficiente dos recursos hídricos;

4) Educação e conscientização: promover a conscientização ambiental e a educação sobre a importância dos serviços ecossistêmicos é fundamental para envolver a sociedade na sua conservação. Isso pode ser feito por meio de programas de Educação Ambiental nas escolas, campanhas de sensibilização e engajamento da comunidade local.

A análise das transformações observadas nessa pesquisa foram fundamentais para o acompanhamento das mudanças de uso e cobertura da terra na BHLG, e pode ser trabalhada em termos de indicadores para o controle dos impactos sobre os ecossistemas, através da avaliação e monitoramento de serviços ecossistêmicos.

Dados espaciais sobre uso e cobertura da terra que mantenham coerência tanto na escala temporal quanto na espacial dificilmente encontram-se disponíveis, e a homogeneidade de informações nessas escalas foi uma das principais escolhas pelos dados do MapBiomas. Em decorrência dessa homogeneidade as legendas também permaneceram as mesmas ao longo da série (de 1985 até o presente, com atualizações anuais).

Os dados disponibilizados pelo Projeto MapBiomas possuem elevada acurácia, são validados e atualizados anualmente, o que significa que podem ser utilizados como fonte de dados secundários de baixo custo, sem envolvimento de custos de trabalho de campo, em uma escala adequada à finalidade da análise e do objeto ou fenômeno de interesse. Métodos de baixo custo podem oferecer uma oportunidade para começar a construir um entendimento padronizado e uma linguagem acessível sobre os SE entre formadores de políticas públicas, pesquisadores, gestores e sociedade em geral.

No Brasil, alguns esquemas de PSA têm se mostrado uma alternativa eficiente para melhoria e recuperação de áreas com problemas de qualidade ambiental, mas observa-se lacunas e indefinições quanto ao monitoramento das alterações e melhorias praticadas nos locais selecionados. Nesse sentido, a metodologia de avaliação e mapeamento de SE se mostrou suficiente e adequada para a aplicação

em um esquema de PSA, visto que pode ser monitorada ao longo do tempo e do espaço, e os serviços podem ser valorados através de metodologia específica.

A conscientização sobre a contribuição dos ecossistemas para o bem-estar humano tem mobilizado a sociedade e desafiado estudiosos na elaboração de metodologias e formulação de políticas públicas para avaliar e administrar o capital natural, a fim de conciliar as necessidades e desafios conflitantes dos diferentes usos e cobertura da terra. Por mais esse motivo esse estudo torna-se relevante para que gestores ambientais identifiquem complexos *trade-offs* entre a conservação e o desenvolvimento do uso da terra.

Mesmo que existam críticas ao modelo de valoração, ainda assim essa discussão é necessária e produtiva, pois coloca cada vez mais em evidência a importância dos SE, um assunto relativamente incipiente no meio acadêmico brasileiro, com certo avanço em relação a políticas públicas - através da legislação sobre PSA - e com escasso conhecimento por parte da sociedade em geral.

A atribuição de valores aos SE tem uma conotação pragmática e incisiva, pois os formadores de políticas públicas e a sociedade como um todo têm uma noção muito mais tangível quando se trata de valores monetários. A intenção de atribuir valores aos serviços que a natureza oferece à sociedade está muito mais relacionada a uma forma de *valorização*, que é diferente de *valoração*, do que a ideia bastante criticada de “precificar” um bem que é intangível.

Sem a manutenção e a continuidade de todo esse conjunto de serviços oferecidos de forma equilibrada e gratuita, incorre-se em risco de inviabilizar o bem-estar da vida humana e de suas atividades correlatas. Eventos extremos dos mais variados tipos estão se tornando cada vez mais comuns em escala global, uma resposta da natureza e dos ecossistemas tentando se reestabelecer uma nova forma de equilíbrio e adaptação às mudanças intensas provocadas pelo ser humano em um período tão curto de tempo.

É relevante que outros métodos de avaliação devem ser combinados à valoração monetária, e que sejam escolhidos e validados entre pesquisadores, especialistas locais, gestores, sociedade e demais partes interessadas, o que pode facilitar a absorção de conceitos de serviços ecossistêmicos e, assim, permitir a implementação de ferramentas adicionais que ofereçam alternativas para problemas

ambientais e forneçam uma melhor base de dados para o mapeamento de serviços de ecossistemas.

A gestão de ecossistemas apresenta um grande desafio para o futuro, e esse estudo demonstrou que a valoração dos SE pode ser uma ferramenta de avaliação importante, que pode ser combinada de maneira inovadora e criativa com outras formas de avaliação, ou com melhorias na atribuição dos valores, adotando-se uma escala local, conforme os objetivos da análise. Essa abordagem pode expandir os critérios utilizados em diagnósticos e índices de desenvolvimento, através da inclusão de variáveis ligadas ao bem-estar humano, ao capital natural e à conservação dos ecossistemas.

Ressalta-se que a análise dos serviços ecossistêmicos também pode ser influenciada por fatores como as mudanças climáticas, que devem acontecer de forma muito mais rápida do que no passado. As mudanças climáticas têm o potencial de afetar significativamente os ecossistemas e, conseqüentemente, os serviços que eles fornecem.

As alterações nos padrões climáticos, como aumento da temperatura, alterações nos regimes de chuva e eventos climáticos extremos, podem ter impactos diretos nos serviços ecossistêmicos. Por exemplo, a mudança climática pode afetar a disponibilidade de água, influenciando a produção agrícola, o abastecimento de água potável e a regulação dos ecossistemas aquáticos.

Além disso, as mudanças climáticas podem levar à perda de biodiversidade, deslocamento de espécies, alterações nos ecossistemas e migrações humanas, que trarão conseqüências negativas para os ecossistemas. A polinização de cultivos pode ser comprometida devido à diminuição das populações de polinizadores devido às mudanças climáticas, para citar um exemplo.

Outros fatores, como a urbanização, a degradação ambiental, a fragmentação de habitats e a poluição, também podem alterar a estrutura e o funcionamento dos ecossistemas, afetando a provisão, regulação e os outros SE. A compreensão dessas interações é fundamental para desenvolver estratégias de manejo e conservação que levem em conta os efeitos das mudanças climáticas e outros aspectos, visando a sustentabilidade dos ecossistemas e a continuidade dos serviços ecossistêmicos.

Alterações nos ecossistemas resultam na diminuição de SE e comprometem o bem-estar humano, especialmente as populações mais vulneráveis, afetando o fornecimento de recursos essenciais, como alimentos, água limpa, ar puro, matéria-prima, entre outros. A perda de biodiversidade pode desencadear um efeito cascata, afetando a estabilidade dos ecossistemas e reduzindo a resiliência às mudanças ambientais.

As populações mais vulneráveis, como comunidades ribeirinhas, grupos étnicos minoritários, comunidades rurais pobres, povos indígenas, comunidades quilombolas, na maior parte dos casos dependem diretamente dos recursos naturais para sua subsistência e sustento, e são particularmente afetadas quando os serviços ecossistêmicos são prejudicados. A perda de habitats naturais e a diminuição da disponibilidade de recursos podem impactar a segurança alimentar, o acesso à água potável e a saúde dessas populações. Isso resulta em maior desigualdade e aprofunda as disparidades socioeconômicas.

Como Robert Costanza mencionou em seu estudo pioneiro, a valoração dos SE certamente é difícil e repleta de incertezas, mas tomar decisões e escolher fazer algo ainda é a melhor opção. Espera-se que abordagens inovadoras se disseminem mais rapidamente e sejam utilizadas de forma a melhorar de forma sustentável a gestão dos serviços ecossistêmicos, pois deles dependem o bem-estar e a permanência da humanidade neste planeta.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. Disponível em: <http://www.ingentaconnect.com/content/schweiz/mz/2013/00000022/00000006/art00008?token=004f1a11bab2a729bc7e41225f40382d2c2b4652767446624550576b34272c5f7b3d6d3f4e4b34a>. Acesso em: 28 Jun. 2023.

ALTIERI, M. Fatal harvest: Old and new dimensions of the ecological tragedy of modern agriculture. *Journal of Business Administration and Policy Analysis*, [s. l.], v. 31, 2002.

ANA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Manual Operativo do Programa Produtor de Água / Agência Nacional de Águas. 2a Edição. Brasília: ANA, 2012. 84 p.

ANDRADE, D. C. Dinâmica do uso do solo e valoração de serviços ecossistêmicos: notas de orientação para políticas ambientais. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, [s. l.], v. 25, p. 53–71, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5380/dma.v25i0.26056>

ANDRADE, L. C.; RODRIGUES, L. R.; ANDREAZZA, R.; CAMARGO, F. A. O. Lago Guaíba: uma análise histórico-cultural da poluição hídrica em Porto Alegre, RS, Brasil. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, [s. l.], v. 24, p. 229–237, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1413-41522019155281>

ARAÚJO, R. W. **A Expansão do eucalipto nos municípios de Barra do Ribeiro e Mariana Pimentel - RS**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geografia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

ARAÚJO, G. H. S. **Degradação ambiental**. In: ARAÚJO, G. H. S.; ALMEIDA, J. R.; GUERRA, A. J. T. Gestão ambiental de áreas degradadas. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005. 320 p.

ASSIS, L. F. F. G.; FERREIRA, K. R.; VINHAS, L.; MAURANO, L.; ALMEIDA, C.; CARVALHO, A.; RODRIGUES, J.; MACIEL, A.; CAMARGO, C. Terra Brasilis: A Spatial Data Analytics Infrastructure for Large-Scale Thematic Mapping. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 8, 513, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi8110513>

BACHI, L.; RIBEIRO, S. C.; HERMES, J.; SAADI, A. Cultural Ecosystem Services (CES) in landscapes with a tourist vocation: Mapping and modeling the physical landscape components that bring benefits to people in a mountain tourist destination in southeastern Brazil. *Tourism Management*, [s. l.], v. 77, n. May 2019, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2019.104017>

BAGSTAD, K. J.; SEMMENS, D. J.; WINTHROP, R. Comparing approaches to spatially explicit ecosystem service modeling: A case study from the San Pedro

River, Arizona. **Ecosystem Services**, [s. l.], v. 5, p. 40–50, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.07.007>

BAGSTAD, K. J.; SEMMENS, D. J.; WAAGE, S.; WINTHROP, R. A comparative assessment of decision-support tools for ecosystem services quantification and valuation. **Ecosystem Services**, [s. l.], v. 5, p. 27–39, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.07.004>

BALVANERA, P.; PFISTERER, A. B.; BUCHMANN, N.; HE, J.; NAKASHIZUKA, T.; RAFFAELLI, D.; SCHMID, B. Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services. **Ecology Letters**, v. 9, n. 10, p. 1146–1156, 2006. DOI: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1461-0248.2006.00963.x>

BARBIERI, A. F.; GUERRA, C. B.; TORRES, H. G.; SIMÕES, R. F.; REIS, A. V.; SCLIAR, C.; ABDO, R. O. O.; LINS, S. E. B. Atividades antrópicas e impactos ambientais. In: Paula, J. A. **Biodiversidade, população e economia: uma região de Mata Atlântica**. UFMG. 1997. p. 271-344.

BARRETO, P.A.B.; GAMA-RODRIGUES, E.F.; GAMA-RODRIGUES, A.C.; BARROS, N.F.; FONSECA, S. Atividade microbiana, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana em plantações de eucalipto, em sequência de idades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2008. 32:611-9.

BASSO, L. A. Bacias Hidrográficas do Rio Grande do Sul: implicações ambientais. In: VERDUM, R.; BASSO, L.A.; SUERTEGARAY, D.M.A. (Orgs.). **Rio Grande do Sul: paisagens e territórios em transformação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2012. 360 p.

BASSO, L.; MOREIRA, L.; PIZZATO, F. A influência da precipitação na concentração e carga de sólidos em cursos d'água urbanos: o caso do arroio Dilúvio, Porto Alegre-RS. **Geosul**, [s. l.], v. 26, p. 145, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5007/2177-5230.2011v26n52p145>

BATISTELLA, M.; MORAN, E. F. Dimensões humanas do uso e cobertura das terras na Amazônia: uma contribuição do LBA. **Acta Amazônica**, v. 35, n. 2, p. 239-247, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0044-59672005000200014>

BERETTA, M. E.; FERNANDES, A. C.; SCHNEIDER, A. A.; RITTER, M. R. A família Asteraceae no Parque Estadual de Itapuã, Viamão, Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Biociências**, [s. l.], v. 6, p. 189-216, 2008. Disponível em: <https://www.seer.ufrgs.br/index.php/rbrasbioci/article/view/114771>. Acesso em: 12 Jul 2022.

BLANCHARD, L.; VIRA, B.; BRIEFER, L. The lost narrative: Ecosystem service narratives and the missing Wasatch watershed conservation story. **Ecosystem Services**, [s. l.], v. 16, p. 105–111, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.10.019>

BOLDRINI, I. I. A flora dos Campos do Rio Grande do Sul. *In: Campos Sulinos - conservação e uso sustentável da biodiversidade* / Valério De Patta Pillar [et al.]. Editores. Brasília: MMA, 2009. 403 p.

BRADY, N. C.; WEIL, R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. Tradução de Igo Fernando Lepsch. 3.ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2013. 684 p.

BRAAT, L.C., DE GROOT, R. The ecosystem services agenda: bridging the worlds of natural science and economics, conservation and development, and public and private policy. **Ecosystem Services**. 1 (1), 4–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.011>

BRANCO, T. L.; ALMEIDA, C. M. de; FRANCISCO, C. N. Modelagem Dinâmica Espacial das Mudanças de Uso e Cobertura da Terra na Região Hidrográfica da Baía da Ilha Grande-RJ: um Enfoque Sobre Comunidades Tradicionais e Unidades de Conservação. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 74, n. 1, p. 137–158, 2022. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/59436>. Acesso em: 13 Mai 2022.

BRANDON, K., DA FONSECA, G. A. B., RYLANDS, A. B., DA SILVA, J. M. C. Special Section: Brazilian Conservation: Challenges and Opportunities. **Conservation Biology**, [s. l.], v. 19, n. 3, p. 595–600, 2005. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00710.x>

BRASIL. **Lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021**. Brasil, 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.119-de-13-de-janeiro-de-2021-298899394> Acesso em: 20 fev. 2021.

BRAUMAN, K. A.; DAILY, G. C.; DUARTE, T. K.; MOONEY, H. A. The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 32, p. 67-98, 2007. Disponível em: <<http://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev.energy.32.031306.102758>>. Acesso em: 05 Nov 2022.

BURKHARD, B.; KROLL, F.; MÜLLER, F.; WINDHORST, W. Landscapes' capacities to provide ecosystem services - A concept for land-cover based assessments. **Landscape Online**, [s. l.], v. 15, p. 1–22, 2009. DOI: <https://doi.org/10.3097/LO.200915>

BURKHARD, B.; KROLL, F.; NEDKOV, S.; MÜLLER, F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 21, p. 17–29, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.06.019>

CABRAL, P.; FEGER, C.; LEVREL, H.; CHAMBOLLE, M.; BASQUE, D. Assessing the impact of land-cover changes on ecosystem services: A first step toward

integrative planning in Bordeaux, France. **Ecosystem Services**, [s. l.], 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.08.005>

CARBONIERI, J.; MORAIS, H.; SANTORO, P. H.; ANDRE, J. Microclima em sistema de cultivo de cafeeiros arborizados e a pleno sol. In: **Simpósio de pesquisa dos cafés do Brasil**, 9., 2015, Curitiba. Consórcio pesquisa café: oportunidades e novos desafios: anais. Brasília, DF: Embrapa Café, 2015. 5 p.

CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; MELLO, C. R.; CERRI, C. E. P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 2, p. 277-289, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000200001>

CÉSPEDES-PAYRET, C.; PIÑEIRO, G.; GUTIÉRREZ, O.; PANARIO, D. Land use change in a temperate grassland soil: Afforestation effects on chemical properties and their ecological and mineralogical implications. **The Science of the total environment**. 438C. 549-557. 2012. DOI: <https://10.1016/j.scitotenv.2012.08.075>.

CHAPIN III, F.S. ZAVALETA, E.; EVINER, V. *et al.* Consequences of changing biodiversity. **Nature**, [s. l.], v. 405, n. 6783, p. 234–242, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1038/35012241>

COALIZÃO BRASIL. Proposta de Regulamentação da Lei 14.119/2021, que institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais, o Cadastro Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais e o Programa Federal de Pagamento por Serviços Ambientais. **Nota Técnica**. Disponível em: https://www.coalizaobr.com.br/home/phocadownload/2022/nota-tecnica-regulamentacao-lei-14119_2021-PSA.pdf. Acesso em: 08 Ago 2021.

COIMBRA, J. A. A. **O outro lado do meio ambiente**. São Paulo: CETESB, 1985.

CORDEIRO, J. L. P.; HASENACK, H. Cobertura vegetal atual do Rio Grande do Sul. In: **Campos Sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade** / Valério De Patta Pillar [et al.]. Editores. Brasília: MMA, 2009. 403 p.

COSTA, F. Agrotóxicos podem ter causado a morte de 480 milhões de abelhas no RS. **Jornal da Universidade**. Edição 225. UFRGS, 2019. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/jornal/agrotoxicos-podem-ter-causado-a-morte-de-480-milhoes-de-abelhas-no-rs/>. Acesso em: 06 Fev. 2023.

COSTANZA, R. *et al.* Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? **Ecosystem Services**, v. 28, p. 1–16, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212041617304060>. Acesso em: 2 Mar 2020.

COSTANZA, R. **Scenario planning for the Westernport Bay Region**. *In*: Interim report of the Phillip Island scenario-planning workshop. 2014.

COSTANZA, R., DE GROOT, R., SUTTON, P.C., VAN DER PLOEG, S., ANDERSON, S., KUBISZEWSKI, I., FARBER, S., TURNER, R.K. Changes in the global value of ecosystem services. **Global Environmental Change**, [s. l.], v. 26, p. 152–158, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>

COSTANZA, R.; ARGE, R.; DEGROOT, R.; FARBERK, S.; GRASSO, M.; HANNON, B.; LIMBURG, K.; NAEEM, S.; NEILL, R.V.O.; PARUELO, J.; *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. v. 387, **Nature**. May, p. 253–260, 1997.

COSTANZA, R.; DALY, H. E. Natural capital and sustainable development. **Conservation Biology**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 37–46, 1992.

CRUZ, C. L. Z.; CRUZ, C. B. M. Avaliação da exatidão temática da cobertura e uso da terra representada através do Mapbiomas no Rio de Janeiro. **GEOgraphia**, [s. l.], v. 23, n. 50, 2021. DOI: <https://doi.org/10.22409/geographia2021.v23i50.a47001>

CRUZ, J. S.; BLANCO, C. J. C.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. F. Modeling of land use and land cover change dynamics for future projection of the Amazon number curve. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 811, p. 152348, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152348>

CUIABANO, S. M. Principais fatores responsáveis pela expansão da soja no Brasil. **Brasilian Journal of Internacional Relations. BJIR**, Marília, v. 8, n. 3, p. 460-487, set./dez. 2019. DOI: <https://doi.org/10.36311/2237-7743.2019.v8n3.03.p460>

CZYKIEL, R.; ALVES, T. L. S.; RITTER, M. R. Plantas tóxicas ocorrentes no Parque Estadual de Itapuã, Viamão, Rio Grande do Sul. *In*: GUERRA, T. (org.). **Conhecer para Gerenciar: Ambiente e Sociedade**. Porto Alegre: Centro de Ecologia/UFRGS, 2015. P. 53-55. 635 p.

DAILY, G. C. **Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems**. Island Pre ed. Washington D.C. 1997.

DAILY, G. C.; SÖDERQVIST, T.; ANIYAR, S.; ARROW, K.; DASGUPTA, P.; EHRlich, P. R.; FOLKE, C.; JANSSON, A.; JANSSON, B.; KAUTSKY, N.; LEVIN, S.; LUBCHENCO, J.; MÄLER, K. G.; SIMPSON, D.; STARRETT, D.; TILMAN, D.; WALKER, B. The Value of Nature and the Nature of Value. **Science**, v. 289, p. 395–396, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.289.5478.395>

DE GROOT, R. Function-analysis and valuation as a tool to assess land use conflicts in planning for sustainable, multi-functional landscapes. **Landscape and Urban Planning**, [s. l.], 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.016>

DE GROOT, R. S. *et al.* A Typology for the Classification Description and Valuation of Ecosystem Functions, Goods and Services. **Ecol Econ**, v. 41, n. 3, p. 393–408, 2002. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921800902000897>>. Acesso em: 22 Mar 2020.

DE GROOT, R.S. *et al.* Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. **Ecological Complexity**, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 260–272, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2009.10.006>

DE LIMA, A. S. *et al.* Ecosystem-based information as a support tool to the integrated coastal management of the Santa Catarina Island, Brazil. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, [s. l.], v. 44, p. 20–35, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5380/dma.v44i0.54947>

DELEVATI, D. M.; KROUNBAUER, M. **Execução e resultados de um projeto de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) na sub-bacia do arroio Andréas/bacia hidrográfica do rio Pardo-RS-Brasil**. In: 29º Congresso ABES/FENASAN, 2017, São Paulo. 29º Congresso ABES/FENASAN, 2017.

DIB, V.; NALON, M. A.; AMAZONAS, N. T.; VIDAL, C. Y.; ORTIZ-RODRÍGUEZ, I. A.; DANĚK, J.; OLIVEIRA, M. F.; ALBERTI, P.; SILVA, R. A.; PRECINOTO, R. S.; TACIANA FIGUEIREDO GOMES, T. F. Drivers of change in biodiversity and ecosystem services in the cantareira system protected area: A prospective analysis of the implementation of public policies. **Biota Neotropica**, [s. l.], v. 20, n. suppl 1, p. 1–12, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1676-0611-BN-2019-0915>

DIPLA/DRHS. **Inserção de municípios e bacias hidrográficas no Estado do Rio Grande do Sul**. Nota Técnica nº 002/2020/DIPLA/DRHS. Divisão de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos. Departamento de Recursos Hídricos. Porto Alegre, 2020.

DUNFORD, R.; HARRISON, P.; SMITH, A.; DICK, J. *et al.* Integrating methods for ecosystem service assessment: Experiences from real world situations. **Ecosystem Services**, [s. l.], v. 29, p. 499–514, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.10.014>

DURIGAN, G. **Efeito dos quebra-ventos de *Grevillea robusta* A. Cunn sobre a velocidade do vento**. 1986. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

EBLING, E. D.; REICHERT, J. M.; PELAEZ, J. J. Z.; RODRIGUES, M. F.; VALENTE, M. L.; CAVALCANTE, R. B. L.; REGGIANI, P.; SRINIVASAN, R. Event-based hydrology and sedimentation in paired watersheds under commercial eucalyptus and grasslands in the Brazilian Pampa biome. **International Soil and Water Conservation Research**, 9, 180 - 194. 2021.

EEA. **Corine Land Cover Report** – Part 2: Nomenclature. <http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-part2>. 1994.

ELLIS, E.; GOLDEWIJK, K. K.; SIEBERT, S.; LIGHTMAN, D.; RAMANKUTTY, N. Anthropogenic Transformation of the Biomes, 1700 to 2000. **Global Ecology and Biogeography**, [s. l.], v. 19, p. 589–606, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00540.x>

ELLIS, E.C., KLEIN GOLDEWIJK, K., SIEBERT, S., LIGHTMAN, D.; RAMANKUTTY, N. Anthropogenic transformation of the biomes, 1700 to 2000. **Global Ecology and Biogeography**, 19: 589-606. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00540.x>

ESSWEIN, A.; ZERNACK, F. ¿Puede ser una empresa alemana responsable por daños causados en Argentina? Planeta Futuro. **El País**, 2022. Disponível em: https://elpais.com/planeta-futuro/2022-08-22/puede-ser-una-empresa-alemana-responsable-por-danos-causados-en-argentina.html?sma=newsletter_planeta_futuro20220824&mid=DM135172&bid=1201894166. Acesso em: 06 Fev 2023.

EUROPEAN COMMISSION. **Our life insurance, Our Natural Capital: An EU Biodiversity Strategy to 2020**. Brussels: [s. n.], 2011.

FARBER, S. C.; COSTANZA, R.; WILSON, M.A. Economic and ecological concepts for valuing ecosystem services. **Ecological Economics**, [s. l.], v. 41, n. 3, p. 375–392, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00088-5](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00088-5)

FGB/TNC/MMA/GIZ. Fundação Grupo Boticário de Proteção à Natureza/The Nature Conservancy do Brasil/Ministério do Meio Ambiente/Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. **Guia para a formulação de políticas públicas estaduais e municipais de Pagamento por Serviços Ambientais**. 2017. Disponível em: <https://www.tnc.org.br/content/dam/tnc/nature/en/documents/brasil/guia-politicas-publicas-PSA.pdf>. Acesso em: 07 Ago 2021.

FEIX, D.; LEUSIN JUNIOR, S.; BORGES, B. K.; PESSOA, M. L. **Painel do Agronegócio do Rio Grande do Sul 2022**. Porto Alegre: Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão, 2022. 78 p.

FEREZ, A. P. C.; CAMPOE, O. C.; MENDES, J. C. T.; STAPE, J. L. Silvicultural opportunities for increasing carbon stock in restoration of Atlantic forests in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 350, p. 40-45, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.04.015>.

FERREIRA, A. B.; PEREIRA FILHO, W. Análise do uso e cobertura da terra de três sub-bacias hidrográficas - Rio Grande do Sul/Brasil. **RBGF- Revista Brasileira de**

Geografia Física. Recife-PE, Vol.2, n.03, set-dez, 2009. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v2i3.232631>

FITZ, P.R. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

FOELKEL, C. **Gestão ecoeficiente dos resíduos florestais lenhosos da eucaliptocultura**. In: EUCALYPTUS Online Book & Newsletter. 2007. 48 p. Disponível em: <http://www.eucalyptus.com.br/capitulos/PT07_residuoslenhosos.pdf>. Acesso em: 30 Mar 2019.

GABRIELLE, B.; NGUYEN, N.; MAUPU, P.; VIAL, E. Life cycle assessment of eucalyptus short rotation coppices for bioenergy production in southern France. **GCB Bioenergy**, v. 5, n. 1, p. 30-42, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12008>

GIANNINI, T. C. *et al.* The Dependence of Crops for Pollinators and the Economic Value of Pollination in Brazil. **Journal of Economic Entomology**, [s. l.], v. 108, n. 3, p. 849–857, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1093/jee/tov093>

GOMES DA SILVA, M.; BELTRÃO, N. E. S.; MORALES, G. P. Avaliação e mapeamento dos serviços ecossistêmicos ofertados pela Reserva Biológica Nascentes da Serra do Cachimbo, Pará, Brasil. **Geosul**, [s. l.], v. 36, n. 78, p. 516–536, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5007/2177-5230.2021.e71192>

GOMES, E.; INÁCIO, M.; BOGDZEVIC, K.; KALINAUSKAS, M.; KARNAUSKAITE, D.; PEREIRA, P. Future scenarios impact on land use change and habitat quality in Lithuania. **Environmental Research**, [s. l.], v. 197, n. April, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111101>

GUERINO, R. M. G.; MORAIS, I. L. de.; SANTOS, A. B. da S.; CAMPOS, R. M. Expansion and socio-environmental impacts of the culture of Eucalyptus spp. (Myrtaceae) in Brazil: a literature panorama. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, n. 3, p. e48811326751, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i3.26751.

HAINES-YOUNG, R.; POTSCHIN, M. **Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 and Guidance on the Application of the Revised Structure**. [s. l.], p. 53, 2018.

HASENACK, H.; CORDEIRO, J.L.P.; WEBER, E.J. **Uso e cobertura vegetal do Estado do Rio Grande do Sul – situação em 2002**. Porto Alegre: UFRGS IB Centro de Ecologia. 2015. 1a ed.

HASENACK, H.; WEBER, E. J.; VÉLEZ-MARTIN, E.; HOFMANN, G. S.; DEWES, H. Bioma Pampa: oportunidades e desafios de pesquisa para o desenvolvimento sustentável: In: VILELA, E.F.; CALLEGARO, G.M.; FERNANDES, G.W. **Biomass e agricultura: oportunidades e desafios**. Rio de Janeiro: Vertente edições, 2019, 304 p., p. 123-140.

HERNÁNDEZ-BLANCO, M. *et al.* Future scenarios for the value of ecosystem services in Latin America and the Caribbean to 2050. **Current Research in Environmental Sustainability**, [s. l.], v. 2, p. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2020.100008>

HINATA, S. S.; BASSO, L. A. Mapeamento do uso e cobertura do solo como subsídio à avaliação de serviços ecossistêmicos na sub-bacia hidrográfica do arroio Passo Fundo, Guaíba-RS, **Estudos Geográficos: Revista Eletrônica de Geografia**. Rio Claro, SP. v. 20 n. 1. 2022. DOI: <https://doi.org/10.5016/estgeo.v20i1.14969>

HINATA, S.S.; BASSO, L. A.; SANTOS, J. G. S. Mapeamento e avaliação dos serviços ecossistêmicos entre 1985 e 2019 na sub-bacia hidrográfica do Arroio Passo Fundo (Guaíba/RS). **Sociedade & Natureza**, [s. l.], v. 33, p. 1–14, 2021. DOI: <https://doi.org/10.14393/sn-v33-2021-59170>

HOFMANN, G.; MARCOS, M.; HASENACK, H. Expansão urbana e alterações do uso e cobertura do solo no município de Canoas (Rio Grande do Sul) no período 1984 a 2014. **Revista de Ciências Ambientais**, [s. l.], v. 11, p. 71, 2017. DOI: <https://doi.org/10.18316/rca.v11i3.3862>

HOFMANN, G.S.; WEBER, E.J; HASENACK, H. (Org.). **Uso e cobertura vegetal do Estado do Rio Grande do Sul – situação em 2015**. Porto Alegre: UFRGS IB Centro de Ecologia, 2018. 1a ed.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa dos biomas do Brasil**: primeira aproximação. 2004.

_____. Mudanças na Cobertura e Uso da Terra 2000 – 2010 – 2012. Rio de Janeiro, 2015. 44 p.

_____. **Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra do Brasil 2014 – 2016**. Rio de Janeiro, 2018. 32p.

_____. **Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra do Brasil 2016 – 2018**. Rio de Janeiro, 2020. 26p.

_____. Plataforma Geográfica Interativa (PGI): Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra do Brasil. 2021. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/apps/monitoramento_cobertura_uso_terra/v1/. Acesso em: 13 jun 2022.

_____. Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA: **Censo Agropecuário - Séries Temporais**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/series-temporais>. Acesso em: 14 Ago 2022.

INDE. INFRAESTRUTURA NACIONAL DE DADOS ESPACIAIS. **Visualizador de Mapas**. 2022. Disponível em: <https://visualizador.inde.gov.br/>. Acesso em: 18 Jan 2023.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Normais Climatológicas do Brasil 1991-2020. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA. Edição digital. Brasília-DF. 2022. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais#>. Acesso em: 28 Jun. 2023.

IPBES. Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. E. S. Brondizio, J. Settele, S. Díaz, and H. T. Ngo (editors). IPBES secretariat, Bonn, Germany. 1148 pages. 2019. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673>

IPBES. The IPBES regional assessment report on biodiversity and ecosystem services for the Americas. Rice, J., Seixas, C. S., Zaccagnini, M. E., Bedoya-Gaitán, M., and Valderrama N. (eds.). Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany. 656 p. 2018. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3236252>

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **A economia de ecossistemas e da biodiversidade no Brasil (TEEB-Brasil): análise de lacunas**. Texto para discussão. Brasília: Rio de Janeiro: Ipea, 2013.

JESUS, E. C.; SILVA, M. K.; LAUX, M. H. Manejo da orizicultura com baixo impacto ambiental utilizando marrecos de Pequim, rizipscicultura e biodinâmica na sub-bacia do arroio Ribeiro, Barra do Ribeiro (RS). In: GUERRA, T. (org.). **Conhecer para Gerenciar: Ambiente e Sociedade**. Porto Alegre: Centro de Ecologia/UFRGS, 2015. p. 147-152. 635 p.

JI, Z.; WEI, H.; XUE, D.; LIU, M.; CAI, E.; CHEN, W.; FENG, X.; LI, J.; LU, J.; GUO, Y. Trade-Off and Projecting Effects of Land Use Change on Ecosystem Services under Different Policies Scenarios: A Case Study in Central China. **Int. J. Environ. Res. Public Health** 2021, 18, 3552. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18073552>

JUNIOR, A.; REIS, Y. Comparação entre o Método de Valoração de Contingente e o Custo de Oportunidade para Pagamento aos Produtores Rurais do Programa Conservador das Águas, Igarapé, Minas Gerais. **Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science**, [s. l.], v. 9, p. 138–161, 2020. DOI: <https://doi.org/10.21664/2238-8869.2020v9i1.p138-161>

KRAMER, R. A.; HEALY, R.; MENDELSON, R. Forest valuation. In: SHARMA, N. P. **Managing the world's forests: looking for balance between conservation and development**. Kendall/Hunt Publishing Company, Iowa, US. 1992.

KROEGER, T.; KLEMZ, C.; SHEMIE, D.; BOUCHER, T.; FISHER, J. R. B; ACOSTA, E.; DENNEDY-FRANK, P. J.; CAVASSANI, A. T.; GARBOSSA, L.; BLAINSKI, E.;

SANTOS, R. C.; PETRY, P.; GIBERTI, S.; DACOL, K. Análise do Retorno do Investimento na Conservação de Bacias Hidrográficas: Referencial Teórico e Estudo de Caso do Projeto Produtor de Água do Rio Camboriú, Santa Catarina, Brasil. **The Nature Conservancy**, Arlington, VA, 2017.

KUBISZEWSKI, I. *et al.* The future value of ecosystem services: Global scenarios and national implications. **Ecosystem Services**, [s. l.], v. 26, p. 289–301, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.05.004>

KUBISZEWSKI, I.; FARLEY, J.; COSTANZA, R. The production and allocation of information as a good that is enhanced with increased use. **Ecological Economics**, [s. l.], v. 69, n. 6, p. 1344–1354, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.02.002>

LAMPIETTI, J.A.; DIXON, J. A. To See the Forests for the Trees: A Guide to Non-Timber Forest Benefits. **Environmental Economics Paper** 013. The World Bank, 1995. 39 p.

LAVRATTI, P.; TEJEIRO, G. **Direito e mudanças climáticas** [recurso eletrônico]: Pagamento por Serviços Ambientais: experiências locais e latino-americanas / Paula Lavratti, Guillermo Tejeiro, organizadores. Direito e Mudanças Climáticas 7. São Paulo: Instituto O Direito por um Planeta Verde, 2014. 143p.

LEITÃO, L. C. R.; SANTOS, J. G.; ARAGÃO, M. A. S. Mapeamento e Avaliação de Serviços dos Ecossistemas do sítio de Importância Comunitária “Dunas De Mira, Gândara e Gafanhas”. *In: IV Simpósio Brasileiro de Geomática - II Jornadas Lusófonas - Ciências e tecnologias de Informação Geográfica*. Presidente Prudente-SP. 2017. DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.1111928036>

LEITE, E. F.; ROSA, R. Análise do uso, ocupação e cobertura da terra na bacia hidrográfica do Rio Formiga, Tocantins. **Observatorium: Revista Eletrônica de Geografia**, v.4, n .12, p. 90-106, dez. 2012.

LEITE, S. L. C.; LUZ, M.; LANGE, O.; GUERRA, T. Fisionomia e florística de um remanescente de mata ciliar do arroio Itapuã, Viamão, RS. **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, v. 2, n.1, p. 9-22, 2004.

LI, F. *et al.* Assessing the changes in land use and ecosystem services in Changzhou municipality, Peoples' Republic of China, 1991-2006. **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 42, p. 95–103, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.11.012>

LIU, Y. Modelling Urban Development with Geographical Information Systems and Cellular Automata (1st ed.). **CRC Press**. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420059908>

LIZ-REJANE ISSBERNER, L. R.; LÉNA, P. **Antropoceno: os desafios essenciais de um debate científico**. Correio da Unesco, 2018. Disponível em: <https://pt.unesco.org/courier/2018-2/antropoceno-os-desafios-essenciais-um-debate-cientifico>. Acesso em: 29 Jun. 2023.

MACHADO, T.; SANTOS, F. L.; CUNHA, J. P. B.; CUNHA, D. A.; COELHO, L. M. Perdas na plataforma de corte de uma colhedora combinada de grãos na colheita de soja. **Revista Engenharia na Agricultura - Reveng**, [s. l.], v. 20, p. 537–543, 2012. DOI: <https://doi.org/10.13083/reveng.v20i6.378>

MAES, J. *et al.* An indicator framework for assessing ecosystem services in support of the EU Biodiversity Strategy to 2020. **Ecosystem Services**, [s. l.], v. 17, p. 14–23, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ECOSER.2015.10.023>

MAES, J. *et al.* Mapping ecosystem services for policy support and decision making in the European Union. **Ecosystem Services**, v. 1, n. 1, p. 31–39, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.06.004>

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomass** – Coleção 6 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil. 2022. Disponível em: <https://mapbiomas.org/>. Acesso em: 20 Nov 2021.

MARTINEZ-HARMS, M. J.; BRYAN, B. A.; FIGUEROA, E.; PLISCOFF, P.; RUNTING, R.; WILSON, K. A. Scenarios for land use and ecosystem services under global change. **Ecosystem Services**, v. 25, p. 56-68. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212041616302376>>. Acesso em: 12 abr. 2020.

MARTINS, D. P.; GUERRA, T.; ALTMANN, F. Levantamento da situação ambiental da bacia hidrográfica do arroio Passo Fundo como instrumento para a Gestão e Educação Ambiental. **Revista Eletrônica do IBEAS**, v. 1, p. 1-9, 2011. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2011/VIII-006.pdf>. Acesso em 17 Mai 2022.

MATEUS, R.; PADILHA, D. Avaliação multicritério da fragilidade do território no Brasil: A silvicultura no Estado do Rio Grande do Sul. **Finisterra**. LII. 73-140. 2017. DOI: <https://doi.org/10.18055/Finis697>

MCCAULEY, D. J. Selling out on nature. **Nature**, [s. l.], v. 443, n. 7107, p. 27–28, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1038/443027a>

MEA. Millennium Ecosystem Assessment. **Ecosystems and Human Well-being: Synthesis**. Washington, DC: [s. n.], 2005. Disponível em: <http://www.millenniumassessment.org/en/Synthesis.aspx>. Acesso em: 02 Mar 2020.

MENDIONDO, E. M; TUCCI, C. E M. Escalas hidrológicas. conceitos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, ABRH, v. 2, n. 1, p. 59-122, 1997.

MENDOZA-PONCE, A.; CORONA-NÚÑEZ, R. O.; NAVA, L. F.; ESTRADA, F.; CALDERÓN-BUSTAMANTE, O.; MARTÍNEZ-MEYER, E.; CARABIAS, J.; LARRALDE-CORONA, A. H.; BARRIOS, M.; PARDO-VILLEGAS, P. D. Impacts of land management and climate change in a developing and socioenvironmental challenging transboundary region. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 300, p. 113748, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113748>

MMA. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Pagamentos por Serviços Ambientais na Mata Atlântica: lições aprendidas e desafios**. Brasília. 2011.

MMA. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Recomendação Comitê Nacional de Zonas Úmidas (CNZU) nº 7, de 11 de junho de 2015. Dispõe sobre a Definição de Áreas Úmidas Brasileiras e sobre o Sistema de Classificação destas áreas. 2015.

MOLEDO, J. C.; SAAD, A. R.; DALMAS, F. B.; ARRUDA, R. O. M.; CASADO, F. Impactos ambientais relativos à silvicultura de eucalipto: uma análise comparativa do desenvolvimento e aplicação no plano de manejo florestal. **Geociências**, 35 (4), 512-530. 2016.

MOURA, N. S. V.; MORAN, E. F. Problemas Ambientais Urbanos: questões metodológicas nos estudos geográficos com ênfase na análise geomorfológica e nas mudanças do uso da terra. In: BASSO, L. A.; MOURA, N. S. V.; STROHAECKER, T. M. (org.). **Geografia: dinâmica, conflitos e proposições** [livro eletrônico]. Porto Alegre: wwlivros, 2017.

MOURA, N. S. V.; MORAN, E. F.; DIAS, T. S.; BORGES, F. F. Expansão urbana sobre compartimentos de relevo suscetíveis à inundação: Zona Sul do município de Porto Alegre, Rio Grande do Sul. **Pesquisas em Geociências**, [S. l.], v. 43, n. 3, p. 299–310, 2016. DOI: <https://doi.org/10.22456/1807-9806.78237>

MÜLLER, F. Indicating ecosystem and landscape organisation. **Ecological Indicators** 5(4), 280-294. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2005.03.017>

MÜLLER, F.; BURKHARD, B. An ecosystem based framework to link landscape structures, functions and services. In: MANDER, Ü.; WIGGERING, H.; HELMING, K. (eds.). **Multifunctional Land Use – Meeting Future Demands for Landscape Goods and Services**. Pp. 37-64, **Springer**. Berlin - Heidelberg - New York. 2007.

NOBRE, C. **Mudanças climáticas globais: possíveis impactos nos ecossistemas do país**. 2001. Disponível em: <http://seer.cgee.org.br/index.php/parcerias_estrategicas/article/view/.../180>. Acesso em: 05 Nov 2022.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São José dos Campos: Edgar Blücher, 1989.

NRC. Watershed Management for Potable Water Supply: Assessing New York City's Approach. National Academy of Sciences, Water Science and Technology Board, 2000.

OLIVEIRA, G. L. T.; SCHNEIDER, M. The politics of flexing soybeans: China, Brazil and global agroindustrial restructuring. **The Journal of Peasant Studies**, [s. l.], v. 43, n. 1, p. 167–194, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/03066150.2014.993625>

OLIVEIRA, G. L. T. Uma Descrição Agroecológica Da Crise Atual. **Revista Nera**, [s. l.], n. 15, p. 66–87, 2012. DOI: <https://doi.org/10.47946/rnera.v0i15.1375>

OLIVEIRA, T. E.; FREITAS, D. S.; GIANEZINI, M.; RUVIARO, C. F.; ZAGO, D.; MÉRCIO, T. Z.; DIAS, E. A.; LAMPERT, V. N.; BARCELLOS, J. O. J. Agricultural land use change in the Brazilian Pampa Biome: The reduction of natural grasslands. **Land Use Policy**, [s. l.], v. 63, p. 394–400, 2017. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.02.010>

OLIVEIRA, U.; SOARES-FILHO, B.; BUSTAMANTE, M.; GOMES, L.; OMETTO, J.; RAJÃO, R. Determinants of Fire Impact in the Brazilian Biomes. **Frontiers in Forests and Global Change**, [s. l.], v. 5, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.735017>

ONU. Organização das Nações Unidas. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. 2022. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 20 Abr 2022.

OVERBECK, G. E.; MÜLLER, S. C.; FIDELIS, A.; PFADENHAUER, J.; PILLAR, V. P.; BLANCO, C. C.; BOLDRINI, I. I.; BOTH, R.; FORNECK, E. D. Os Campos Sulinos: um bioma negligenciado. In: **Campos Sulinos - conservação e uso sustentável da biodiversidade** / Valério De Patta Pillar [et al.]. Editores. Brasília: MMA, 2009. 403 p.

PAGIOLA, S.; VON GLEHN, H. C.; TAFFARELLO, D. **Experiências de pagamento por serviços ambientais no Brasil**. São Paulo (Estado). Secretaria do Meio Ambiente / Coordenadoria de Biodiversidade e Recursos Naturais. São Paulo: SMA/CBRN, 2013. 336p. Disponível em: <http://documents.worldbank.org/curated/en/548371468021548454/pdf/864940WP0P088000PORTUGUESE0PSA livro.pdf>. Acesso em: 29 Jun 2020.

PALMER, M. A.; FEBRIA, C. M. The Heartbeat of Ecosystems. **Science**, v. 336, n. 6087, p. 1393–1394, 2012. Disponível em: http://ecology.wisc.edu/docs/palmer_and_febria_2012.pdf. Acesso em: 22 Mar 2020.

PARENTE, L.; MESQUITA, V.; MIZIARA, F.; BAUMANN, L.; FERREIRA, L. Assessing the pasturelands and livestock dynamics in Brazil, from 1985 to 2017: A novel approach based on high spatial resolution imagery and Google Earth Engine cloud computing. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], v. 232, p. 111301, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111301>

PARRON, L. M.; GARCIA, J. R., CAMPANHA, M. M., MAIA, C. M. B. F.; QUEIROZ, D. L.; PEIXOTO, R. T. G.; FRITZSONS, E., WREGE, M. S. Serviços ecossistêmicos e eucalipto. In: OLIVEIRA, E. B. de; PINTO JUNIOR, J. E. (Ed.). O eucalipto e a Embrapa: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento. Brasília, DF: Embrapa, 2021. p. 611-666. Disponível em:
<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1131638> Acesso em 14 Dez 2022.

PEARCE, D.; MORAN, D. **The economic value of biodiversity**. Earthscan Publication. London, 1994.

PEIXOTO, C. A. B.; OLIVEIRA-COSTA, L. P. Geodiversidade e biodiversidade no Bioma Pampa. **Ciência Geográfica** - Bauru - XXVII - Vol. XXVII - (2): Janeiro/Dezembro - 2023. p.1129-1173 DOI:
<https://doi.org/10.57243/26755122.XXVII2045>

PETRONI, M. L.; SIQUEIRA-GAY, J.; GALLARDO, A. L. C. F. Understanding land use change impacts on ecosystem services within urban protected areas. **Landscape and Urban Planning**, [s. l.], v. 223, p. 104404, 2022. DOI:
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104404>

PNUD. **Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. América Latina e o Caribe: Uma Superpotência de Biodiversidade**, Nova York/Brasília, 2010, p. 4. Disponível em:
https://www.undp.org/content/dam/undp/library/Environment%20and%20Energy/biodiversity/Latin-America-and-the-Caribbean---A-Biodiversity-Superpower--Policy_Brief_SPANISH.pdf. Acesso em: 12 Jan 2019.

PRILLAMAN, M. Are we in the Anthropocene? Geologists could define new epoch for Earth. **Nature**. Jan;613(7942):14-15. 2022. Disponível em:
www.nature.com/articles/d41586-022-04428-3. Acesso em: 18 Jan 2023.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2009. 288 p.

PRO-GUAÍBA. **Programa para o Desenvolvimento Ecologicamente Sustentável e Socialmente Justo da Região Hidrográfica Guaíba**. 2005. Disponível em:
<http://www.proguaiba.rs.gov.br>. Acesso em: 02 Mai 2022.

QUINTAS-SORIANO, C.; CASTRO, A. J.; CASTRO, H.; GARCÍA-LLORENTE, M. Impacts of land use change on ecosystem services and implications for human well-being in Spanish drylands. **Land Use Policy**, [s. l.], v. 54, p. 534–548, 2016. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.03.011>

REID, W., MOONEY, H., CAPISTRANO, D. *et al.* Nature: the many benefits of ecosystem services. *Nature* 443, 749. 2006. <https://doi.org/10.1038/443749a>

REIS, M.; GRAÇA, P. M. L. A.; YANAI, A. M.; RAMOS, C. J. P.; FEARNSSIDE, P. M. Forest fires and deforestation in the central Amazon: Effects of landscape and climate on spatial and temporal dynamics. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 288, p. 112310, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112310>

REVISTA ARCO. Desmitificando o Pampa como emissor de gases do efeito estufa. 2021. Disponível em: <https://ufsm.br/r-601-8847>. Acesso em 03/01/2023

RIO GRANDE DO SUL. **Lei nº 10.350, de 30 de dezembro de 1994**. Institui o Sistema Estadual de Recursos Hídricos, regulamentando o artigo 171 da Constituição do Estado do Rio Grande do Sul. Disponível em: <http://www.mprs.mp.br/ambiente/legislacao/id468.htm>. Acesso em 11 Mai 2022.

RIO GRANDE DO SUL. **Plano da bacia do Lago Guaíba**. Relatório Final Síntese e SIG. 2016. Disponível em: https://comitedolagogaiba.com.br/wp-content/uploads/2021/04/Relatorio_Final_Sintese_Rev01_completo-comp.pdf. Acesso em: 11 Mai 2022.

ROCHA, J. **Sistemas complexos, modelação e geosimulação da evolução de padrões de uso e ocupação do solo**. Tese de doutoramento, Geografia (Ciências da Informação Geográfica), Universidade de Lisboa, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/6772>. Acesso em: 24 Mai 2022.

RODRIGUES, H. O.; SOARES-FILHO, B. S.; COSTA, W. L. S. Dinâmica EGO, uma plataforma para modelagem de sistemas ambientais. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Florianópolis. INPE, 2007.

RODRÍGUEZ, J. P.; BEARD JR. T.; BENNETT, E. M.; CUMMING, G. S.; CORK, S.; AGARD, J.; DOBSON, A. P.; PETERSON, G. D. Trade-offs across Space, Time, and Ecosystem Services. **Ecology and Society** 11(1): 28. 2006. Disponível em: <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art28/>. Acesso em: 2 Mar 2020.

ROESCH, L.F.W.; VIEIRA, F.C.B.; PEREIRA, V.A.; SCHÜNEMANN, A.L.; TEIXEIRA, I.F.; SENNA, A.J.T.; STEFENON, V.M. The Brazilian Pampa: A Fragile Biome. **Diversity**. 2009, 1, 182-198. DOI: <https://doi.org/10.3390/d1020182>

ROLLSING, C. Agricultores contabilizam prejuízos nas produções de uvas, oliveiras e outras culturas. **GZH Campo e Lavoura**, 2021. Disponível em: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/economia/campo-e-lavoura/noticia/2021/01/agricultores-contabilizam-prejuizos-nas-producoes-de-uvas-oliveiras-e-outras-culturas-ckjnoa0la005r019we3z5n7cp.html>. Acesso em: 07 Fev. 2023.

ROMANI, G.; ARENDS-KUENNING, M. P.; SHIKIDA, P. F. A.; GARCIAS, M. O. Perdas na colheita de soja na região oeste do Paraná. **Revista Tecnologia e Sociedade**, [s. l.], v. 15, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3895/rts.v15n38.8651>

ROSA, J. C. S.; SOUZA, B. A.; SÁNCHEZ, L. E. Identification of ecosystem services in forest areas through remote sensing. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, [s. l.], v. 53, p. 276–295, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5380/dma.v53i0.62669>

ROSA, J.; MORRISON-SAUNDERS, A. HUGHES, M.; SÁNCHEZ, L. E. Planning mine restoration through ecosystem services to enhance community engagement and deliver social benefits. **Restoration Ecology**, [s. l.], v. 28, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/rec.13162>

ROSSATO, M. S. Os climas do Rio Grande do Sul: uma proposta de classificação climática. **Entre-lugar**, 11(22), 57-85. 2020. DOI: <https://doi.org/10.30612/el.v11i22.12781>

SANTOS, E. P.; PIROLI, E. L. Detecção de mudanças no uso e cobertura da terra utilizando Land Change Modeler: o caso da bacia hidrográfica do Ribeirão do Rebojo, Pontal do Paranapanema, SP, Brasil. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE, [s. l.], n. 1, p. 1391–1398, 2015.

SANTOS, V. M.; ANDRADE, L. C.; TIECHER, T.; CAMARGO, F. A. O. The Urban Pressure Over the Sediment Contamination in a Southern Brazil Metropolis: the Case of Diluvio Stream. **Water, Air, & Soil Pollution**, [s. l.], v. 231, n. 4, p. 156, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04504-2>

SÃO PAULO. Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente, Instituto Florestal. **Serviços Ecológicos e Bem-Estar Humano na Reserva da Biosfera do Cinturão verde da Cidade de São Paulo**. / Editores: Elaine Aparecida Rodrigues, Rodrigo Antonio Braga Moraes Victor, Bely Clemente Camacho Pires, Edgar Fernando de Luca. -- São Paulo: Instituto Florestal, 2020. 608p.

SCHINDLER, D. E. *et al.* Population diversity and the portfolio effect in an exploited species. **Nature**, [s. l.], v. 465, n. 7298, p. 609–612, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature09060>

SELLE, L. G. Ciclagem de nutrientes em ecossistemas florestais. **Bioscience Journal [online]**, vol. 23, no. 4. 2007. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/6912>. Acesso em: 06 Nov 2022.

SEMA. Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Base Cartográfica do Estado do Rio Grande do Sul, escala 1:25.000 – BCRS25. Versão 1.0 – 2018. Porto Alegre, 2018.

SILVA, R.F.B., VIÑA, A., MORAN, E.F. *et al.* Socioeconomic and environmental effects of soybean production in metacoupled systems. **Sci Rep** 11, 18662. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98256-6>

SILVEIRA, J. M.; CONTE, O. Determinação de perdas na colheita de soja: copo medidor da Embrapa. 1. ed. Embrapa: Embrapa Soja, 2013. 28 p. v. 1. E-book.

SOARES-FILHO, B., PENNACHIN, C., CERQUEIRA, G. Dinamica - a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. **Ecological Modelling**. 154, 217-235. 2002.

SOARES-FILHO, BS; RODRIGUES, H.; COSTA, W. Modeling Environmental Dynamics with Dinamica EGO. Centro de Sensoriamento Remoto (IGC/UFMG) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil. 2009. Disponível em: http://www.csr.ufmg.br/dinamica/tutorial/Dinamica_EGO_guidebook.pdf, Acesso em 09 Mai 2021.

SOUZA, C.M., JR.; Z. SHIMBO, J.; ROSA, M.R.; PARENTE, L.L.; A. *et al.* Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sens**. 2020, 12, 2735. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12172735>

SOUZA, J. A.; DAVIDE, A. C. Deposição de serrapilheira e nutrientes em uma mata não minerada e em plantações de bracatinga (*Mimosa scabrella*) e de eucalipto (*Eucalyptus saligna*) em áreas de mineração de bauxita. **Rev. Cerne**, Lavras, v. 7, n. 1, p. 101-113. 2001.

SPGG/DEE. Departamento de Economia e Estatística da Secretaria de Planejamento, Orçamento e Gestão. **Banco de dados**. 2022. Disponível em: <http://deedados.planejamento.rs.gov.br/feedados/>. Acesso em: 09 Mai 2022.

STRECK, E. V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. ver. ampl. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR, 2008. 222 p.

SUERTEGARAY, D. M. A.; SILVA, L. A. P. Tchê Pampa: histórias da natureza gaúcha. In: PILLAR, V. P.; Müller, S. C.; Castilhos, Z. M. De S.; Jacques, A. V. A. (Eds.). **Campos Sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: MMA, 2009. p. 42-59.

SUMMERS, J. K.; SMITH, L. M.; CASE, J. L.; LINTHURST, R. A. A Review of the Elements of Human Well-Being with an Emphasis on the Contribution of Ecosystem Services. **AMBIO**, v. 41, n. 4, p. 327–340, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-012-0256-7>

TEEB. **Mainstreaming the Economics of Nature: A Synthesis of the Approach, Conclusions and Recommendations of TEEB Earthscan**. London and Washington, 2010.

TEJEIRO, G.; STANTON, M. **Sistemas Estaduais de Pagamento por Serviços Ambientais: Diagnóstico, lições aprendidas e desafios para a futura legislação**.

Paula Lavratti (org.) São Paulo: Instituto O Direito por um Planeta Verde, 2014; 157p.

TOLEDO, P. M.; VIEIRA, C. G. Antropoceno - o desafio de um novo campo científico interdisciplinar. In: VASCONCELOS, S. S.; RUIVO, M. L. P.; LIMA, A. M. M. (org). **Amazônia em tempo: impactos do uso da terra em diferentes escalas**. Belém: Universidade Federal do Pará: Museu Paraense Emílio Goeldi: Embrapa Amazônia Oriental, 2017. 504 p.

TORNQUIST, C. G.; BAYER, C. **Serviços ambientais: oportunidades para a conservação dos Campos Sulinos**. In: Campos Sulinos - conservação e uso sustentável da biodiversidade / Valério De Patta Pillar [et al.]. Editores. Brasília: MMA, 2009. 403 p.

TRENTIN, R.; LAURENT, F.; ROBAINA, L. E.S. O impacto do uso da terra sobre o balanço hídrico na bacia hidrográfica do rio Santa Maria –oeste do Rio Grande do Sul –Brasil. v. 17 n. 1. Edição Especial: Transição agrícola e ambiental do meio rural brasileiro. **Revista Para Onde!?** pp. 70-88. 2023. DOI: <https://doi.org/10.22456/1982-0003.129906>

TURKELBOOM, F.; THOONEN, M.; JACOBS, S.; GARCIA LLORENTE, M.; MARTÍN-LÓPEZ, B.; BERRY, P. Ecosystem services trade-offs and synergies. [s. l.], 2016. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4882.9529>

USDA. UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Foreign Agricultural Service**. Oilseeds: World markets and trade. 2022. Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/data/oilseeds-world-markets-and-trade>. Acesso em: 30 Mai 2022.

VANDEWALLE, M.; SYKES, M.T.; HARRISON, P.A.; LUCK, G.W. *et al.* Review paper on concepts of dynamic ecosystems and their services. **The Rubicode Project**. Rationalising Biodiversity Conservation in Dynamic Ecosystems 2009. Disponível em: http://www.rubicode.net/rubicode/RUBICODE_Review_on_Ecosystem_Services.pdf. Acesso em 19 Mai 2022.

VASCONCELOS, S. S.; RUIVO, M. L. P.; LIMA, A. M. M. As Ciências Ambientais e os impactos do uso da terra em diferentes escalas. In: VASCONCELOS, S. S.; RUIVO, M. L. P.; LIMA, A. M. M. (org). **Amazônia em tempo: impactos do uso da terra em diferentes escalas**. Belém: Universidade Federal do Pará: Museu Paraense Emílio Goeldi: Embrapa Amazônia Oriental, 2017. 504 p.

VIÉGAS, V.S.; CRUZ, C. B. M.; SOUZA, E. M. F. R. Autômatos celulares no contexto da modelagem dinâmica: desafios da modelagem de espaços urbanos. **Geography Department University of Sao Paulo**, [s. l.], v. 41, p. e181171, 2021. DOI: <https://doi.org/10.11606/eissn.2236-2878.rdg.2021.181171>

VIEIRA JÚNIOR, N. A.; SILVA, M. A. A. E.; CARAMORI, P. H.; NITSCHKE, P. R.; CORREA, K. A. B.; ALVES, D. S. Temperature, thermal comfort, and animal ingestion behavior in a silvopastoral system. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 40, p. 403-416, 2019. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n1p403>

WEBER, E.J.; HOFMANN, G.S.; OLIVEIRA, C.V.; HASENACK, H. **Uso e cobertura vegetal do Estado do Rio Grande do Sul – situação em 2009**. Porto Alegre: UFRGS IB Centro de Ecologia, 2016. 1a ed. ISBN 978-85-63843-20-3.

WENZEL, F. Agrotóxico da soja leva prejuízos às plantações de uva no RS. Folha de São Paulo, 2018. Disponível em <https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2018/07/agrotoxico-da-soja-leva-prejuizos-as-plantacoes-de-uva-no-rs.shtml>. Acesso em: 07 Fev 2023.

WESTMAN, W.E. How much are nature's services worth? *Science*, [s. l.], v. 197, n. 4307, p. 960–964, 1977. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.197.4307.960>

WINK, C.; REINERT, D. J.; TORNQUIST, C. G.; SILVA, I. R. Dinâmica do Carbono e Nitrogênio em Plantações de Eucalipto no Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 39(6), 1623-1632. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683RBCS20140182>

WOLDEYOHANNES, A.; COTTER, M.; BIRU, W.D.; KELBORO, G. Assessing Changes in Ecosystem Service Values over. *Land*, [s. l.], v. 9, p. 37, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/land9020037>

WUNDER, S. **Pagamentos por serviços ambientais**: perspectivas para a Amazônia Legal / Sven Wunder, Coordenador; Jan Börner, Marcos Rüginitz Tito e Lígia Pereira. – 2ª ed., rev. – Brasília: MMA, 2009. 144 p.

WUNDER, S. **Payments for environmental services**: Some nuts and bolts. CIFOR Occasional Paper No.42. Bogor: CIFOR. 2005.

XIE, G.; ZHANG, C.; ZHEN, L.; ZHANG, L. Dynamic changes in the value of China's ecosystem services. *Ecosystem Services*, [s. l.], v. 26, p. 146–154, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.06.010>

YORK, R.; GOSSARD, M. H. Cross-national meat and fish consumption: Exploring the effects of modernization and ecological context. *Ecol. Econ.* 48, 293–302. 2004.

ZHANG, B.; LI, W.; XIE, G. Ecosystem services research in China: Progress and perspective. *Ecological Economics*, [s. l.], v. 69, n. 7, p. 1389–1395, 2010. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.03.009>

7 APÊNDICE

Apêndice I - Distribuição dos valores (US\$) por serviço ecossistêmico, classe e ano.

Classe	Ano	Serviços ecossistêmicos																
		Regulação de gás	Regulação do clima	Regulação de distúrbios	Regulação da água	Suprimento de água	Controle da erosão e retenção sedimentar	Formação do solo	Ciclagem de nutrientes	Tratamento de resíduos	Polinização	Controle biológico	Habitat/ Refúgio	Produção de alimentos	Matéria prima	Recursos genéticos	Recreação	Cultural
Arroz	2050	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.671.888,00	2.866.093,00	-	6.448.709,00	-	-	-	-
	2030	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.244.045,00	2.132.648,00	-	4.798.458,00	-	-	-	-
	2020	-	-	-	-	-	-	-	-	-	974.560,00	1.670.674,00	-	3.759.018,00	-	-	-	-
	1985	-	-	-	-	-	-	-	-	-	570.092,00	977.301,00	-	2.198.927,00	-	-	-	-
Campo Alagado e Área Pantanosa	2050	3.186.192,00		108.737.791,00	359.345,00	91.034.062,00				100.065.599,00			7.282.725,00	6.132.821,00	2.539.371,00		13.750.935,00	21.105.529,00
	2030	3.187.869,00		108.795.004,00	359.534,00	91.081.960,00				100.118.249,00			7.286.557,00	6.136.048,00	2.540.707,00		13.758.170,00	21.116.633,00
	2020	3.187.901,00		108.796.118,00	359.538,00	91.082.893,00				100.119.274,00			7.286.631,00	6.136.111,00	2.540.733,00		13.758.311,00	21.116.850,00
	1985	2.391.181,00		81.605.780,00	269.682,00	68.319.445,00				75.097.453,00			5.465.556,00	4.602.573,00	1.905.753,00		10.319.832,00	15.839.324,00
Formação Campestre	2050	392.284,00			168.122,00		1.625.177,00	56.041,00	-	4.875.531,00	1.401.015,00	1.288.933,00		3.754.719,00		-	112.081,00	
	2030	769.616,00			329.835,00		3.188.409,00	109.945,00	-	9.565.228,00	2.748.629,00	2.528.738,00		7.366.325,00		-	219.890,00	
	2020	1.076.818,00			461.494,00		4.461.104,00	153.831,00	-	13.383.312,00	3.845.779,00	3.538.117,00		10.306.689,00		-	307.662,00	
	1985	1.682.115,00			720.906,00		6.968.760,00	240.302,00	-	20.906.281,00	6.007.552,00	5.526.948,00		16.100.239,00		-	480.604,00	
Formação Florestal	2050		42.680.549,00	956.963,00	1.148.356,00	1.531.141,00	46.891.186,00	1.913.926,00	176.463.973,00	16.651.156,00				6.124.563,00	60.288.668,00	7.847.096,00	21.435.971,00	382.785,00
	2030		42.645.381,00	956.174,00	1.147.409,00	1.529.879,00	46.852.548,00	1.912.349,00	176.318.570,00	16.637.436,00				6.119.517,00	60.238.991,00	7.840.631,00	21.418.308,00	382.470,00
	2020		41.512.555,00	930.775,00	1.116.930,00	1.489.240,00	45.607.965,00	1.861.550,00	171.634.871,00	16.195.481,00				5.956.959,00	58.638.812,00	7.632.353,00	20.849.355,00	372.310,00
	1985		35.307.034,00	791.638,00	949.965,00	1.266.620,00	38.790.239,00	1.583.275,00	145.977.960,00	13.774.493,00				5.066.480,00	49.873.164,00	6.491.428,00	17.732.681,00	316.655,00
Mosaico de Agricultura e Pastagem	2050										891.780,00	1.528.765,00		3.439.721,00				
	2030										1.012.216,00	1.735.227,00		3.904.261,00				
	2020										989.307,00	1.695.955,00		3.815.898,00				
	1985										1.210.236,00	2.074.691,00		4.668.054,00				
Outras Lavouras Temporárias	2050										23.238,00	39.836,00		89.631,00				
	2030										37.533,00	64.343,00		144.771,00				
	2020										613.777,00	1.052.190,00		2.367.427,00				
	1985										949.809,00	1.628.244,00		3.663.550,00				
Praia, Duna e Areal	2050			5.452,00						227.797,00		2.354,00	496,00	5.762,00	248,00		5.080,00	3.841,00
	2030			5.452,00						227.797,00		2.354,00	496,00	5.762,00	248,00		5.080,00	3.841,00
	2020			6.436,00						268.943,00		2.779,00	585,00	6.802,00	293,00		5.998,00	4.535,00
	1985			9.198,00						384.313,00		3.972,00	836,00	9.720,00	418,00		8.570,00	6.480,00
Rio e Lago	2050				861.136.115,00	334.807.191,00				105.170.894,00				6.484.221,00			36.374.896,00	
	2030				861.213.162,00	334.837.147,00				105.180.304,00				6.484.801,00			36.378.150,00	
	2020				861.213.162,00	334.837.147,00				105.180.304,00				6.484.801,00			36.378.150,00	
	1985				864.048.483,00	335.939.511,00				105.526.582,00				6.506.150,00			36.497.916,00	
Silvicultura	2050		7.052.714,00					801.445,00		6.972.570,00		320.578,00		4.007.224,00	2.003.612,00		2.885.201,00	160.289,00
	2030		5.936.776,00					674.634,00		5.869.313,00		269.853,00		3.373.168,00	1.686.584,00		2.428.681,00	134.927,00
	2020		5.389.046,00					612.392,00		5.327.806,00		244.957,00		3.061.958,00	1.530.979,00		2.204.610,00	122.478,00
	1985		2.375.888,00					269.987,00		2.348.889,00		107.995,00		1.349.936,00	674.968,00		971.954,00	53.997,00
Soja	2050										1.150.207,00	1.971.783,00		4.436.511,00				
	2030										930.855,00	1.595.751,00		3.590.440,00				
	2020										229.852,00	394.032,00		886.572,00				
	1985										-	-		-				