

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos



Dissertação

**Avaliação Espaço-Temporal da Qualidade da água e do Estado Trófico no
Reservatório Chasqueiro e na Bacia Hidrográfica Lagoa Mirim**

Laura Martins Bueno

Pelotas, 2025.

Laura Martins Bueno

**Avaliação Espaço-Temporal da Qualidade da água e do Estado Trófico no
Reservatório Chasqueiro e na Bacia Hidrográfica Lagoa Mirim**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos.

Orientador: Professor Dr. Felipe de Lucia Lobo
Coorientador: Professor Dr. Gilberto Loguercio Collares

Pelotas, 2025.

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação da Publicação

B928a Bueno, Laura Martins

Avaliação espaço-temporal da qualidade da água e do estado trófico no Reservatório Chasqueiro e na Bacia Hidrográfica Lagoa Mirim [recurso eletrônico] / Laura Martins Bueno ; Felipe de Lucia Lobo, orientador ; Gilberto Loguercio Collares, coorientador. — Pelotas, 2025. 88 f.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2025.

1. Clorofila-a. 2. Regime de irrigação. 3. Sensoriamento remoto. 4. AlgaeMAP. I. Lobo, Felipe de Lucia, orient. II. Collares, Gilberto Loguercio, coorient. III. Título.

CDD 627

Laura Martins Bueno

Avaliação Espaço-Temporal da Qualidade da água e do Estado Trófico no
Reservatório Chasqueiro e na Bacia Hidrográfica Lagoa Mirim

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 06 de março de 2025

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Felipe de Lucia Lobo (Orientador)

Doutor em Geografia pela University of Victoria, 2015.

Prof. Dr. Gilberto Loguercio Collares (Coorientador)

Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Santa Maria, 2004.

Prof^a. Dr^a. Karina Kammer Attisano

Doutora em Oceanografia Biológica pela Universidade Federal do Rio Grande (FURG), 2012.

Dr^a. Luciana Shigihara Lima

Doutora em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2023.

Dedico esse trabalho aos meus pais.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus e todo plano espiritual que sempre me protegeu e amparou.

Ao meu orientador, professor Felipe de Lucia Lobo, pela disponibilidade em transmitir seus conhecimentos, me apoiando e escutando do início ao fim do trabalho.

Agradeço também ao meu coorientador, professor Gilberto Loguercio Collares, pelo apoio enquanto gestor da Agência Lagoa Mirim por ter disponibilizado a logística necessária para as análises, e colaborado de forma essencial para o desenvolvimento geral da dissertação.

Ao técnico Reginaldo pelo apoio em todas coletas de amostras.

Agradeço às técnicas do laboratório da Agência Lagoa Mirim, Marília Guidotti, Francine Viana e Erika Matte, pelos ensinamentos na parte laboratorial e paciência em compartilhar seus conhecimentos.

Aos professores do PPG Recursos Hídricos pela contribuição na minha formação.

À minha família, especialmente meus pais, Enilda Bueno e Jorge Bueno, que sempre me apoiaram na minha jornada acadêmica e pessoal.

Ao meu namorado, Eduardo Santana, pelo companheirismo, incentivo e ser meu porto seguro.

As minhas amigas, Bruna Moura, Aline Simões, Ingridy Duarte, Julia Borges, Catarina Lobato e Helena Lima Castro, que tornaram essa trajetória mais leve e alegre com seu suporte e amizade.

Resumo

BUENO, Laura Martins. **Avaliação Espaço-Temporal da Qualidade da água e do Estado Trófico no Reservatório Chasqueiro e na Bacia Hidrográfica Lagoa Mirim**. 2025. 88f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2025.

A Bacia Hidrográfica Lagoa Mirim destaca-se como uma das principais regiões transfronteiriças da América do Sul, exercendo papel estratégico no abastecimento de água potável, na produção pecuária, na atividade industrial e na irrigação agrícola, com ênfase no cultivo de arroz. Diante disso, os objetivos do estudo consistem em avaliar a qualidade da água do Reservatório Chasqueiro por meio de coletas *in situ* e da validação do aplicativo AlgaeMAp, visando analisar o comportamento da clorofila-a e compreender as variações sazonais associadas à atividade agrícola, bem como apresentar uma análise espaço-temporal da qualidade da água de alguns corpos hídricos da bacia, de forma a mapear os índices tróficos e identificar as influências do uso intensivo da água para irrigação. Além disso, realizou-se análise da dinâmica do estado trófico de 30 corpos hídricos da Bacia Hidrográfica Lagoa Mirim. Os resultados demonstram que os parâmetros de qualidade da água do Reservatório Chasqueiro apresentam, em parte, valores compatíveis com os limites estabelecidos pelo CONAMA 357/2005 e, em parte, variações significativas, além de evidenciar correlações que indicam a influência do regime de irrigação no reservatório. Enquanto a análise espaço-temporal da Bacia Hidrográfica Lagoa Mirim revela que os corpos hídricos, tanto do lado brasileiro quanto do lado uruguaio, manifestam características predominantemente eutróficas, não apresentando padrão sazonal, o que indica que fatores locais, incluindo uso do solo, práticas agrícolas e características hidrodinâmicas exercem influência determinante em cada reservatório, o que reforça a necessidade de um monitoramento contínuo e detalhado para identificar os principais agentes de degradação e orientar a elaboração de estratégias de manejo e conservação mais eficazes.

Palavras-chave: Clorofila-a. Regime de irrigação. Sensoriamento remoto. AlgaeMAp.

Abstract

BUENO, Laura Martins. **Spatiotemporal Assessment of Water Quality and Trophic Status: Remote Sensing Applications in the Chasqueiro Reservoir and the Lagoa Mirim Watershed**. 2025. 88f. Dissertation (Master Degree em Recursos Hídricos) - Graduate Program in Water Resources, Center for Technological Development, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2025.

The Lagoa Mirim Watershed stands out as one of the main transboundary regions in South America, playing a strategic role in potable water supply, livestock production, industrial activity, and agricultural irrigation, with an emphasis on rice cultivation. In this context, the objectives of the study are to evaluate the water quality of the Chasqueiro Reservoir through in situ collections and validation of the AlgaeMap application, aiming to analyze chlorophyll-a behavior and understand the seasonal variations associated with agricultural activity, as well as provide a spatiotemporal analysis of the water quality of several water bodies in the basin, in order to map trophic indices and identify the influences of intensive water use for irrigation. Furthermore, an analysis of the trophic state dynamics of 30 water bodies in the Lagoa Mirim Watershed was conducted. The results show that the water quality parameters of the Chasqueiro Reservoir are, in part, within the limits established by CONAMA Resolution 357/2005, while also showing significant variations, and reveal correlations indicating the influence of the irrigation regime in the reservoir. Meanwhile, the spatiotemporal analysis of the Lagoa Mirim Watershed reveals that water bodies, both on the Brazilian and Uruguayan sides, predominantly exhibit eutrophic characteristics, with no clear seasonal pattern, suggesting that local factors, including land use, agricultural practices, and hydrodynamic characteristics, play a decisive role in each reservoir. This emphasizes the need for continuous and detailed monitoring to identify the main degradation agents and guide the development of more effective management and conservation strategies.

Keywords: Chlorophyll-a. Irrigation regime. Remote sensing. AlgaeMAP.

Lista de Figuras

Figura 1. Fluxograma dos métodos incluindo processamento de imagem e calibração/validação de algoritmos para derivar os produtos implementados no aplicativo GEE.....	26
Figura 2. Limiares de concentração de clorofila-a para classificação do estado trófico de acordo com a CETESB. **Para a pesquisa, foi considerada a condição de florescimento de algas.....	27
Figura 3. Bacia Hidrográfica Lagoa Mirim.....	29
Figura 4. Mapa de Uso e Cobertura de Solo na Bacia Hidrográfica Lagoa Mirim.....	30
Figura 5. Vista aérea do reservatório da barragem do Chasqueiro.....	31
Figura 6. Uso e cobertura de solo da bacia hidrográfica do Arroio Chasqueiro.....	32
Figura 7. Área plantada ou destinada à colheita em hectares no Rio Grande do Sul no ano de 2023.....	34
Figura 8. Ranking da Agricultura e Valor de Produção no Rio Grande do Sul.....	35
Figura 9. Fluxograma da metodologia, considerando objetivos 1, 2 e 3.....	36
Figura 10. Bacia Hidrográfica Lagoa Mirim e seus corpos hídricos.....	37
Figura 11 . Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Arroio Chasqueiro.....	38
Figura 12. Distrito de Irrigação Arroio Chasqueiro.....	39
Figura 13. Mapa de distribuição dos pontos de coleta no reservatório Chasqueiro..	40
Figura 14. (a) Frascos de amostragem (b) Embarcação (c) Coleta de amostras.....	42
Figura 15. (a) Kit filtragem clorofila-a (b) Filtragem de 500mL por duplicata (c) Análise Método Espectrofotométrico.....	43
Figura 16. (a) NTK na digestão (b) Fósforo pré digestão (c) Análise fósforo após digestão.....	44
Figura 17. Seleção de Pixels para Estimativa da Clorofila-a no Corpo Hídrico.....	45
Figura 18. Método para Geração de Séries Temporais e Gráficos do Índice de Estado Trófico no GEE.....	48
Figura 19. Média por coleta da concentração de: (a) Clorofila-a, (b) Sólidos em	

Suspensão, (c) Oxigênio Dissolvido (OD), (d) Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK), (e) Fósforo total, (f) pH, (g) Turbidez.....	54
Figura 20. Relação nível da água (m) e precipitação total mensal.....	56
Figura 21. Clorofila-a mensurada VS Clorofila-a estimada AlgaeMAp.....	57
Figura 22. Relação entre a clorofila-a estimada pela plataforma AlgaeMAp e clorofila-a calculada para reservatório Chasqueiro, com indicadores de ajuste do modelo.....	58
Figura 23. Correlação de Spearman entre parâmetros de qualidade da água analisados.....	62
Figura 24. Concentração espacial de clorofila-a no reservatório Chasqueiro nas respectivas datas de coletas.....	65
Figura 25. Área Relativa do Índice de Estado Trófico no Reservatório Chasqueiro: Análise de 2018 a 2024.....	68
Figura 27. Resultado do índice de estado trófico dos 15 corpos hídricos brasileiros supracitados entre 2018 e 2024.....	72
Figura 28. Mapa de localização dos 15 corpos hídricos uruguaios selecionados para análise do índice de estado trófico.....	75
Figura 29. Resultado do índice de estado trófico dos 15 corpos hídricos uruguaios supracitados.....	77

Lista de Tabelas

Tabela 1. Parâmetros de qualidade da água, sua origem e importância.....	21
Tabela 2. Metodologias analisadas para os parâmetros utilizados neste estudo, com suas respectivas referências.....	42
Tabela 3. Data de coletas com respectivos pontos e coordenadas geográficas.....	50
Tabela 4. Resultados dos parâmetros de qualidade da água analisados.....	51
Tabela 5. Comparação do Índice de Estado Trófico Medido e Estimado: Estatísticas de Kappa, Acurácia Global e Qui-Quadrado.....	59
Tabela 6. Teste Mann-Whitney.....	60
Tabela 7. Caracterização de corpos hídricos do lado brasileiro.....	71
Tabela 8. Caracterização de corpos hídricos do lado uruguaio.....	76

Lista de Siglas

ALM Agência Lagoa Mirim

BHAC Bacia Hidrográfica Arroio Chasqueiro

BHLM Bacia Hidrográfica Lagoa Mirim

CDOM Matéria Orgânica Dissolvida

Chl-a Clorofila-a

COODIC Cooperativa dos Proprietários do Distrito de Irrigação da Barragem do Arroio Chasqueiro Ltda.

GEE Google Earth Engine

IET Índice de Estado Trófico

NTK Nitrogênio Total Kjeldahl

OD Oxigênio Dissolvido

SST Sólidos Suspensos Totais

SUMÁRIO

1. Introdução.....	14
2. Objetivos.....	17
2.1. Geral.....	17
2.2. Específicos.....	17
3. Hipóteses.....	18
4. Revisão de Literatura.....	19
4.1. Qualidade da água.....	19
4.1.1. Clorofila-a.....	21
4.1.2. Resolução CONAMA 357/2005.....	22
4.2. Sensoriamento e qualidade da água.....	23
4.2.1. AlgaeMAp.....	26
4.3. Bacia Hidrográfica Lagoa Mirim.....	28
4.3.1. Barragem do Chasqueiro.....	31
4.4. Agricultura irrigada.....	33
5. Materiais e métodos.....	36
5.1. Área de estudo.....	36
5.2. Levantamento de dados de campo.....	39
5.3. Análises Laboratoriais.....	42
5.4. Integração dos dados de campo e de sensoriamento remoto.....	44
5.5. Aplicação da análise trófica para a BHLM.....	47
6. Resultados e discussão.....	49
6.1. Parâmetros de qualidade da água.....	49
6.2. Validação AlgaeMAp.....	57
6.3. Análises estatísticas.....	60
6.4. Resultados AlgaeMAp.....	64
6.5. Bacia Hidrográfica Lagoa Mirim.....	70
7. Conclusões.....	80

8. Referências.....	81
----------------------------	-----------

1. Introdução

A qualidade da água é representada pelo conjunto de características físicas, químicas e biológicas. Os padrões de classificação indicam a segurança para usos múltiplos e são de extrema importância para definir um conjunto de critérios e normas para determinação da qualidade da água em reservatórios, que irão variar com sua finalidade. Avaliar e monitorar a qualidade da água de um corpo hídrico exige estudo amplo, considerando características físicas, químicas e biológicas com intuito de identificar causas da poluição e quantificar níveis de contaminação, para possível alerta à saúde pública e dos recursos hídricos (PU *et al.*, 2019 e LOPES, 2019). A Resolução nº 357 do CONAMA (2005) estabelece a classificação dos corpos d'água, essencial para avaliar a qualidade das águas brasileiras e subsidiar o monitoramento da contaminação de águas superficiais. Essa padronização é crucial para a conservação e gestão sustentável dos recursos hídricos, garantindo o uso adequado e a proteção dos ecossistemas aquáticos.

Uma das principais ameaças enfrentadas pelos ecossistemas aquáticos é a eutrofização, que ocorre devido à poluição pelo aumento da contribuição de matéria orgânica e nutrientes, que causam o afloramento de algas no corpo hídrico. A quantificação dessas proliferações de fitoplâncton é frequentemente realizada por meio da medição de concentração de clorofila-*a* (Chl-*a*) que atuam como regulador da taxa de produtividade primária em corpos hídricos, sendo que sua variação temporal e espacial pode afetar a ciclagem biogeoquímica de elementos como carbono, nitrogênio, fósforo, oxigênio e enxofre (German *et al.*, 2021; Caballero e Navarro, 2021).

O tradicional monitoramento *in situ* e análises laboratoriais, requerem muito trabalho e tempo e, como resultado, limita as escalas em que as amostras são coletadas (Ferral *et al.*, 2017). Além disso, durante as florações, quando a distribuição espacial da biomassa do fitoplâncton é elevada, a amostragem convencional de água é insuficiente para determinar onde e como as algas se espalham.

Diante disso, o sensoriamento remoto óptico tem se destacado como uma ferramenta eficiente para monitoramento espaço-temporal, graças à sua ampla cobertura espacial, alta frequência de aquisição de dados e acesso a informações gratuitas. Esse recurso representa uma alternativa valiosa ao monitoramento convencional, possibilitando a análise contínua e em larga escala, e

complementando as abordagens *in situ* (PALMER *et al.*, 2015; FASSONI-ANDRADE *et al.*, 2017). Vale ressaltar que o sensoriamento remoto não substitui, mas aprimora as análises tradicionais, oferecendo uma compreensão mais detalhada das dinâmicas dos ecossistemas (OGASHAWARA *et al.*, 2021). De acordo com Valério (2009), o sensoriamento remoto surge como maneira de agregar ao método tradicional de análises de água, tornando-se mais rápidas e de menor custo, proporcionando redução de limitações espaciais dos monitoramentos e banco de dados.

Nesse contexto, o sensoriamento remoto tem sido amplamente aplicado ao monitoramento de águas interiores, costeiras e estuarinas ao redor do mundo. Mishra *et al.*, (2012) propuseram o Índice Normalizado de Clorofila-a (NDCI), uma ferramenta eficaz para quantificar a concentração de clorofila-a em corpos d'água. A partir do NDCI e das imagens do sensor Sentinel-2, foi desenvolvida a plataforma AlgaeMAP, que permite estimar a qualidade da água, analisando a concentração de clorofila-a (Chl-a) e o Índice de Estado Trófico (IET) ao longo do tempo. A plataforma tem sido aplicada em diversos corpos d'água no Brasil e na América do Sul, proporcionando dados valiosos para a gestão ambiental (LOBO *et al.*, 2021).

A agricultura irrigada é essencial para o desenvolvimento agrícola, sendo responsável por aproximadamente 40% da produção mundial, embora ocupe apenas 18% da área cultivada (BROWN; RENNER; HALWEIL, 2000). Essa dependência reflete a importância tanto da quantidade quanto da qualidade da água disponível. A longo prazo, a qualidade da água se torna um dos fatores mais críticos para a eficiência da irrigação e para a sustentabilidade das áreas agrícolas (AYERS & WESTCOT, 1999). Práticas inadequadas de manejo, como o uso excessivo de fertilizantes, contribuem para a degradação das águas superficiais, promovendo o transporte de nutrientes como fósforo e nitrogênio para os corpos hídricos, o que eleva as concentrações desses elementos e impacta negativamente a qualidade da água (MENEZES *et al.*, 2016).

Apesar de a agricultura irrigada ser uma das maiores responsáveis pelo consumo de mananciais no Brasil (ANA, 2024), há poucos estudos que investigam a qualidade da água na Bacia Hidrográfica da Lagoa Mirim. Esta bacia, composta por importantes cursos d'água que deságuam na Lagoa Mirim e São Gonçalo, é de grande relevância para a irrigação na região e demanda uma análise aprofundada

da relação entre a irrigação e a qualidade da água (FERNANDES *et al.*, 2021; OLIVEIRA *et al.*, 2015).

A Bacia Hidrográfica Lagoa Mirim é uma das principais bacias transfronteiriças da América do Sul, com relevância ecológica e econômica. A região desempenha um papel essencial no abastecimento de água potável, pecuária, indústria e irrigação agrícola, com ênfase na produção de arroz irrigado.

O presente estudo concentra-se em duas áreas específicas: a bacia hidrográfica como um todo, englobando diversos corpos hídricos, e o reservatório Chasqueiro, um relevante afluente da região, que se destaca pela sua importância no fornecimento de água para a irrigação e ao abastecimento de água potável para a população que reside na cidade de Arroio Grande, no estado do Rio Grande do Sul (COODIC, 2023; VIDAL *et al.*, 2021).

2. Objetivos

2.1. Geral

Avaliar a qualidade da água do Reservatório Chasqueiro por meio da validação do aplicativo AlgaeMAp. A partir de uma validação robusta, será possível realizar uma análise espaço-temporal das condições tróficas em corpos hídricos localizados na Bacia Hidrográfica Mirim-São Gonçalo, abrangendo o período de janeiro de 2018 a dezembro de 2024.

2.2. Específicos

- I. Validar o aplicativo AlgaeMAp a partir de dados obtidos *in situ* e avaliar espacialmente o comportamento da clorofila-*a* e estado trófico do Reservatório Chasqueiro.
- II. Analisar variáveis relacionadas à quantidade e qualidade da água, para compreender variações sazonais da agricultura no Reservatório Chasqueiro, proporcionando conhecimento sobre dinâmica hídrica e possíveis impactos na saúde dos ecossistemas.
- III. Apresentar análise espaço-temporal da qualidade da água de corpos hídricos da Bacia Hidrográfica Lagoa Mirim, utilizando ferramentas de sensoriamento remoto.

3. Hipóteses

A qualidade da água no Reservatório Chasqueiro é influenciada pelo regime de irrigação, sendo que a redução do volume de água, associada ao aumento da eutrofização, é mais pronunciada entre os meses de outubro a março, período em que ocorre a retirada de água para irrigação.

4. Revisão de Literatura

4.1. Qualidade da água

A água é um recurso natural indispensável para a sobrevivência e o desenvolvimento da vida terrestre. Contudo, sua disponibilidade e qualidade têm sido comprometidas devido a uma série de alterações que afetam tanto seus aspectos físicos quanto químicos (Naveedullah *et al.*, 2016).

Conforme Braga *et al.* (2015), as mudanças nos recursos hídricos decorrem de fatores naturais, como intemperismo e transporte de sedimentos, e de ações antrópicas, incluindo o uso intensivo de água, o despejo de efluentes industriais e domésticos, além do avanço das atividades agropecuárias, impulsionadas pelo crescimento populacional e urbano. Esses fatores tornam a qualidade da água um reflexo direto das dinâmicas de uso e ocupação do solo (Barbosa *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2020).

No contexto agrícola, práticas de manejo inadequadas intensificam a degradação das águas superficiais em bacias hidrográficas. O uso de fertilizantes, por exemplo, contribui para o transporte de nutrientes como fósforo e nitrogênio aos corpos hídricos, por meio do escoamento superficial, elevando as concentrações desses elementos e impactando a qualidade da água (Menezes *et al.*, 2016).

Para compreender os impactos sobre os recursos hídricos, é fundamental analisar as variações temporais e espaciais da qualidade da água, bem como os processos dinâmicos físicos, químicos e biológicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica e fornecer subsídios para o diagnóstico dos ecossistemas aquáticos, além de apoiar decisões estratégicas no gerenciamento dos recursos hídricos (ANA, 2024).

Tabela 1. Parâmetros de qualidade da água, sua origem e importância.

Parâmetro	Unidade	Origem		Importância do parâmetro	Passível monitoramento sensoriamento remoto
		Natural	Antrópica		
Nitrogênio total Kjeldahl (NTK)	mg/L	Decomposição da matéria orgânica, fixação biológica do nitrogênio, deposição atmosférica	Esgotos domésticos e industriais, fertilizantes, excrementos animais	Indicador da presença de compostos nitrogenados orgânicos e amoniacais, essenciais para avaliação da qualidade da água e processos de eutrofização	Não
Fósforo total	mg/L	Dissolução de compostos do solo, decomposição da matéria orgânica, fósforo de composição celular de microrganismos	Despejos domésticos e industriais, detergentes, excrementos de animais e fertilizantes	Nutriente essencial para crescimento dos microrganismos responsáveis pela estabilização da matéria orgânica	Sim
pH	pH	Dissolução de rochas, absorção de gases da atmosfera, oxidação da matéria orgânica, fotossíntese	Despejos domésticos e industriais	Afeta a vida aquática e os microrganismos responsáveis pelo tratamento biológico dos esgotos	Não
Turbidez	UNT	Partículas de rocha, argila e silte, algas e outros microrganismos	Despejo doméstico e industrial, microrganismos e erosão	Reduz penetração da luz, prejudicando a fotossíntese	Sim
Oxigênio Dissolvido (OD)	mg/L	Dissolução do oxigênio atmosférico e produção pelos organismos fotossintéticos	Introdução de aeração artificial e produção pelos organismos fotossintéticos em corpos d'água eutrofizados	Principal parâmetro de caracterização dos efeitos da poluição das águas por despejos orgânicos	Sim
Clorofila-a (Chl-a)	(µg/l)	Presente naturalmente em algas e plantas aquáticas, variando com sazonalidade e disponibilidade de nutrientes	Aumento devido à eutrofização por aporte de nutrientes de esgotos e fertilizantes	Pigmento predominante e está presente em todos os grupos vegetais, sendo a indicadora ideal da biomassa fitoplanctônica	Sim

Tabela 1. Parâmetros de qualidade da água, sua origem e importância.

Parâmetro	Unidade	Origem		Importância do parâmetro	Passível monitoramento sensorial remoto
		Natural	Antrópica		
Sólidos em suspensão	mg/L ou %	Erosão do solo, transporte de sedimentos, presença de matéria orgânica e organismos microscópicos	Despejos domésticos e industriais, escoamento superficial de áreas agrícolas e urbanas	Influencia a turbidez, reduzindo a penetração de luz e afetando a fotossíntese, além de servir como meio de transporte para poluentes e microrganismos	Sim

Fonte: Von Sperling (1996) e CETESB (2024).

Os parâmetros físico-químicos que determinam a qualidade da água em ambientes lânticos, como reservatórios, são influenciados por diversos fatores internos e externos ao corpo hídrico. Entre os principais elementos que afetam essas características estão os fatores climatológicos, como radiação solar, ventos e precipitação; os hidrológicos, incluindo vazão, intensidade e frequência das chuvas, além do tempo de retenção da água. As características morfométricas, como volume, profundidade máxima e média, e localização, também exercem influência, assim como os aspectos geomorfológicos, relacionados à forma, relevo, área, geologia, rede de drenagem e tipos de solo. Além disso, fatores antrópicos e a cobertura vegetal da bacia hidrográfica contribuem para essas variações (NOGUEIRA, 1991; STRASKRABA e TUNDISI, 2000; FRANZEN, 2009).

4.1.1. Clorofila-a

O termo clorofila refere-se a um grupo de pigmentos sintetizados nos cloroplastos presentes em folhas e outros tecidos fotossintéticos de plantas e microrganismos. Esses pigmentos, responsáveis pela coloração verde das plantas, atuam como receptores de luz visível utilizada no processo de fotossíntese (Streit *et al.*, 2005).

A clorofila-a destaca-se como a principal variável utilizada para indicar o estado trófico em ambientes aquáticos, por ser um composto fotossinteticamente ativo, capaz de converter luz em energia durante a fotossíntese (CETESB, 2023). Além disso, o conhecimento sobre a concentração e o tipo de fitoplâncton presentes

em corpos d'água possibilita avaliar a qualidade da água e potenciais riscos à saúde humana, considerando que alguns organismos fitoplanctônicos, como as cianobactérias, podem produzir substâncias tóxicas com efeitos prejudiciais à saúde (HANISCH e FREIRE-NORDI, 2015).

Nesse contexto, o mapeamento e o monitoramento da concentração, do tipo e das variações de chl-a em grandes corpos d'água são fundamentais para compreender questões relacionadas ao ciclo global do carbono, aos impactos das mudanças climáticas, aos processos hidrodinâmicos que influenciam o transporte de sedimentos, bem como às flutuações de biomassa fitoplanctônica e às taxas de produção primária nesses ecossistemas (YACOBI *et al.*, 2011).

Apesar de sua importância, as moléculas de clorofila não apresentam estabilidade permanente. Fatores ambientais, como variações de pH, temperatura ou exposição excessiva à luz, podem causar sua degradação, resultando na formação de compostos conhecidos como feopigmentos. Dentre esses compostos, a feofitina-a, produto da degradação da clorofila-a, pode causar interferências significativas nas medições do pigmento, devido à sua capacidade de absorver luz na mesma faixa espectral da clorofila-a (CETESB, 2023). Por isso, a necessidade de realizar, pelo menos, a filtragem em até 24 horas é fundamental para minimizar a degradação da clorofila-a e evitar interferências significativas nas medições, garantindo a precisão e a confiabilidade dos resultados.

4.1.2. Resolução CONAMA 357/2005

A resolução CONAMA nº 357/2005 apresenta um sistema de classificação da água baseado em parâmetros físicos, químicos e biológicos, com o objetivo de regulamentar seu uso e preservar suas condições naturais. Para águas doces de rios e lagos, a classificação abrange cinco categorias: especial, 1, 2, 3 e 4. Enquanto as classes seguem limites predefinidos para mais de 90 parâmetros, a classe especial exige a manutenção das condições naturais da água, independentemente de valores estabelecidos, com base nos usos previstos para o recurso (ANA, 2024).

O enquadramento dos corpos hídricos em classes de qualidade é realizado por meio de um processo participativo, envolvendo os conselhos de recursos hídricos em nível estadual ou federal, conforme a jurisdição. Até que seja estabelecido o enquadramento oficial, a Resolução CONAMA nº 357/2005 determina

que as águas doces sejam tratadas como classe 2, salvo quando apresentarem condições melhores, caso em que prevalece a classe mais restritiva (ANA, 2024).

4.2. Sensoriamento e qualidade da água

O controle da qualidade da água é indispensável para o manejo adequado dos recursos hídricos, e o emprego de diferentes técnicas de análise pode contribuir para reduzir os custos associados a esse processo. Nesse sentido, o sensoriamento remoto apresenta-se como uma ferramenta eficiente para estudos que abrangem variações temporais e espaciais (Bertoni e Sigolo, 2021).

Por meio das imagens de sensoriamento remoto, é possível analisar a dinâmica da qualidade da água devido à sua capacidade de capturar informações em diferentes momentos e áreas. Para isso, é necessária a criação de modelos específicos, onde as bandas espectrais das imagens são usadas como entrada e geram como saída mapas temáticos, viabilizando a interpretação das condições de qualidade da água. Esses mapas podem ser vinculados a classificações baseadas em normativas, como a Resolução CONAMA nº 357/2005 no Brasil, para identificar se os corpos d'água atendem aos padrões de qualidade ou ultrapassam limites críticos (LOPES *et al.*, 2015).

Conforme destacado por Lopes *et al.* (2016), as técnicas de sensoriamento remoto são valiosas para estudos de qualidade da água, pois permitem investigar fenômenos dinâmicos, como a eutrofização e a concentração de sedimentos em suspensão. A eutrofização induzida por atividades humanas afeta diretamente a qualidade dos corpos d'água, alterando o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos. Esse processo pode causar a proliferação de algas e cianobactérias, impactando negativamente o meio ambiente (Periotto e Martensen, 2019).

As análises realizadas com sensoriamento remoto fornecem um retrato atualizado das condições dos corpos hídricos, servindo como referência para comparações futuras e para a identificação de problemas na superfície aquática. Dessa forma, é possível avaliar indicadores de qualidade da água em relação aos parâmetros estabelecidos pelas políticas de gestão de recursos hídricos (LOPES, 2015).

Dentre os principais objetivos do sensoriamento remoto aplicado a ambientes aquáticos é a determinação da concentração e o mapeamento da variabilidade espacial de parâmetros de qualidade da água, como clorofila, sólidos em suspensão

e matéria orgânica dissolvida. Esses parâmetros desempenham um papel fundamental na determinação das condições biofísicas e do estado trófico de sistemas aquáticos, graças às propriedades de interação da água com a luz na faixa de radiação eletromagnética (BARBOSA, 2019).

Estudo de Mishra e Mishra (2012) desenvolveu e validou o Índice de Clorofila Normalizado por Diferença (NDCI) para estimar a concentração de clorofila-*a* em corpos hídricos. Inicialmente, o índice foi calibrado com um conjunto de dados simulados que reproduziu a variabilidade natural dos constituintes bio-ópticos, como chl-*a*, matéria orgânica dissolvida (CDOM) e partículas suspensas. Em seguida, o desempenho do NDCI foi avaliado com dados de campo obtidos a partir de medições do sensor MERIS em três regiões, Chesapeake Bay, Delta do Rio Mississippi e Baía de Mobile. Foi analisado o coeficiente de determinação (R^2) e o erro médio quadrático (RMSE), que demonstraram a robustez do índice, com um R^2 de 0,95 em simulações e baixo RMSE. Dessa forma, o NDCI se mostra uma ferramenta promissora para o monitoramento da qualidade da água e a detecção de proliferações de algas, mesmo em cenários com dados de campo limitados. Além disso, o estudo também apontou que a variabilidade atmosférica e a interferência de outros constituintes ópticos, como a CDOM e material particulado, podem limitar a precisão das estimativas em condições extremas.

O NDCI está diretamente relacionado à concentração de clorofila-*a*, pois é calculado a partir da diferença normalizada entre a refletância na banda de borda vermelha (705 nm) e na banda vermelha (660 nm). Com o aumento da concentração de clorofila-*a*, observa-se um incremento no sinal em 705 nm devido ao pico de refletância característico, enquanto a refletância em 660 nm diminui em razão da alta absorção da clorofila-*a* nessa região do espectro (Mishra e Mishra, 2012).

O estudo de Li *et al.* (2020) investigou a dinâmica temporal da biomassa fitoplanctônica no lago Chaohu, China, associando-a a variáveis climáticas e de nutrientes para compreender sua influência na eutrofização. Utilizando regressão linear multivariada, analisou-se a relação entre fatores ambientais, como temperatura da água, relação nitrogênio e fósforo e velocidade do vento, com a biomassa estimada por concentrações de clorofila-*a* em diferentes profundidades. O modelo apresentou alta precisão ($R^2 = 0.94$) e foi validado por indicadores estatísticos como RMSE e MARD, enquanto a análise de componentes principais (PCA) ajudou a reduzir a colinearidade entre variáveis. Entretanto, o estudo

reconhece que fatores climáticos globais podem impactar a eficácia das estratégias de mitigação e que a análise restrita ao período de 2003 a 2015 pode limitar a compreensão de tendências de longo prazo.

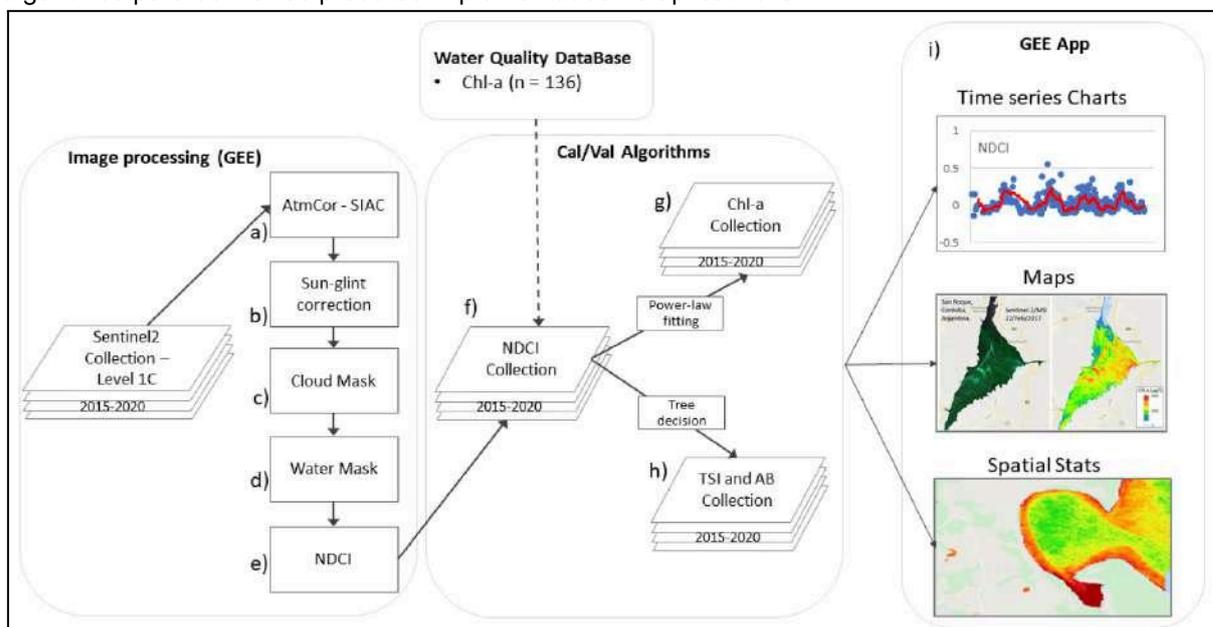
Estudo realizado por German (2021) avaliou a qualidade da água no Reservatório San Roque, Argentina, monitorando a concentração de chl-a através de imagens do satélite Sentinel-2 coletadas entre 2017 e 2019 e correlacionando esses dados com medições de campo. Foram aplicadas análises estatísticas e modelagem empírica para identificar padrões temporais e espaciais do crescimento de algas e dos processos de eutrofização, influenciados tanto por fatores naturais quanto por impactos antropogênicos, como o lançamento de efluentes de esgoto. Apesar de oferecer informações relevantes sobre a dinâmica do reservatório, o trabalho reconhece limitações relacionadas ao foco exclusivo na clorofila-a, à complexidade dos sistemas aquáticos e à resolução dos dados, sugerindo a necessidade de modelos mais abrangentes e dados adicionais para um entendimento mais completo dos processos envolvidos.

O estudo de Silva *et al* (2016) desenvolveu ferramenta matemática capaz de reproduzir o impacto de mudanças na bacia hidrográfica sobre a dinâmica do fitoplâncton na Lagoa da Pampulha, em Belo Horizonte. Foram coletados dados mensais de outubro de 2011 a junho de 2013, incluindo variáveis como turbidez, pH e concentrações de nutrientes, permitindo a calibração e validação dos modelos – com coeficientes de Nash entre 0,70 e 0,88 para o escoamento e coeficientes de correlação de Pearson entre 0,82 e 0,89 ($p < 0,0001$) para a biomassa fitoplanctônica. O estudo de Schauer e Senay (2019) caracteriza a dinâmica espaço-temporal do uso de água pelas culturas no Vale Central da Califórnia, utilizando a evapotranspiração real anual (ETa) derivada do modelo SSEBop aplicado a dados Landsat de 2008 a 2018. A análise abrangeu 10 culturas e, por meio da tendência de Mann-Kendall, identificou um aumento significativo na área cultivada e no uso de água para amêndoas. Além disso, a análise pixel a pixel evidenciou alterações no tipo de cultura e no consumo de água a nível de campo em todo o Condado de Kern, demonstrando a utilidade dos dados históricos do Landsat para informar o gerenciamento sustentável dos recursos hídricos.

4.2.1. AlgaeMAP

O AlgaeMAP é uma ferramenta desenvolvida na plataforma Google Earth Engine (GEE) para estimar a qualidade da água por meio do Índice Diferencial de Clorofila Normalizado (NDCI) através de imagens Sentinel-2, permitindo estimar a concentração da clorofila-a (Chl-a) e do Índice de Estado Trófico (IET) ao longo do tempo conforme metodologia descrita na Figura 1.

Figura 1. Fluxograma dos métodos incluindo processamento de imagem e calibração/validação de algoritmos para derivar os produtos implementados no aplicativo GEE.



Fonte: (LOBO *et al.*, 2021).

O pré-processamento das imagens Sentinel-2 incluiu a correção atmosférica e a remoção do brilho solar. Em seguida, foi aplicada uma máscara de nuvens utilizando o produto *Cloud Probability* do GEE, considerando apenas pixels com menos de 10% de probabilidade de nuvem. Para a máscara de água, utilizou-se o *Water Mask* do JRC, garantindo a inclusão apenas de corpos hídricos permanentes. Após essas etapas, o NDCI foi calculado a partir das bandas 5 (705 nm) e 4 (665 nm). Devido às limitações do GEE na exibição de dados processados pelo SIAC, uma nova coleção de imagens NDCI foi criada e carregada como ativo do usuário para permitir análises espaciais e temporais eficientes. Por fim, foram realizadas a calibração e validação dos algoritmos de clorofila-a e índice de estado trófico.

Segundo LOBO *et al.* (2021), a fim de estimar a concentração de Clorofila-a utilizou-se o modelo de ajuste não linear e para o Índice de Estado Trófico baseou-se em classificação de modelo de decisão em árvore em cinco classes a

partir de limiares de concentração de Chl-a para os níveis tróficos de acordo com a CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Figura 2). Vale destacar que no desenvolvimento do aplicativo as classes Ultra-oligotrófica e Oligotrófica foram agrupadas, pois o teste T pareado não identificou diferença significativa entre elas.

Figura 2. Limiares de concentração de clorofila-a para classificação do estado trófico de acordo com a CETESB. **Para a pesquisa, foi considerada a condição de florescimento de algas.

Trophic State	Chlorophyll-a (µg/L)
Ultra-oligotrophic *	Chl-a < 1.17
Oligotrophic	1.17 < Chl-a < 3.24
Mesotrophic	3.24 < Chl-a < 11.03
Eutrophic	11.03 < Chl-a < 30.55
Super-eutrophic **	30.55 < Chl-a < 69.05
Hyper-eutrophic **	69.05 < Chl-a

Fonte: (LOBO *et al.*, 2021).

De acordo com a CETESB (2013)

Os resultados correspondentes ao fósforo, IET(P), devem ser entendidos como uma medida do potencial de eutrofização, já que este nutriente atua como o agente causador do processo. A avaliação correspondente à clorofila a, IET(CL), por sua vez, deve ser considerada como uma medida da resposta do corpo hídrico ao agente causador, indicando de forma adequada o nível de crescimento de algas que tem lugar em suas águas. Assim, o índice médio engloba, de forma satisfatória, a causa e o efeito do processo. Deve-se ter em conta que num corpo hídrico, em que o processo de eutrofização encontra-se plenamente estabelecido, o estado trófico determinado pelo índice da clorofila-a certamente coincidirá com o estado trófico determinado pelo índice do fósforo. Já nos corpos hídricos em que o processo esteja limitado por fatores ambientais, como a temperatura da água ou a baixa transparência, o índice relativo à clorofila a irá refletir esse fato, classificando o estado trófico em um nível inferior àquele determinado pelo índice do fósforo (CETESB, 2013, p. 1).

O aplicativo apresenta funcionalidades interativas que permitem a seleção da região de interesse (ROI), data, intervalo de tempo e o tipo de análise desejado, que pode ser uma análise de imagem única ou uma análise temporal. No caso de análise de imagem única, é possível escolher uma data específica do ano, o que resultará em dados de saída nos formatos RGB, NDCI, Chl-a, IET, bem como imagens bloom algal.

Além disso, a plataforma oferece alta resolução espacial dos parâmetros de qualidade da água, sendo possível com facilidade extrair informações detalhadas espaciais de 30 metros ou 90 metros e temporais longas, a partir de 2015 com imagens de 5 dias de intervalo, ao longo dos corpos hídricos (LOBO, 2021).

O AlgaeMAp, embora tenha sido inicialmente desenvolvido para a região do rio Tietê, está sendo ampliado para outras áreas, tornando a etapa de validação fundamental para assegurar a precisão e a confiabilidade das estimativas geradas pelo aplicativo. Esse processo é essencial para adaptar o aplicativo a diferentes contextos e garantir sua aplicabilidade em novos corpos hídricos.

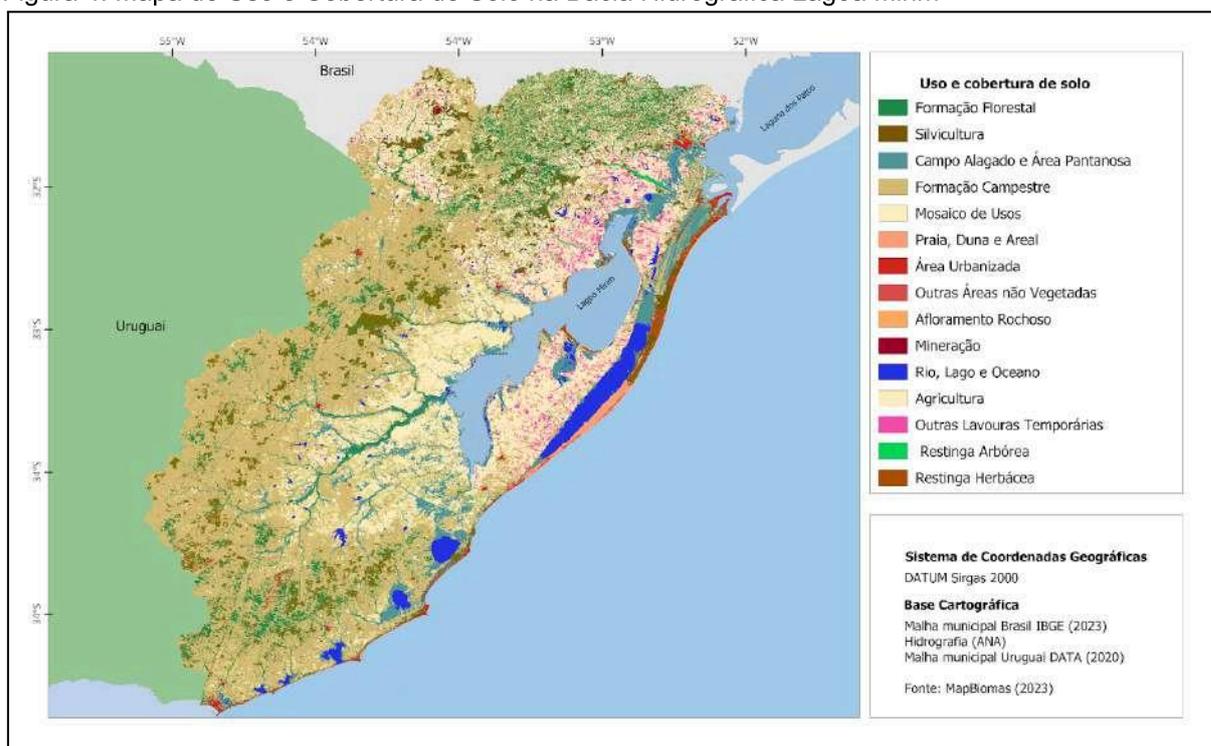
4.3. Bacia Hidrográfica Lagoa Mirim

As bacias hidrográficas são sistemas complexos nos quais os processos hidrológicos interagem com atividades humanas, biodiversidade e clima, impactando diretamente a qualidade e a disponibilidade dos recursos hídricos (Cezar *et al.*, 2019).

A Bacia Hidrográfica Lagoa Mirim (Figura 3) é uma bacia binacional situada no extremo sul do Brasil e a leste do Uruguai, abrangendo uma área de aproximadamente 62.250 km². Desse total, cerca de 47% está em território brasileiro (29.250 km²) e 53% no Uruguai (33.000 km²). Seu principal corpo hídrico, a Lagoa Mirim, localiza-se na planície costeira e possui uma área superficial de 3.750 km², dos quais 2.750 km² estão no Brasil e 1.000 km² no Uruguai. A lagoa tem uma largura média de 20 km e desempenha um papel estratégico na hidrografia da região (ALM, 2024).

uso de águas subterrâneas é insignificante, representando apenas 0,17% do total. Essa dinâmica pode ser evidenciada no mapa de uso e cobertura do solo na bacia (Figura 4), elaborado com dados do MapBiomas para o ano de 2023, que ilustra a distribuição e expansão da agricultura irrigada e sua relação com os recursos hídricos da região.

Figura 4. Mapa de Uso e Cobertura de Solo na Bacia Hidrográfica Lagoa Mirim



Fonte: MapBiomas (2023)

Elaboração: Autora

A gestão dos recursos hídricos na região é crucial tanto para a atividade agrícola quanto para o abastecimento de uma população superior a 700 mil habitantes. No Brasil, políticas como o Programa Estadual de Irrigação e Usos Múltiplos da Água têm sido implementadas para melhorar a eficiência no uso dos recursos hídricos e reduzir impactos ambientais (ALM, 2024).

4.3.1. Barragem do Chasqueiro

A bacia hidrográfica do Arroio Chasqueiro integra um conjunto de drenagens que deságuam na margem oeste da Lagoa Mirim. No âmbito do Programa da Bacia da Lagoa Mirim (PROMIRIM), foi construída a Barragem do Arroio Chasqueiro (BAC) (Figura 5), barragem de terra com filtro e areia que entrou em operação em 1983 com cerca de 1200 metros de comprimento e altura máxima de 22 metros (COODIC, 2023).

Figura 5. Vista aérea do reservatório da barragem do Chasqueiro



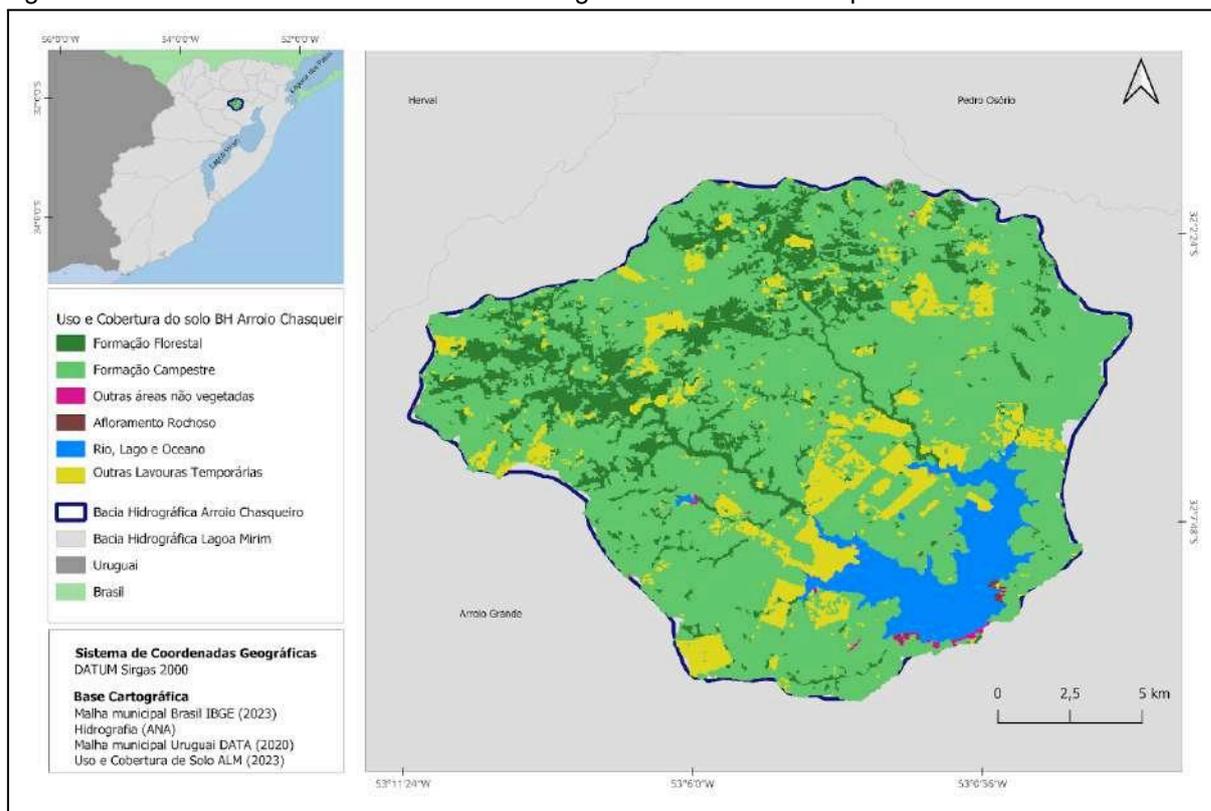
Fonte: ALM (2024).

Com o objetivo de garantir disponibilidade hídrica para a irrigação, especialmente de lavouras de arroz cultivadas pelo método de inundação (BRESSAN, L. M., 2021). Planejado dentro do projeto de desenvolvimento da Lagoa Mirim, elaborado pela extinta Superintendência de Desenvolvimento da Região Sul (SUDESUL), e resultou na implantação da barragem nos arroios Chasqueiro e Chasqueirinho (COODIC, 2023).

Atualmente, a BAC está inserida no Distrito de Irrigação do Arroio Chasqueiro (DIBAC) e apresenta um reservatório com área alagada de aproximadamente 1.650 hectares, armazenando um volume total de 117 milhões de metros cúbicos de água, dos quais cerca de 105,6 milhões de metros cúbicos correspondem ao volume útil (COODIC, 2023).

A dinâmica de uso e cobertura de solo na Bacia Hidrográfica do Arroio Chasqueiro e no DIBAC é condicionada por dois cenários principais. Em áreas de planície, caracterizadas por solos hidromórficos, predominam o cultivo de arroz irrigado e a pecuária extensiva. Já nas regiões de relevo mais acidentado, a produção agrícola é mais diversificada, abrangendo culturas como soja, milho e fruticultura, além da pecuária (FILHO, 2016). Na Figura 6, é possível verificar a distribuição do uso e cobertura do solo nessa área.

Figura 6. Uso e cobertura de solo da bacia hidrográfica do Arroio Chasqueiro.



Fonte: ALM (2023)

Elaboração: Autora

4.4. Agricultura irrigada

No Brasil, o uso da irrigação começou a se desenvolver entre o final do século XIX e o início do século XX, sendo inicialmente implementado nas plantações de arroz no estado do Rio Grande do Sul. Desde então, a região se consolidou como um importante pólo de irrigação no país (ANA, 2017).

A agricultura irrigada representa o maior e mais dinâmico uso da água tanto no Brasil quanto no mundo, o que demanda um monitoramento contínuo de indicadores para apoiar a gestão pública e privada dos recursos hídricos. No Brasil, a área irrigada com água proveniente de mananciais é de aproximadamente 6,0 milhões de hectares (Mha), em contraste com um potencial físico-hídrico total de 55,8 Mha e um potencial efetivo de 13 Mha (ANA, 2024).

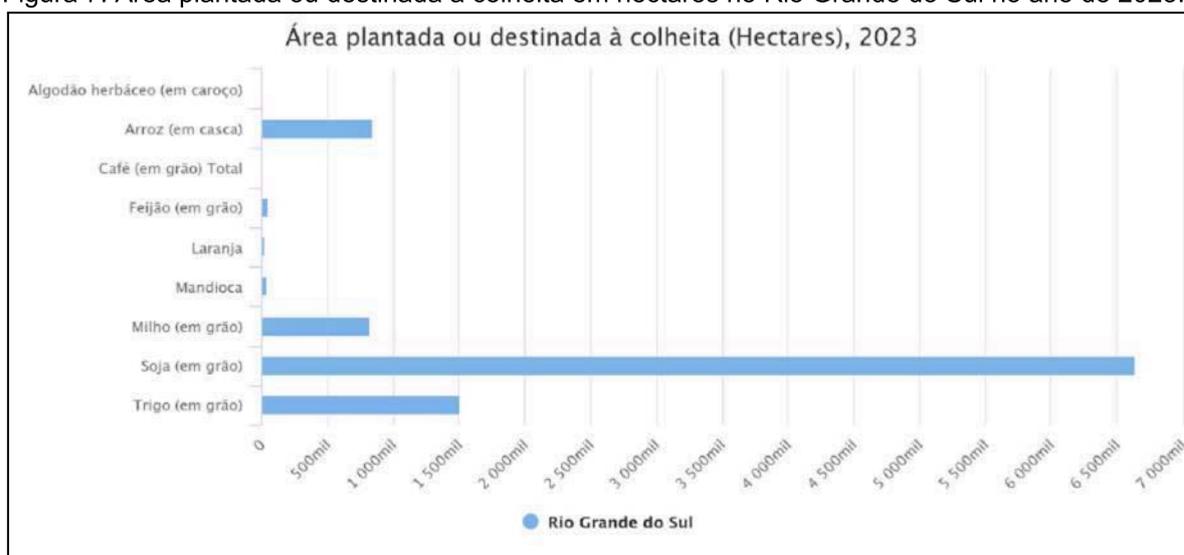
Além disso, no Brasil, a produção de arroz é realizada por meio dos sistemas de cultivo irrigado e de sequeiro, sendo que a orizicultura irrigada responde por cerca de 70% da produção nacional. Aproximadamente 65% dessa produção é concentrada nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, em áreas conhecidas como várzeas ou terras baixas. Uma irrigação eficiente caracteriza-se

pelo menor consumo de energia e pela redução das perdas de água, favorecendo a conservação dos recursos hídricos (COELHO e SIMÕES, 2015).

O Rio Grande do Sul destaca-se como um dos principais polos agrícolas do Brasil, com aproximadamente 1,4 milhão de hectares dedicados à irrigação, sendo o sistema de inundação predominante, especialmente para o cultivo de arroz. O estado é responsável por cerca de 70% da produção nacional de arroz, além de ocupar a terceira posição na produção de soja e liderar a produção de trigo no país (IBGE, 2024).

A Figura 7 ilustra um gráfico da área plantada ou destinada à colheita em hectares no Rio Grande do Sul, fornecendo uma visão detalhada da distribuição das culturas agrícolas no estado.

Figura 7. Área plantada ou destinada à colheita em hectares no Rio Grande do Sul no ano de 2023.



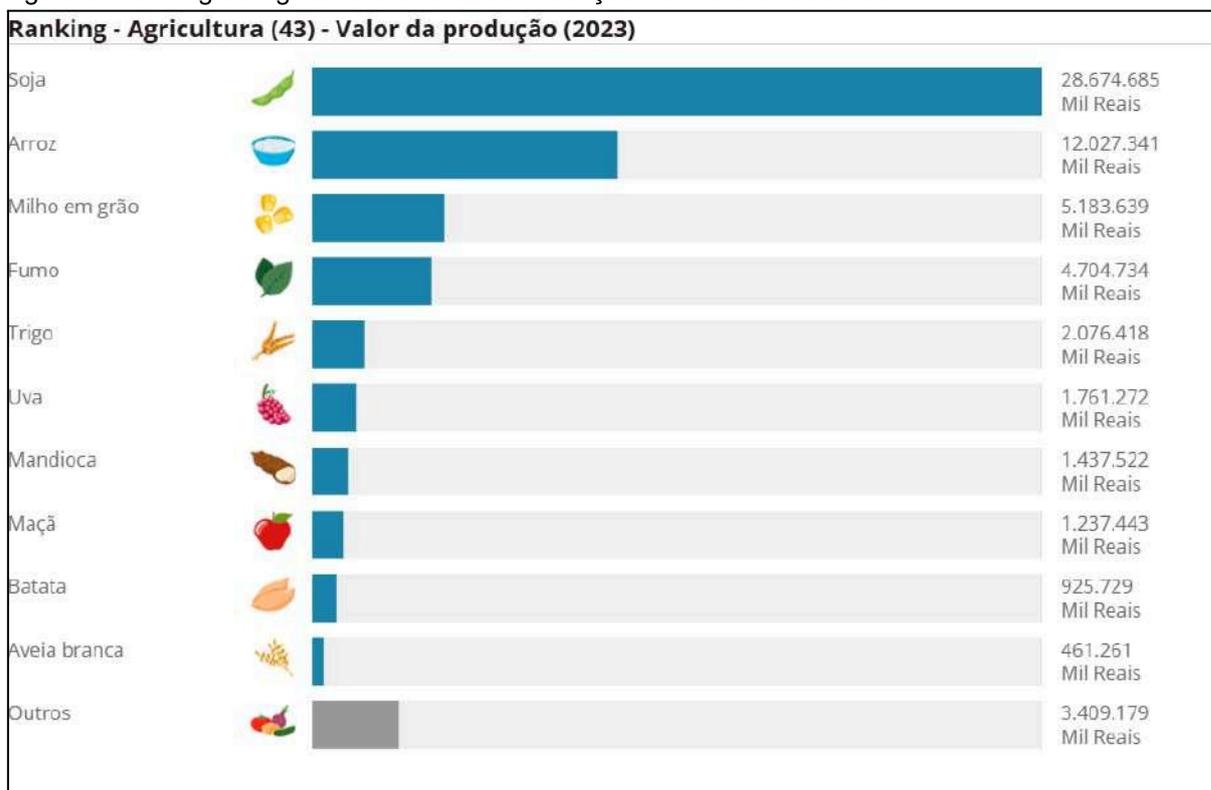
Fonte: PAM (2024).

O Rio Grande do Sul registrou um aumento na área semeada com arroz na safra 2023/2024, totalizando 900.203 hectares, o que representa um crescimento de 7,17% em relação aos 839.972 hectares da safra anterior (IRGA, 2024). Em relação à soja, o estado expandiu sua área cultivada de 3,3 milhões de hectares em 2001 para 6 milhões de hectares duas décadas depois, de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab, 2022). Em 2020, a soja representou 76% do cultivo total das culturas temporárias de verão no estado, evidenciando sua relevância predominante (IBGE, 2022). Na safra de 2023, o Rio Grande do Sul

produziu aproximadamente 12 milhões de toneladas de soja e 7 milhões de toneladas de arroz (PAM, 2023).

Além disso, o estado ocupa uma posição de destaque no ranking nacional da agricultura, com uma significativa participação no valor da produção de diversos produtos agrícolas. O Rio Grande do Sul se destaca na produção de arroz, soja e milho (Figura 8) com esses produtos tendo um impacto considerável na economia agrícola brasileira (IBGE, 2024).

Figura 8. Ranking da Agricultura e Valor de Produção no Rio Grande do Sul

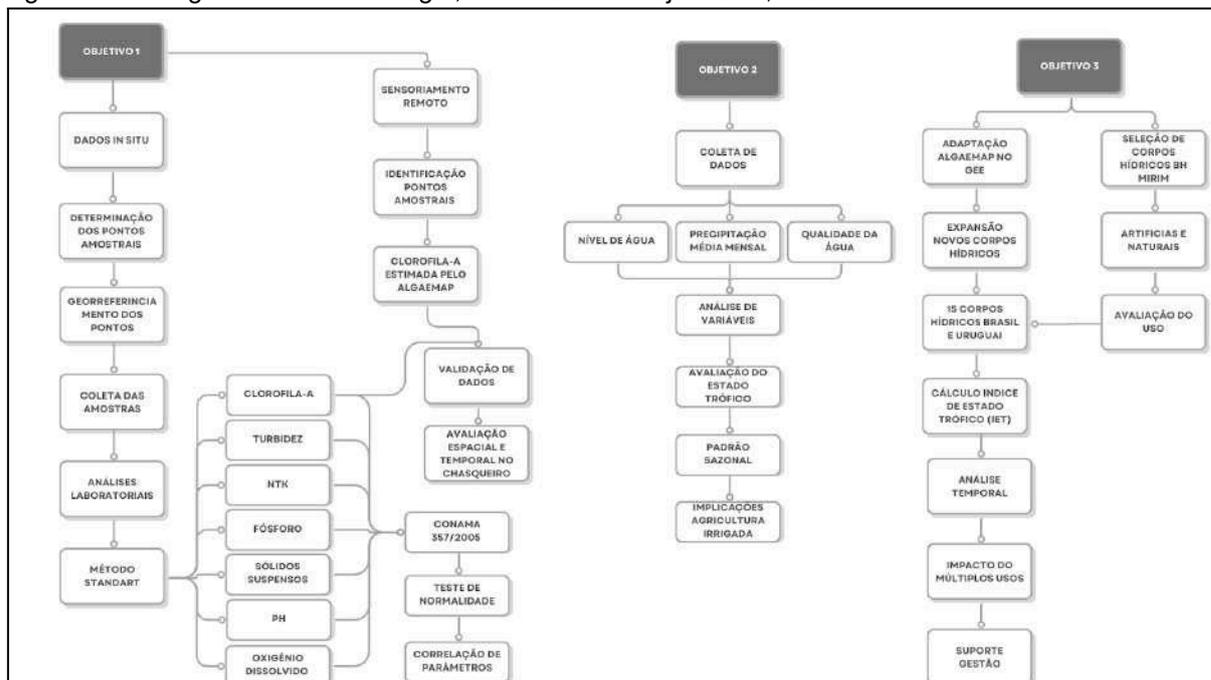


Fonte: IBGE (2024).

5. Materiais e métodos

O presente trabalho apresenta duas principais vertentes (Figura 9): a coleta de dados de campo in situ e aquisição e processamento de informações obtidas via ferramenta de sensoriamento remoto.

Figura 9. Fluxograma da metodologia, considerando objetivos 1, 2 e 3.

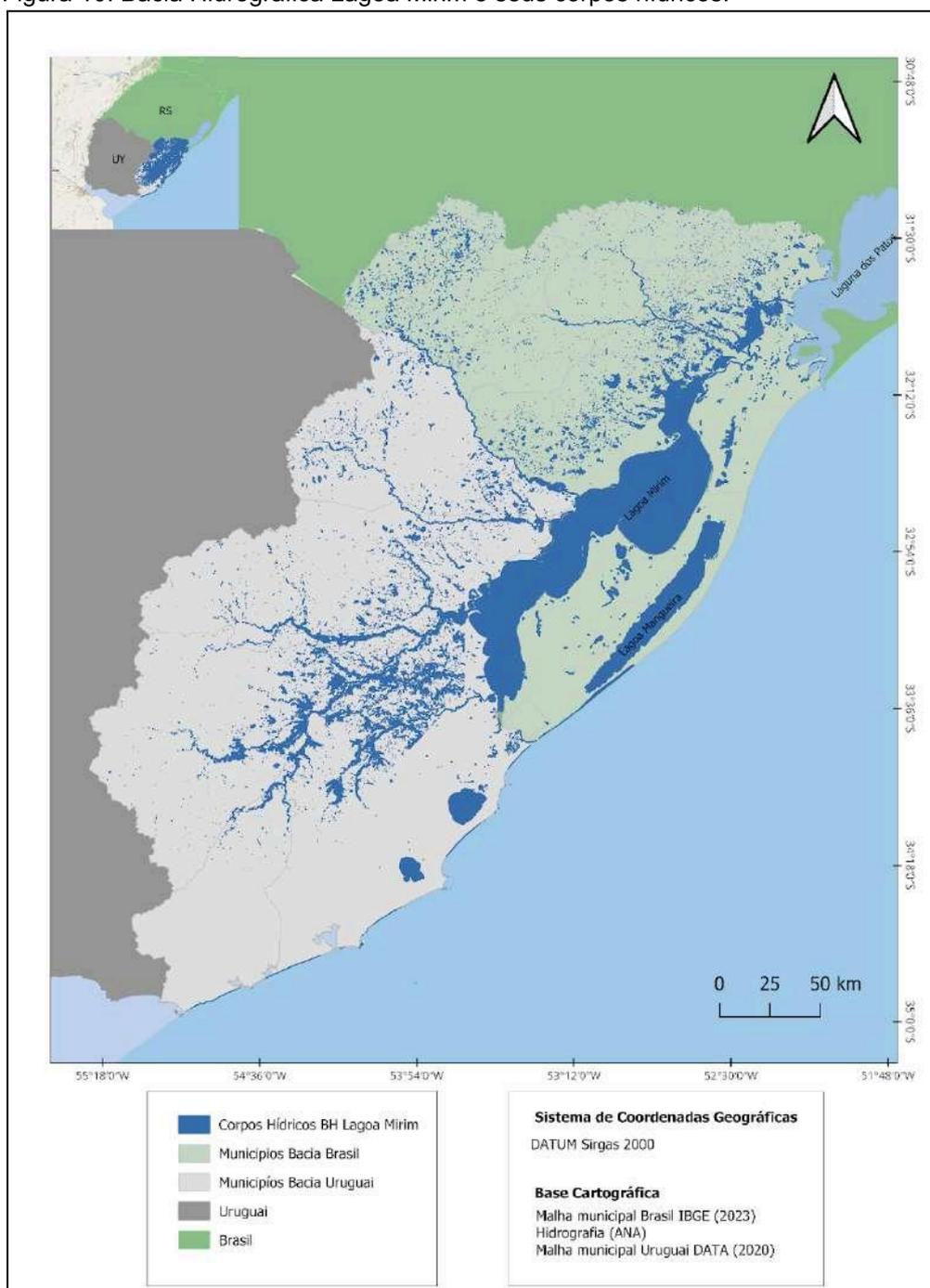


Fonte: Autor.

5.1. Área de estudo

A Lagoa Mirim, junto ao complexo de áreas úmidas em seu entorno, compõem uma das principais bacias hidrográficas transfronteiriças da América do Sul, destacando-se por sua relevância ecológica e econômica, que está relacionada à agricultura, à indústria e à pecuária, tanto para o Brasil quanto para o Uruguai (Oliveira *et al.*, 2015). O uso predominante das águas dos recursos hídricos da bacia é para a irrigação das plantações de arroz, em ambos países, além de servir como fonte de abastecimento de água potável para as comunidades locais (Oliveira *et al.*, 2015).

Figura 10. Bacia Hidrográfica Lagoa Mirim e seus corpos hídricos.



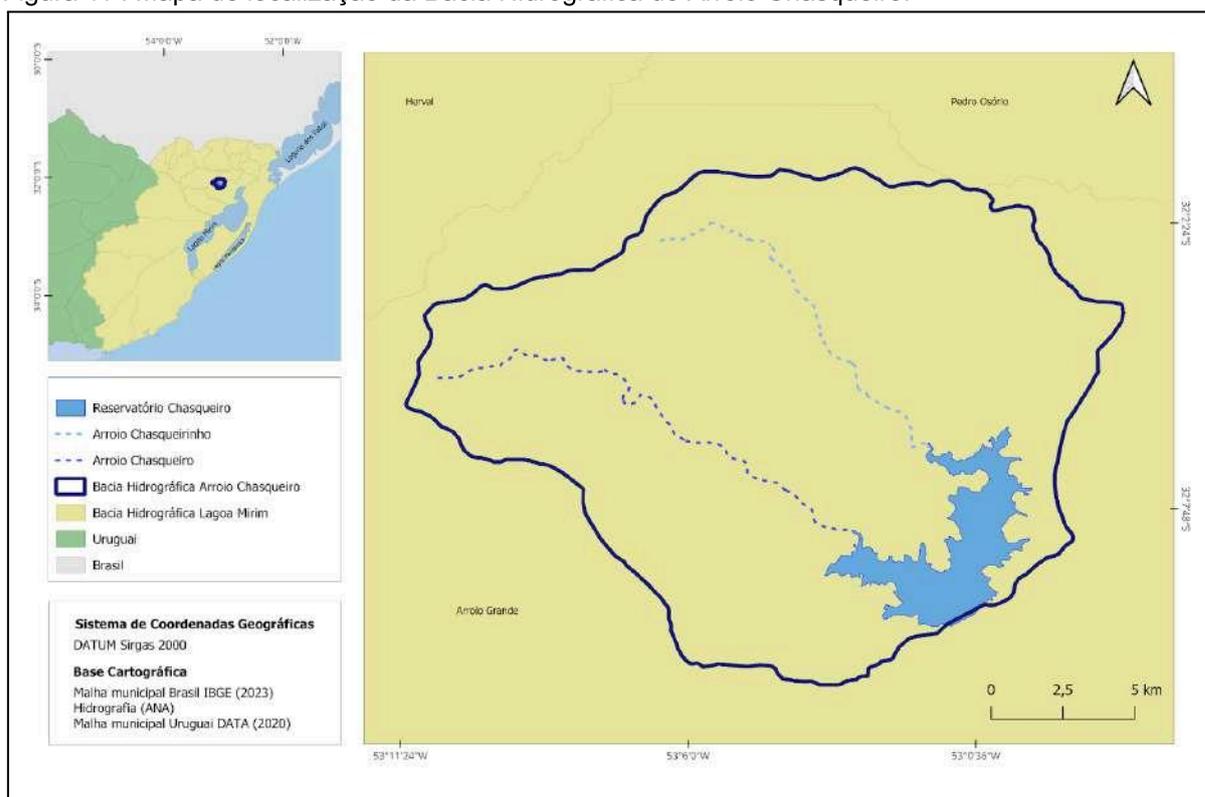
Elaboração: Autora

A bacia possui clima subtropical úmido (Cfa, de acordo com a classificação de Köppen), caracterizado por verões quentes e precipitação distribuída ao longo do ano (Peel *et al.*, 2007). No período de 1973 a 2020, a média anual de precipitação registrada na estação da Embrapa (Brasil) foi de 1401 ± 298 mm, enquanto a evapotranspiração de referência atingiu 1081 ± 36 mm. No lado uruguaio, na

estação do *Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria* (INIA), esses valores foram de 1349 ± 296 mm e 1045 ± 50 mm, respectivamente (ALM, 2024).

A bacia hidrográfica do Arroio Chasqueiro desagua na Lagoa Mirim, ao longo da sua margem oeste, abrangendo uma área total de cerca de 240 km². Essa bacia é composta por dois arroios principais (Chasqueiro e o Chasqueirinho) e o reservatório Chasqueiro (COODIC, 2023).

Figura 11 . Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Arroio Chasqueiro.



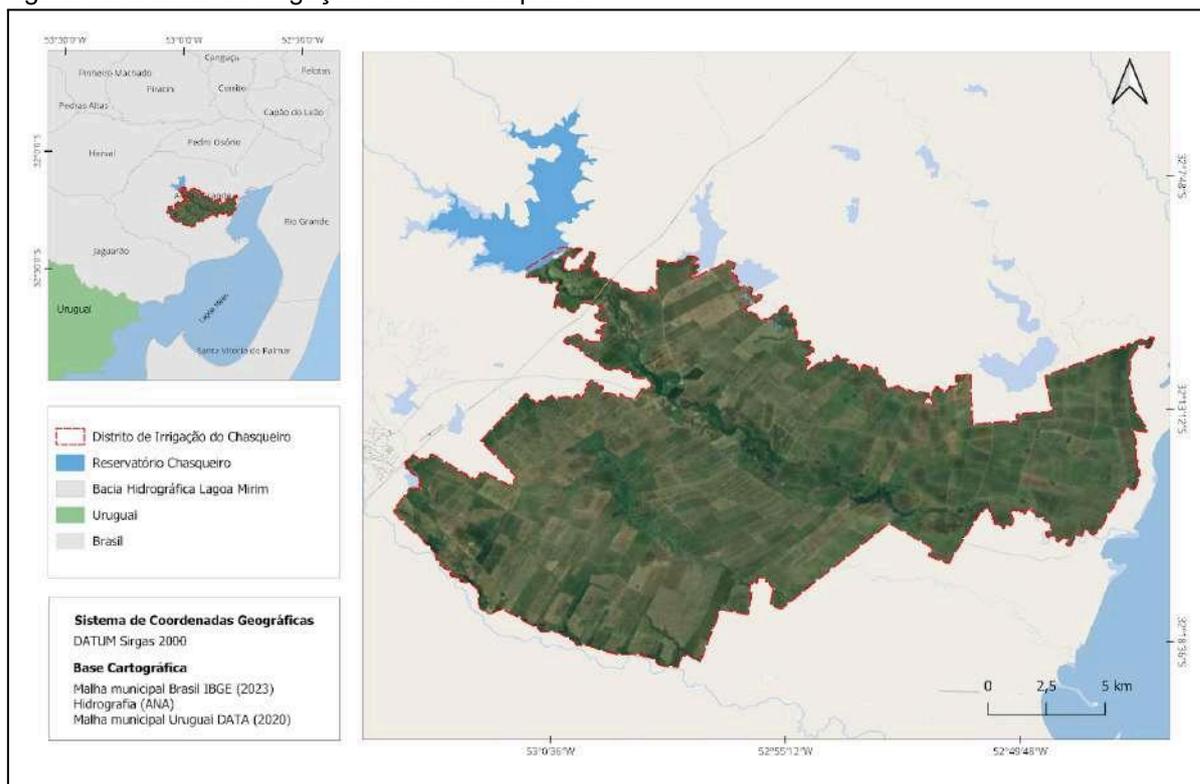
Elaboração: Autora.

A área de estudo referente a validação do AlgaeMAP se concentra no reservatório Arroio Chasqueiro, situado a uma distância de 3 km da BR-116 (km 600) no município de Arroio Grande, no estado do Rio Grande do Sul. Desde 1983, esse reservatório conta com uma barragem de terra que possui 1.200 metros de comprimento e atinge uma altura máxima de 22 metros. A área inundada abrange aproximadamente 1.650 hectares e tem capacidade para armazenar cerca de 117 milhões de metros cúbicos de água (HIDROSSEDI, 2019).

O Distrito de Irrigação do Chasqueiro (Figura 12), administrado pela ALM (ALM, 2023), é responsável pela gestão e distribuição da água a jusante da barragem Chasqueiro, assegurando o abastecimento hídrico para a produção

agrícola e minimizando perdas de safra em períodos de seca. O perímetro de irrigação ocupa uma área de 26 mil hectares com aproximadamente 19 mil hectares irrigáveis, abrangendo a rede principal do sistema de irrigação que comporta um total de 90 obras hidráulicas em concreto armado e 38 pontilhões de madeira (COODIC, 2023).

Figura 12. Distrito de Irrigação Arroio Chasqueiro.



Elaboração: Autora

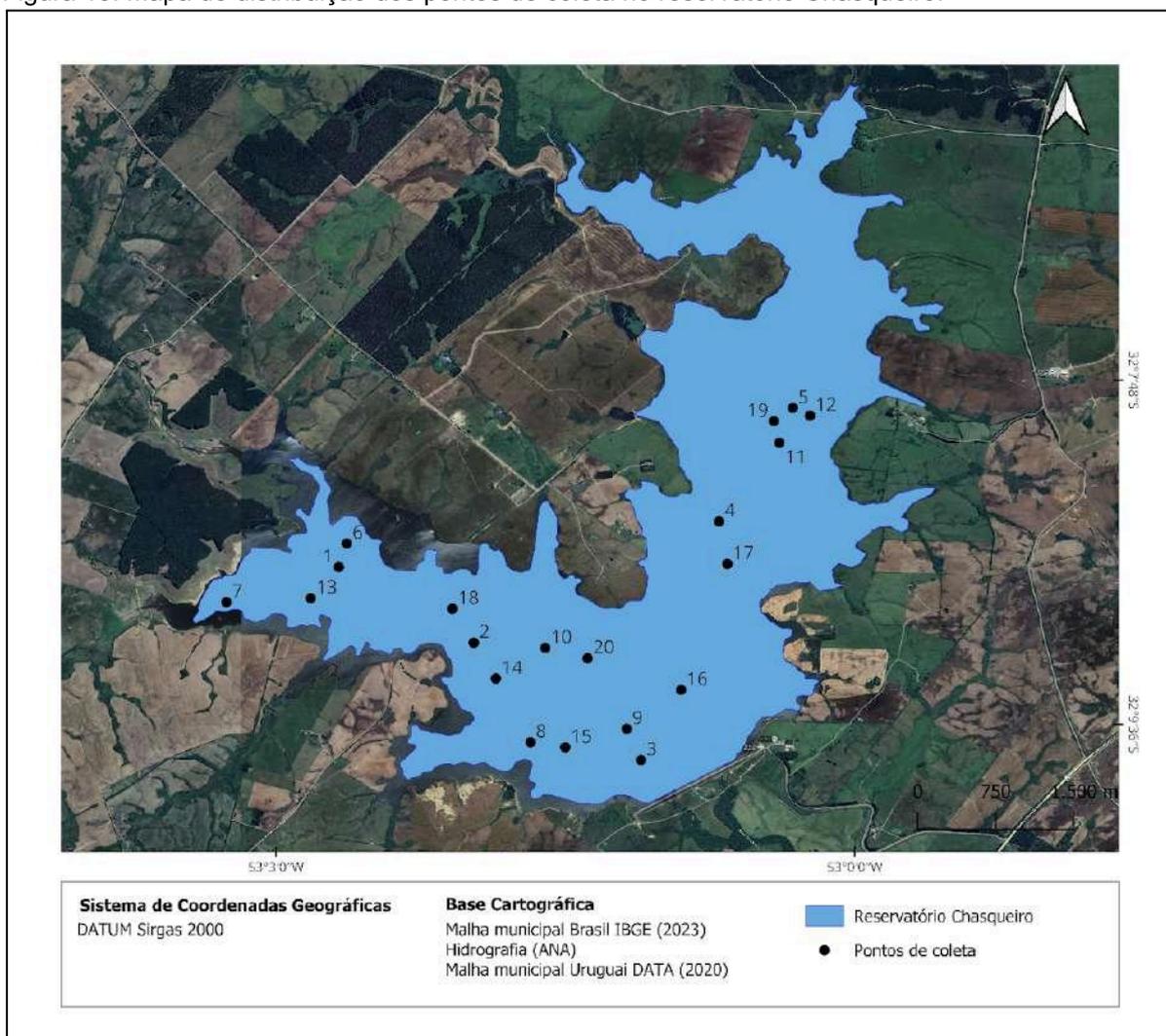
5.2. Levantamento de dados de campo

Os pontos amostrais foram localizados utilizando um receptor de Sistema de Posicionamento Global (GPS), modelo map 60csx garmin com resolução de posicionamento de até 3 metros, e os pontos estão representados na Figura 13. A seleção dos pontos não foi fixa, sendo priorizado o uso das mesmas coordenadas ou as mais próximas possíveis em cada campanha. No entanto, devido à interferência de nuvens em algumas passagens do satélite, foi necessária a variação das coordenadas geográficas das coletas. A distribuição dos pontos de amostragem foi realizada ao longo do corpo hídrico, evitando as margens. Essa abordagem considerou o impacto do regime de irrigação no reservatório Chasqueiro,

caracterizado pela retirada de água, o que tornaria as margens inadequadas para a amostragem.

A Figura 13 ilustra a distribuição espacial dos pontos de coleta, totalizando 20 pontos amostrados ao longo da área de estudo. Essa abordagem permitiu a análise da variação espacial e temporal da qualidade da água, contribuindo para uma avaliação mais detalhada das condições do reservatório.

Figura 13. Mapa de distribuição dos pontos de coleta no reservatório Chasqueiro.



Fonte: Autora, 2025.

Segundo Kuster (2012), um intervalo de até três dias entre a passagem do satélite e a coleta em campo mantém a precisão dos resultados, sendo comparável às coletas realizadas no mesmo dia da aquisição das imagens. Embora o ideal fosse realizar a coleta no dia da passagem do satélite, dificuldades logísticas muitas vezes impediam essa sincronia.

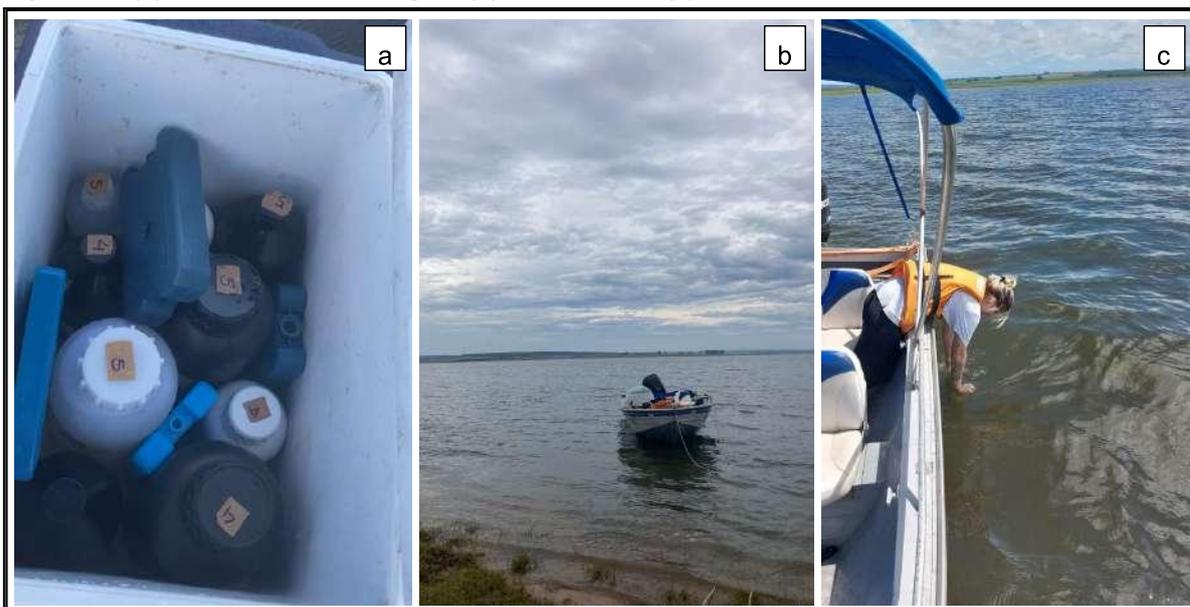
Assim, para garantir o aproveitamento máximo dos dados coletados, a qualidade da imagem era verificada previamente, e a coleta em campo era ajustada conforme a disponibilidade e as condições adequadas. As coletas de amostras foram realizadas, sempre no dia seguinte à passagem do satélite Sentinel-2 sobre a área de estudo. Essa programação permitiu uma avaliação prévia da qualidade das imagens captadas pelo satélite. Quando as imagens apresentavam condições adequadas, com pouca ou nenhuma interferência de nuvens, a saída de campo era realizada. Essa estratégia garantiu a comparabilidade entre os dados de sensoriamento remoto e os dados obtidos em campo, conforme Toming *et al.* (2016).

As coletas foram conduzidas embarcadas em colaboração com a Agência Lagoa Mirim (ALM) da Universidade Federal de Pelotas, no período de setembro de 2023 a agosto de 2024, realizado em 6 campanhas de monitoramento, totalizando 34 amostras.

Durante o processo de coleta, os frascos foram ambientados duas vezes com a própria água do reservatório (Figura 14). Para clorofila-a e NTK, foram coletados 1 litro de água superficial em cada ponto, a uma profundidade de 0,30 metros, condicionadas em vidro âmbar para evitar contato com a luz solar e mantidas sob refrigeração. Para análise das amostras foi realizada duplicatas, utilizando o método espectrofotométrico e método Macro-Kjeldahl, respectivamente.

Em relação a coleta de OD, foram utilizados frascos de DBO winkler de 300ml e adicionados 1 ml das soluções de sulfato manganoso ($MnSO_4$) e a solução álcali-iodeto-azida, com o objetivo de fixar o oxigênio dissolvido da amostra, a análise de OD foi posteriormente conduzida utilizando o método iodométrico. Para a coleta de amostras de fósforo total foram utilizados frascos de 500 ml de âmbar e realizado em laboratório o método colorimétrico vanadomolibdofosfórico.

Figura 14. (a) Frascos de amostragem (b) Embarcação (c) Coleta de amostras



Fonte: Acervo pessoal da autora.

5.3. Análises Laboratoriais

As amostras foram analisadas no Laboratório de Águas da ALM, seguindo a metodologia do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2012).

Tabela 2. Metodologias analisadas para os parâmetros utilizados neste estudo, com suas respectivas referências.

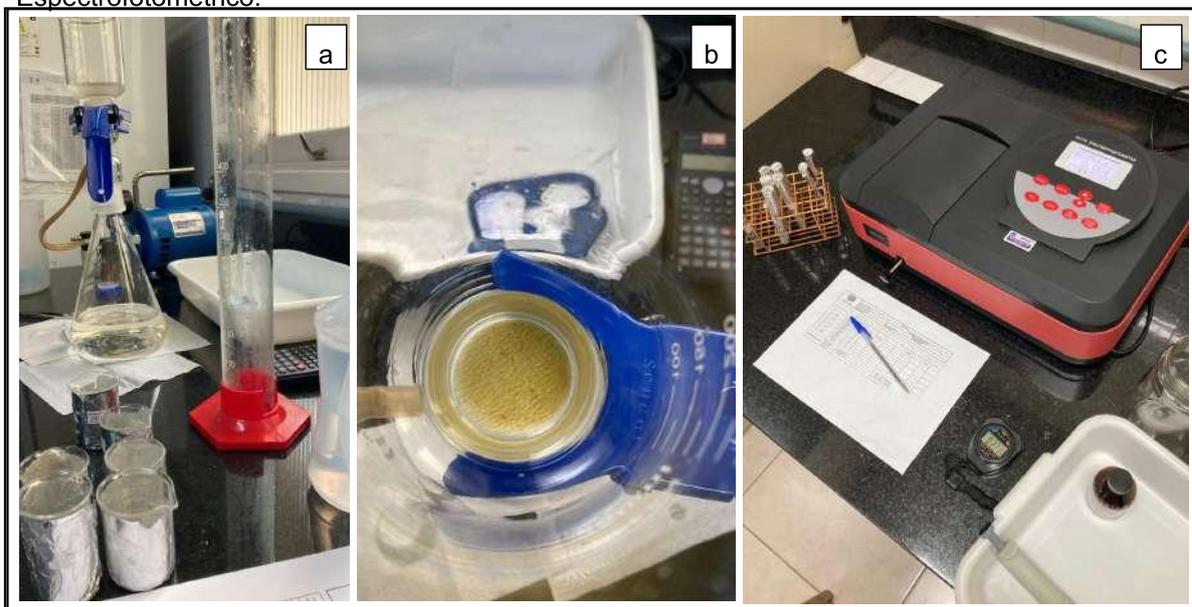
Parâmetros	Metodologias Analíticas	Referências
Clorofila-a	Método Espectrofotométrico	
Nitrogênio total Kjeldahl (NTK)	Método Macro-Kjeldahl	
Fósforo Total	Método Colorimétrico Vanadomolibdofosfórico	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2012)
Oxigênio Dissolvido (OD)	Método iodométrico - modificação azida	
pH	Método Potenciométrico	
Sólidos em Suspensão	Método gravimétrico	
Turbidez	Método Nefelométrico	

Fonte: Autora.

Para a determinação da Chl-a, as amostras de água foram filtradas utilizando filtros de fibra de vidro, com diâmetro de 47 mm. A extração da Chl-a foi realizada com acetona a 90%, conforme ilustrado na Figura 15. O conteúdo de Chl-a nos

extratos foi então quantificado por espectrofotometria, utilizando o espectrofotômetro.

Figura 15. (a) Kit filtragem clorofila-a (b) Filtragem de 500mL por duplicata (c) Análise Método Espectrofotométrico.



Fonte: Acervo pessoal da autora.

Para o cálculo da concentração de clorofila-a (Chl-a) em $\mu\text{g L}^{-1}$, foram consideradas as medições realizadas no espectrofotômetro, o volume de acetona utilizado para a extração e o volume de água filtrada. A equação (1) utilizada para o cálculo é a seguinte:

$$\text{Clorofila - a } (\mu\text{g.L}^{-1}) = 26,73 \times (D_{664c} - D_{665c}) \times \left(\frac{v}{(V \times L)} \right) \quad \text{Equação 1}$$

Onde V é o volume em litros da amostra filtrada, “v” é o volume em mL, de acetona 90% usada na extração, 26,7 é uma constante de absorção; D_{664C} e D_{665c} são a densidade óptica a 664nm e 665nm corrigida, respectivamente.

Na Figura 16, estão representadas algumas das análises dos outros parâmetros.

Figura 16. (a) NTK na digestão (b) Fósforo pré digestão (c) Análise fósforo após digestão.



5.4. Integração dos dados de campo e de sensoriamento remoto

Os resultados deste estudo foram integrados aos resultados de Simões (2023), que analisou a qualidade da água no reservatório Chasqueiro, com foco na concentração de clorofila-*a* no período de 2023. O estudo utilizou o mesmo método empregado nesta pesquisa, permitindo adicionar o conjunto de dados para fortalecer a robustez das análises, apresentando uma avaliação mais abrangente da validação do aplicativo AlgaeMAP.

Importante ressaltar que, em determinados períodos, a realização das coletas foi inviabilizada devido à falta de imagens adequadas ou a questões logísticas, o que afetou a regularidade das coletas em alguns meses. As condições meteorológicas específicas representaram um desafio, evidenciando as dificuldades associadas à realização de coletas de campo em corpos hídricos.

A estimativa no AlgaeMAP foi realizada utilizando de 4 a 6 pixels, correspondentes às coordenadas dos pontos de amostragem. Geralmente, é calculada a média de pelo menos 4 pixels para melhor representatividade dos dados, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17. Seleção de Pixels para Estimativa da Clorofila-a no Corpo Hídrico



Fonte: Autora.

A avaliação do desempenho estatístico das concentrações de clorofila-a observadas em campo e estimadas pelo AlgaeMAP foi conduzida por meio do Erro Quadrático Médio (MSE), da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e do Coeficiente de Determinação (R^2). Além disso, a classificação do Índice de Estado Trófico foi analisada utilizando os testes Kappa-Cohen, Acurácia Global (AG) e Qui-Quadrado, proporcionando uma validação abrangente da confiabilidade das estimativas obtidas.

O índice de Kappa constitui uma medida estatística utilizada para avaliar a concordância entre avaliadores, considerando a proporção de concordância que excede a expectativa de mero acaso. Este índice tem sido empregado para determinar o grau de acordo entre dois ou mais observadores, ou entre métodos distintos de classificação, baseando-se na contagem de respostas idênticas. Os valores do Kappa oscilam entre -1 e 1, sendo que o valor 1 representa a concordância total, enquanto valores próximos ou inferiores a zero indicam a ausência de concordância. A interpretação dos resultados adota que valores inferiores a zero correspondem à ausência de concordância, de 0 a 0,19 indicam uma concordância muito baixa, de 0,20 a 0,39 denotam concordância fraca, de 0,40 a 0,59 refletem uma concordância moderada, de 0,60 a 0,79 sugerem uma

concordância substancial e, por fim, de 0,80 a 1,00 indicam uma concordância quase perfeita (GUIMARÃES, 2017).

Para a análise dos dados, utilizou-se o teste de Shapiro-Wilk, com nível de significância de 5% ($p < 0,05$), para verificar a aderência das variáveis à distribuição normal, considerando esta como hipótese nula.

As variáveis que não apresentaram distribuição normal foram analisadas por meio do teste de Mann-Whitney, também com nível de significância de 5% ($p < 0,05$), para verificar a existência de diferenças estatisticamente significativas. Essa análise foi conduzida para avaliar a variação sazonal entre os períodos de irrigação e não irrigação. Todas as análises foram realizadas no software SigmaPlot.

Os dados que apresentam distribuição normal, foi aplicado a correlação de Pearson, que quantifica a relação linear entre duas variáveis quantitativas. Para dados não normais, utilizou-se a correlação de Spearman, que mede a intensidade da correlação entre variáveis ordinais ou quantitativas, baseando-se na ordem das observações em vez dos valores brutos. Esse teste é robusto contra assimetrias na distribuição e valores atípicos, não exigindo que os dados sigam uma distribuição normal (Maroco, 2003; Pestana e Gageiro, 2008). Os valores do coeficiente variam de -1 a +1, indicando uma correlação mais forte à medida que se aproximam das extremidades, representando uma correlação negativa ou positiva, respectivamente, enquanto valores próximos de zero indicam uma correlação fraca ou inexistente.

Com base nos dados coletados, buscou-se responder a algumas questões fundamentais sobre a dinâmica da qualidade da água no reservatório. Primeiramente, analisou-se a existência de variação espacial dentro do sistema, investigando se há diferenças significativas entre os braços do reservatório e a região da barragem. Essa análise permitiu determinar se o ambiente é relativamente homogêneo ou se apresenta uma estrutura mais heterogênea.

Além disso, avaliou-se a influência da sazonalidade e do uso da água para irrigação sobre os padrões de clorofila-a. Um dos aspectos centrais da análise é compreender se as variações temporais seguem um ciclo sazonal ou se são predominantemente reguladas pelo controle da barragem para fins de irrigação. Nesse sentido, também foi investigado se a operação da barragem tem um papel determinante na qualidade da água do reservatório em questão, especialmente no nível de eutrofização ao longo do tempo.

A fim de aprofundar essa análise, a comparação entre pontos específicos do reservatório foi realizada, priorizando a região da barragem e dos braços, em vez de uma avaliação generalizada de todos os pontos de coleta. Essa abordagem permitirá uma compreensão mais detalhada das dinâmicas hidrológicas e ecológicas do sistema, contribuindo para a interpretação dos resultados e sua aplicabilidade na gestão dos recursos hídricos.

5.5. Aplicação da análise trófica para a BHLM

A partir da validação bem-sucedida da calibração do aplicativo AlgaeMAP no reservatório Chasqueiro, será possível analisar a Bacia Hidrográfica como um todo, permitindo a obtenção de resultados ainda pouco explorados. Essa abordagem oferece uma visão abrangente e detalhada da dinâmica do estado trófico a partir da concentração de clorofila-*a*, possibilitando a identificação de padrões e tendências contribuindo significativamente para o entendimento dos fatores que influenciam o estado trófico da região.

A análise trófica aplicada à BHLM envolveu a seleção de 15 corpos hídricos de cada país (Brasil e Uruguai), categorizados como reservatórios naturais ou artificiais e classificados conforme seus principais usos, com destaque para a irrigação, que predomina nos corpos hídricos artificiais.

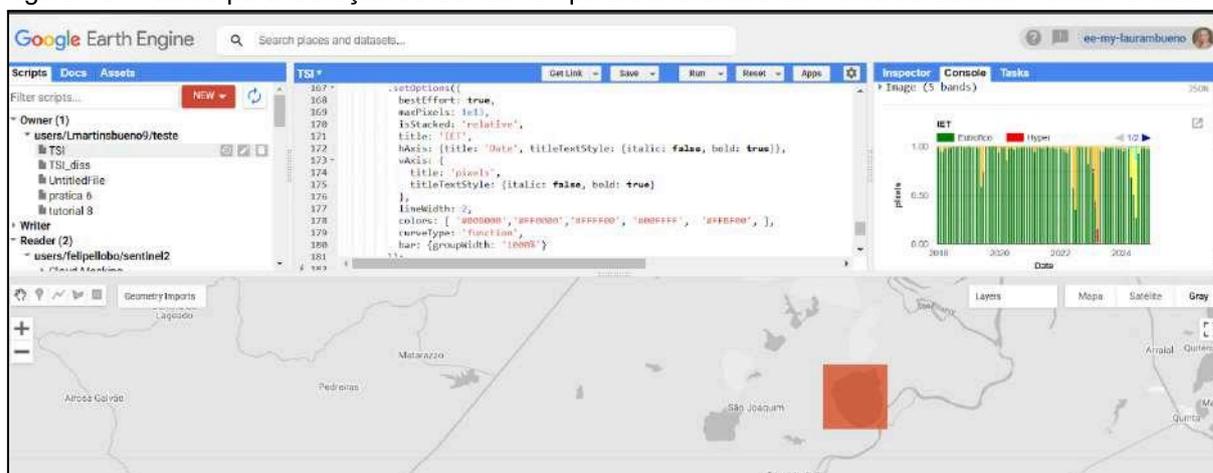
A metodologia combinou a avaliação dos impactos da sazonalidade e do uso da água na qualidade dos ecossistemas aquáticos, com ênfase nos níveis de eutrofização ao longo do período de 2018 a 2024. Para esse fim, foi realizada uma adaptação do aplicativo AlgaeMAP (LOBO, 2021), implementada na plataforma Google Earth Engine (GEE).

O script adaptado iniciou atribuindo a cada imagem da coleção uma data temporal, por meio de funções que configuraram propriedades como “eodate”, derivadas dos atributos ano, mês e dia, e normalizaram os valores do índice NDCI através de uma divisão por 1000. Em seguida, o cálculo do índice de clorofila-*a* (chl_a_NDCI) foi efetuado utilizando uma expressão matemática ($24,49 * ((NDCI_n + 1)^{7,48})$), conforme calibração do AlgaeMAP (LOBO *et al.*, 2021), e os valores do NDCI foram classificados em diferentes estados tróficos com base em limiares preestabelecidos (Figura 2).

A coleção de imagens foi filtrada e ordenada temporalmente, permitindo a criação de séries que evidenciaram a variação da área relativa do Índice de Estado

Tráfico (Figura 18) ao longo dos meses e anos. Essa análise foi viabilizada por meio de gráficos gerados automaticamente após a definição da geometria dos corpos hídricos de interesse no GEE.

Figura 18. Método para Geração de Séries Temporais e Gráficos do Índice de Estado Tráfico no GEE



Fonte: Autora.

Após o processamento no GEE, os arquivos CSV foram exportados para o Excel para reorganização dos níveis tróficos e, posteriormente, a plataforma Google Colab foi empregada na geração de gráficos comparativos do IET entre os lados brasileiro e uruguaio. Essa abordagem proporcionou uma avaliação detalhada das condições ambientais e dos impactos do uso predominante da água na bacia hidrográfica.

6. Resultados e discussão

Este tópico apresenta os resultados do estudo, iniciando com a exposição dos dados coletados *in situ* e a análise estatística descritiva, acompanhada de uma discussão detalhada sobre os valores obtidos para o reservatório Chasqueiro. Em seguida, será conduzida uma análise limnológica aprofundada, visando identificar tendências e padrões desse corpo hídrico ao longo do tempo.

Além disso, será traçado um panorama abrangente da qualidade da água em diferentes corpos hídricos da Bacia Hidrográfica Lagoa Mirim, utilizando a plataforma AlgaeMap e o Google Earth Engine (GEE). Essa abordagem permitirá uma avaliação integrada das condições ambientais da região e de seus possíveis impactos sobre os recursos hídricos locais.

6.1. Parâmetros de qualidade da água

A Tabela 3 apresenta as coordenadas de cada ponto amostral e sua respectiva coleta. Inicialmente, planejou-se realizar todas as coletas nos mesmos cinco pontos amostrais, mantendo coordenadas fixas. No entanto, devido a limitações na qualidade das imagens, foi necessário redistribuir os pontos ao longo do reservatório. Dessa forma, algumas coletas foram realizadas em pontos repetidos, totalizando 20 coordenadas amostrais para 34 pontos, distribuídas em seis campanhas de coleta.

Tabela 3. Data de coletas com respectivos pontos e coordenadas geográficas.

N coleta	Data	Ponto	Coordenada geográfica	
1	15/09/2023	1	-32.146°	-53.044°
		2	-32.152°	-53.032°
		3	-32.163°	-53.018°
		4	-32.142°	-53.011°
		5	-32.132°	-53.005°
2	10/10/2023	6	-32.146°	-53.044°
		7	-32.152°	-53.032°
		8	-32.163°	-53.018°
		9	-32.142°	-53.011°
		10	-32.132°	-53.005°
		11	-32.144°	-53.043°
3	07/02/2024	12	-32.149°	-53.054°
		13	-32.161°	-53.028°
		14	-32.160°	-53.019°
		15	-32.153°	-53.026°
		16	-32.135°	-53.006°
4	08/03/2024	17	-32.146°	-53.044°
		18	-32.152°	-53.032°
		19	-32.163°	-53.018°
		20	-32.142°	-53.011°
		21	-32.133°	-53.003°
5	22/04/2024	22	-32.149°	-53.047°
		23	-32.156°	-53031°
		24	-32.162°	-53.025°
		25	-32.157°	-53.015°
		26	-32.146°	-53.011°
6	01/07/2024	27	-32.149°	-53.047°
		28	-32.156°	-53031°
		29	-32.162°	-53.025°
		30	-32.157°	-53.015°
		31	-32.146°	-53.011°
		32	-32.149°	-53.034°
		33	-32.133°	-53.006°
		34	-32154°	-53.023°

A Tabela 4 apresenta a média das duplicatas de cada parâmetro físico-químico, considerando individualmente cada ponto de coleta. No entanto, três pontos foram desconsiderados devido à presença de partículas de filtro na cubeta durante a análise no espectrofotômetro (ponto 2, 11 e 12), o que comprometeu a leitura e resultou em uma discrepância significativa entre as duplicatas, invalidando a confiabilidade dos resultados.

Tabela 4. Resultados dos parâmetros de qualidade da água analisados.

Ponto	Clorofila-a calculada (µg/l)	Sólidos em suspensão (mg/L)	OD (mg/L)	NTK (mg/L)	Fósforo (mg/L)	pH (pH)	Turbidez (UNT)
1	69,23	16,5	-	0,85	0,078	6,76	33,2
2	-	19	-	1,22	0,089	7,17	36,5
3	47,85	11	-	0,83	0,08	6,65	33,5
4	20,58	14	-	0,83	0,07	6,54	35,5
5	44,64	14,5	-	1,06	0,07	6,53	34,3
6	35,02	8,25	8,17	0,66	0,03	7,96	15,2
7	42,77	7,75	8,35	0,56	0,02	7,49	15,3
8	57,2	4	8,53	0,67	0,03	7,29	16
9	20,05	9	7,98	0,56	0,02	7,21	4,04
10	15,5	6,5	7,8	0,48	0,02	7,2	14,2
11	-	6	8,17	0,55	0,03	7,22	15,7
12	-	5,75	8,13	1,23	0,045	8,18	14
13	17,91	5,5	7,92	0,54	0,04	7,81	4,4
14	17,37	5,5	7,5	0,64	0,043	7,73	4,86
15	34,75	4	8,02	0,67	0,05	7,76	4,45
16	28,6	5	7,08	0,67	0,049	7,8	4,03
17	158,24	9,8	8,04	0,86	0,038	8,27	78
18	83,4	7,9	7,48	0,74	0,04	7,7	7,34
19	55,33	6,4	7,48	0,74	0,023	7,6	6,37
20	54,53	6,6	6,92	0,7	0,019	7,5	5,66
21	47,04	8,4	6,26	0,64	0,024	7,4	7,63
22	36,35	7,7	8,79	0,79	0,01	8,05	14,1

Ponto	Clorofila-a calculada (µg/l)	Sólidos em suspensão (mg/L)	OD (mg/L)	NTK (mg/L)	Fósforo (mg/L)	pH (pH)	Turbidez (UNT)
23	37,42	7,4	8,79	0,71	0,02	7,98	17,3
24	26,2	5,2	7,48	0,55	0,01	7,74	5,8
25	27	6,3	7,66	0,53	0,01	7,65	7,21
26	30,47	6,8	8,32	0,64	0,011	7,65	7,01
27	0,27	6,2	8,52	-	-	8,32	10,8
28	0,8	6	8,52	-	-	8,16	10
29	5,35	5,2	8,52	-	-	8,1	10,4
30	5,88	5,4	8,61	-	-	8	9,9
31	0,53	5,7	8,7	-	-	7,96	10,7
32	0,27	6,5	8,52	-	-	7,77	10,3
33	4,54	6,3	8,98	-	-	7,9	10,3
34	6,68	6,4	8,7	-	-	7,83	10,4
	36,39	-	-	-	-	-	-
	48,12	-	-	-	-	-	-
	24,9	-	-	-	-	-	-
	55,33	-	-	-	-	-	-
Simões	37,87	-	-	-	-	-	-
(2023)	63,94	-	-	-	-	-	-
	57,23	-	-	-	-	-	-
	55,89	-	-	-	-	-	-
	37,75	-	-	-	-	-	-
	62,8	-	-	-	-	-	-

A Resolução CONAMA 357/2005 estabelece parâmetros específicos para águas doces de classe II, visando garantir uma qualidade adequada para diversos usos, como abastecimento humano após tratamento convencional, recreação e preservação da fauna e flora aquática. Dentre esses parâmetros, a turbidez deve ser limitada a 100 UNT, o oxigênio dissolvido (OD) não menos que 5 mg/L, o que é essencial para a saúde dos organismos aquáticos, e a clorofila-a deve estar abaixo de 30 µg/L para evitar a proliferação excessiva de algas. Além disso, o fósforo total

em ambientes lênticos não deve ultrapassar 0,030 mg/L, ajudando a prevenir a eutrofização e preservar o equilíbrio ecológico.

Os valores encontrados de oxigênio dissolvidos variaram entre 6,26 mg/L e 8,98 mg/L. Os elevados níveis de oxigênio dissolvido registrados no Reservatório Chasqueiro podem ser explicados pela produção de oxigênio resultante da fotossíntese realizada pelas algas presentes na água. Ao analisar a qualidade da água em diferentes fases do cultivo de arroz irrigado, MOLOZZI *et al.* (2006) observaram uma concentração elevada de OD em uma das áreas investigadas, esse aumento foi associado a uma abundante presença de macrófitas aquáticas, que desempenham uma atividade fotossintética significativa.

A turbidez apresentou valores variando entre 4,03 UNT e 43,0 UNT. Esses resultados indicam que o parâmetro está em conformidade com o padrão definido. Ressalta-se que a turbidez reduz a penetração de luz na coluna d'água, limitando a energia disponível para a fotossíntese e, conseqüentemente, diminuindo a produção de oxigênio (FARIAS, 2006).

O fósforo total, que não deve ultrapassar 0,030 mg/L em ambientes lênticos, apresentou valores superiores a esse limite. Esse aumento sugere um aporte significativo de nutrientes, o que pode favorecer a proliferação de algas e intensificar processos de eutrofização, comprometendo a qualidade da água e seu uso sustentável. De acordo com SALES *et al.* (2020), em bacias hidrográficas destinadas à agricultura irrigada, o aumento das concentrações de fósforo e nitrogênio pode estar relacionado às práticas agrícolas, como irrigação, uso intensivo de fertilizantes, revolvimento e erosão do solo, além da drenagem. Esses fatores favorecem o crescimento descontrolado de algas, um processo conhecido como eutrofização, que resulta em problemas como a diminuição dos níveis de oxigênio dissolvido e o aumento da taxa de decomposição da matéria orgânica (SCHINDLER *et al.*, 2012).

Estudos recentes de Albertoni *et al.* (2017) analisaram a relação entre nitrogênio e fósforo, bem como a correlação desses nutrientes com as concentrações de clorofila-*a*, e apontaram que as águas do canal São Gonçalo estão passando por um processo de eutrofização. Essa condição favorece a proliferação de cianobactérias, especialmente devido à limitação de nitrogênio. Da mesma forma, Aguiar *et al.* (2015) destacam que o aumento das concentrações de fósforo pode provocar alterações na qualidade da água, afetando parâmetros como

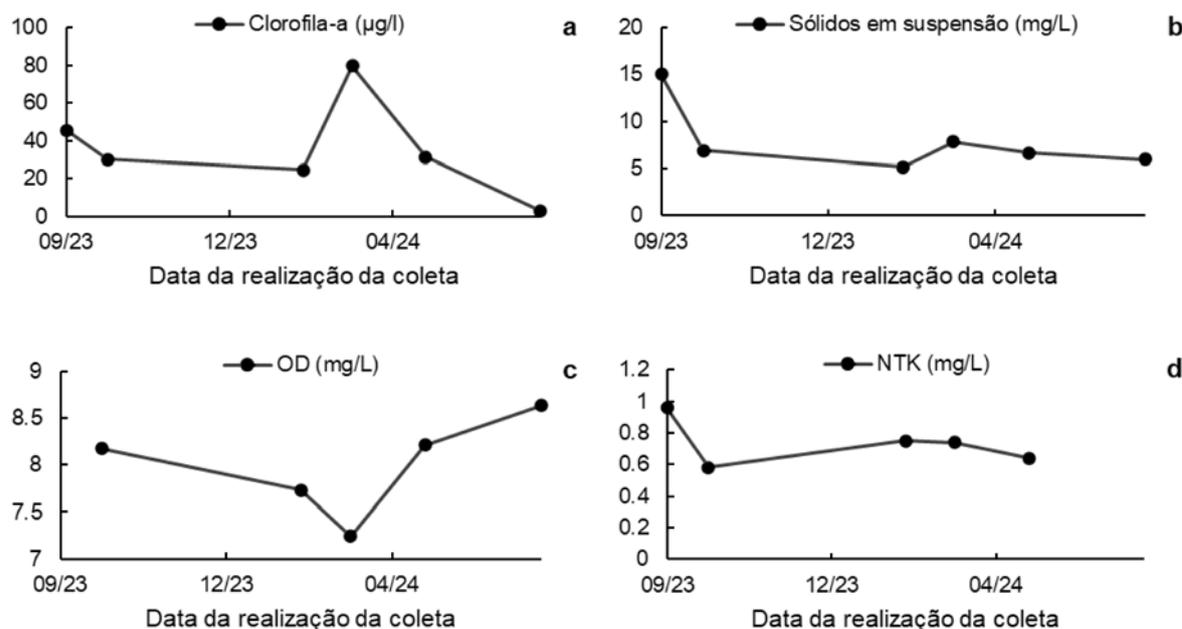
pH, oxigênio dissolvido e transparência, o que pode comprometer tanto o equilíbrio do ecossistema aquático quanto a segurança da água para consumo humano.

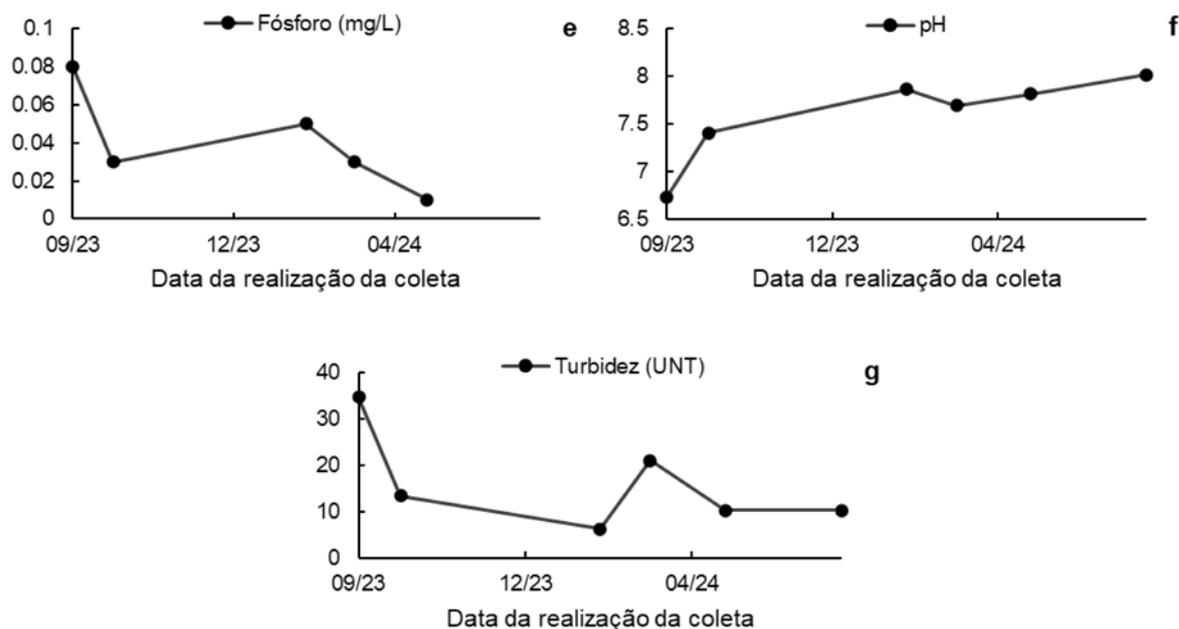
A clorofila-a apresentou concentrações variando de 0,27 $\mu\text{g/L}$ a 158,24 $\mu\text{g/L}$, com alguns pontos ultrapassando o limite recomendado. Esses valores elevados indicam uma alta biomassa fitoplanctônica, possivelmente associada ao excesso de fósforo total. A presença de clorofila-a em sistemas aquáticos é um indicador do impacto da eutrofização, um processo no qual o ecossistema se torna mais produtivo devido ao aumento dos nutrientes (Andrade *et al.*, 2020). Segundo Lamon III *et al.* (1996), além de ser um excelente indicador da biomassa fitoplanctônica, devido à sua facilidade de medição, a clorofila-a é essencial na avaliação da qualidade da água em reservatórios.

O pH variou entre 6,26 e 8,32, mantendo-se dentro da faixa recomendada de 6,0 a 9,0, o que indica estabilidade química adequada para a manutenção dos organismos aquáticos. Segundo Sharip *et al.* (2014), as atividades fotossintéticas das comunidades algais resultam no consumo e remoção do dióxido de carbono (CO_2), processo que leva à produção de oxigênio e ao aumento dos níveis de hidróxido na água, o que, por sua vez, eleva os valores de pH.

A Figura 19 exibe a média dos valores obtidos para todos os parâmetros analisados em cada campanha de coleta.

Figura 19. Média por coleta da concentração de: (a) Clorofila-a, (b) Sólidos em Suspensão, (c) Oxigênio Dissolvido (OD), (d) Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK), (e) Fósforo total, (f) pH, (g) Turbidez





Fonte: Autora.

As figuras apresentam a variação temporal de diferentes parâmetros da qualidade da água no reservatório ao longo das coletas. A análise desses parâmetros permite compreender a dinâmica da água no reservatório.

A concentração de sólidos em suspensão mostra uma tendência de queda ao longo do tempo, sugerindo uma redução na entrada de material particulado no reservatório. Em contrapartida, o pH apresenta uma tendência de aumento ao longo do tempo. Esse comportamento pode estar relacionado à atividade fotossintética da comunidade fitoplanctônica, que consome CO_2 e pode provocar um aumento do pH.

O NTK, na média, se mantém relativamente estável ao longo das coletas, com pequenas variações, e sua estabilidade pode indicar uma fonte contínua de aporte nitrogenado no reservatório.

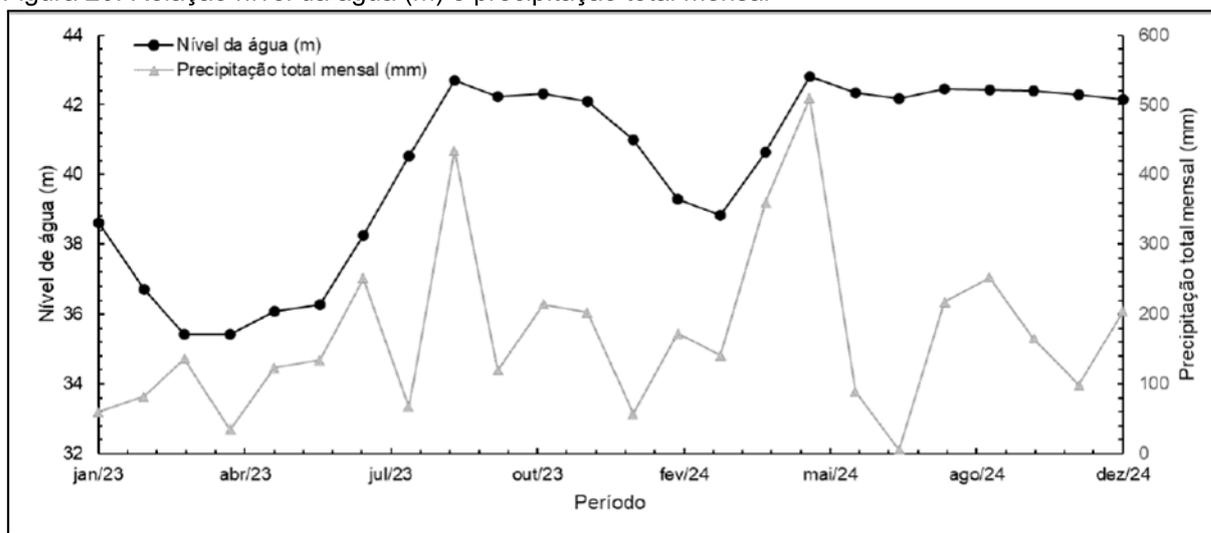
A concentração de clorofila-*a* apresenta uma variação significativa ao longo do período. Nota-se um pico expressivo na quarta campanha de coleta, indicando um possível aumento na biomassa fitoplanctônica, possivelmente relacionado a condições favoráveis de temperatura, luz e disponibilidade de nutrientes. Após esse pico, há uma queda acentuada na última coleta, juntamente com o aumento do OD.

A concentração de fósforo mostra uma tendência decrescente ao longo do tempo. Esse comportamento pode indicar uma redução na entrada de nutrientes no reservatório, possivelmente associada a menor aporte de material orgânico e

inorgânico via escoamento superficial. A queda na disponibilidade de fósforo pode estar diretamente relacionada à diminuição da clorofila-*a* observada na última coleta.

A Figura 20 apresenta a variação do nível da água no reservatório ao longo do período analisado, em comparação com a precipitação mensal total.

Figura 20. Relação nível da água (m) e precipitação total mensal



Fonte: COODIC, 2025.

Observa-se que, entre outubro e fevereiro, ocorre uma redução no nível da água, devido à maior retirada para irrigação. Essa diminuição coincide com períodos de menor precipitação, indicando maior dependência do reservatório para suprir a demanda hídrica agrícola. No Rio Grande do Sul, o período de irrigação para o cultivo de arroz ocorre geralmente de outubro a fevereiro, aproveitando as condições climáticas e a disponibilidade de água durante essa fase (CONAB, 2024).

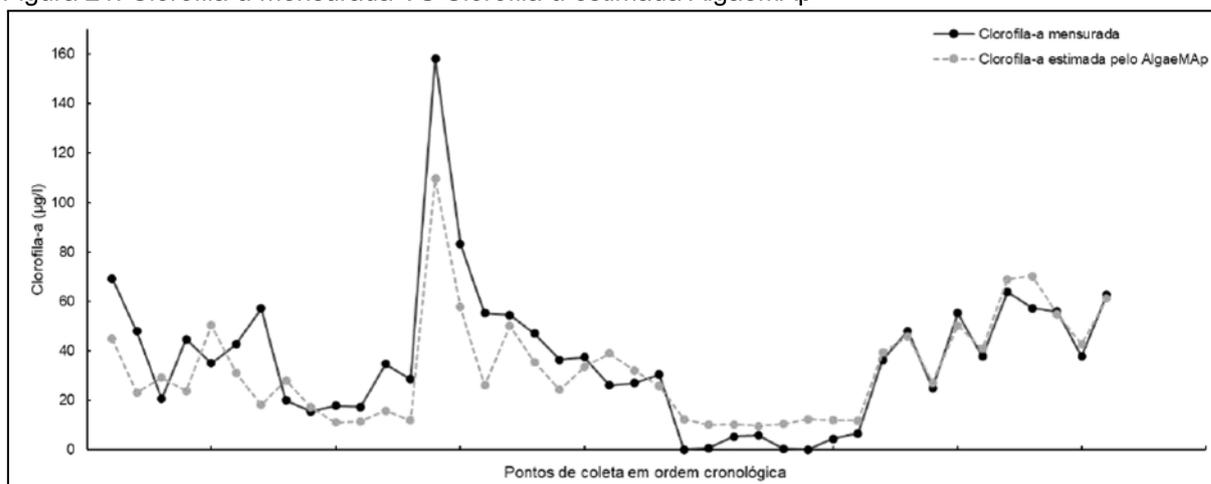
No período de março a agosto, verifica-se uma recuperação do nível da água, resultado do fechamento das comportas aliado ao aumento das precipitações, que favorecem a recarga hídrica natural do reservatório. Embora os dados não indiquem uma relação direta entre precipitação e variação do nível da água, o padrão sazonal reflete a influência do regime de manejo hídrico sobre o reservatório.

Vale destacar que quando as variáveis químicas, como os nutrientes, deixam de ser os principais fatores limitantes do crescimento e reprodução do fitoplâncton, a atenção costuma se voltar para fatores físicos, como o nível da água (Yu *et al.*, 2022). Isso pode ajudar a compreender a ausência de uma associação positiva entre a concentração de clorofila-*a* e os nutrientes em determinadas épocas do ano, conforme observado por Yu *et al.* (2023).

6.2. Validação AlgaeMAP

A Figura 21 ilustra a relação entre os valores de Clorofila-a mensurada e estimados pelo AlgaeMAP. O eixo Y representa a concentração de clorofila-a e o eixo X os pontos de coleta (dispostos em ordem cronológica).

Figura 21. Clorofila-a mensurada VS Clorofila-a estimada AlgaeMAP

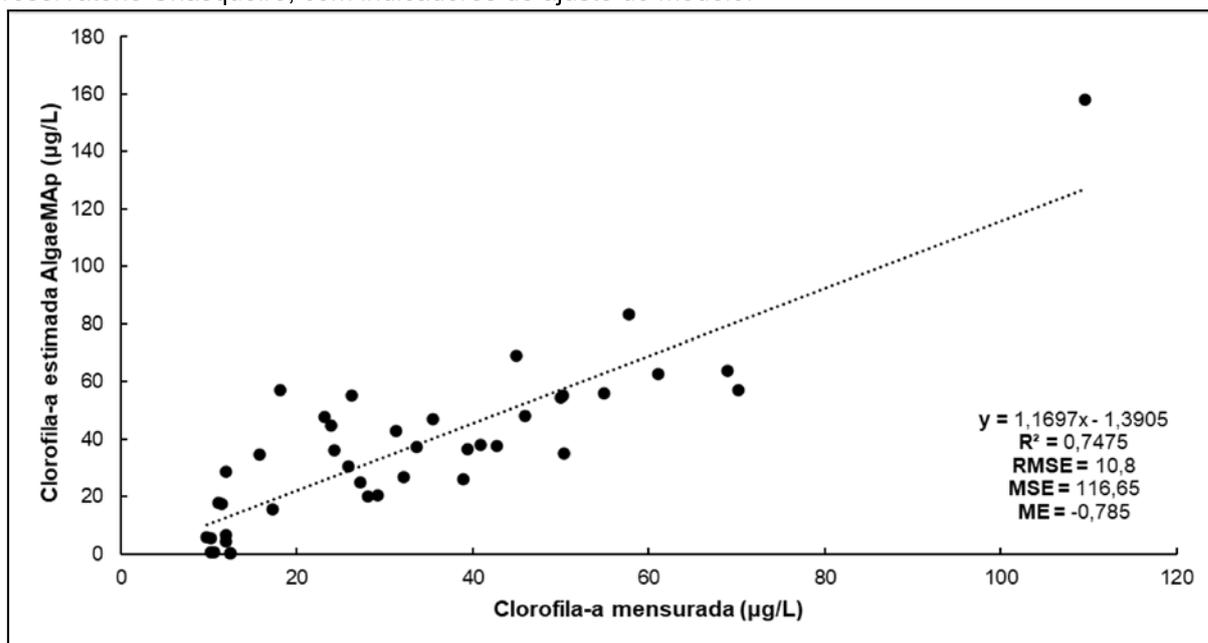


Fonte: Autora

Observou-se uma tendência à superestimação, especialmente para concentrações de Chl-a inferiores a 10 µg/L. Esse resultado indica que o modelo pode apresentar um leve viés, superestimando os valores de Chl-a em condições de menor biomassa algal.

O resultado do modelo (Figura 22) mostra que o coeficiente de determinação (R^2) indica que aproximadamente 74,8% das variações na concentração de clorofila-a são explicadas pelas variáveis do modelo, o que representa um ajuste razoável. A Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) foi de 10,80, apontando uma variação média entre os valores estimados e observados. O Erro Médio (ME) de -0,785 sugere uma leve subestimação nas previsões, enquanto o Erro Quadrático Médio (MSE) de 116,65 reflete o total acumulado dos desvios quadráticos.

Figura 22. Relação entre a clorofila-a estimada pela plataforma AlgaeMAp e clorofila-a calculada para reservatório Chasqueiro, com indicadores de ajuste do modelo.



Fonte: Autora.

De acordo com Lobo *et al.* (2021), os erros de predição tendem a aumentar significativamente quando a concentração de Chl-a ultrapassa 70 µg/L. No entanto, o algoritmo demonstrou um desempenho satisfatório para estimativas de concentrações de Chl-a médias a altas (>10 µg/L), uma faixa onde a ocorrência de florações algais é mais comum.

Chen *et al.* (2024) apresentou um desempenho de modelo robusto na estimativa de Chl-a em lagos oligotróficos, obtendo um R^2 de 0,72 e erros reduzidos (RMSE = 0,49 µg L⁻¹, MAE = 0,38 µg L⁻¹). De forma similar, o trabalho de Cheng *et al.* (2013) demonstrou que a modelagem baseada na separação espectral com parâmetros gaussianos melhora a estimativa de Chl-a, alcançando um R^2 de 0,78 e um RMSE de 4,80 mg/m³. Ademais, o estudo de Caballero (2019) modelou empiricamente a Chl-a e o oxigênio dissolvido (OD) na Lagoa Mirim, RS, Brasil, combinando a reflectância de bandas do sensor MSI/Sentinel-2 com dados *in situ*. Os resultados indicaram que o coeficiente de determinação (R^2) entre 65% a 67%. Sampaio (2023) desenvolveu modelos empíricos para estimar as concentrações de Chl-a, SST e Ceratium, utilizando regressões lineares múltiplas com dados espectrais do Sentinel-2, obtidos via Google Earth Engine, e amostras coletadas *in situ* na Barragem Santa Bárbara, em Pelotas/RS. O modelo apresentou um R^2 de

0,64 e RMSE de 122 para chl-a, sendo utilizado para gerar mapas de distribuição espacial, evidenciando sua aplicabilidade na análise da qualidade da água.

A Tabela 5 apresenta a comparação entre os índices de estado trófico mensurados e estimados pelo AlgaeMAp, com foco na precisão do modelo em estimar o estado trófico de corpos d'água. A análise mostra que o modelo AlgaeMAp tem um desempenho razoavelmente bom para Eutrófico e Super-eutrófico, com 80% e 65% de acerto, respectivamente. No entanto, a precisão diminui para as categorias Ultra-oligotrófico e Hiper-eutrófico, onde a correspondência é mais baixa e os erros de classificação são mais frequentes.

Tabela 5. Comparação do Índice de Estado Trófico Medido e Estimado: Estatísticas de Kappa, Acurácia Global e Qui-Quadrado.

Classificação	Índice de estado trófico estimado AlgaeMAp						Total
	Ultra-oligotrófico	Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico	Super-eutrófico	Hiper-eutrófico	
Ultra-oligotrófico	-	-	2	2	-	-	4
	-	-	50,00%	50,00%	-	-	9,76%
Oligotrófico	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
Mesotrófico	-	-	2	2	-	-	4
	-	-	50,00%	50,00%	-	-	9,76%
Eutrófico	-	-	-	8	2	-	10
	-	-	-	80,00%	20,00%	-	24,39%
Super-eutrófico	-	-	-	6	13	1	20
	-	-	-	30,00%	65,00%	5,00%	48,78%
Hiper-eutrófico	-	-	-	-	2	1	3
	-	-	-	-	66,67%	33,33%	7,32%
Total	-	-	4	18	17	2	
	-	-	9,76%	43,90%	41,46%	4,88%	x

Kappa: 0,46; Acurácia Global: 63,9%; Qui-quadrado: $X^2 = 33,943$ df = 12 p = 0,0006887

Fonte: Autora.

A categoria Ultra-oligotrófico apresenta uma correspondência de 50%, mas a quantidade limitada de dados dificulta uma análise mais robusta. Por essa razão, o AlgaeMAp acaba considerando Oligotrófico e Ultra-oligotrófico como sendo uma única classe (LOBO, *et al.*, 2021).

O desempenho do modelo também pode ser avaliado pelas métricas de Kappa, Acurácia Global e Qui-quadrado. O índice de Kappa (0,46) sugere uma concordância moderada entre as classificações mensuradas e estimadas, o que indica que o modelo tem uma capacidade razoável de prever os índices de estado trófico, mas ainda há margem para melhoria. A Acurácia Global de 63,9% indica que o modelo acerta aproximadamente dois terços das classificações. O teste de Qui-quadrado ($X^2 = 33,943$, $df = 12$, $p = 0,0006887$) revela que as discrepâncias observadas não são devidas ao acaso, confirmando que o modelo tem um desempenho estatisticamente significativo.

Em termos de possíveis fontes de erro, a limitação no número de amostras para algumas classes dificulta a precisão da estimativa para esses grupos. Para melhorar a acurácia do modelo, seria importante aumentar a amostragem nas classes menos representadas.

6.3. Análises estatísticas

Todos os parâmetros analisados não apresentaram distribuição normal, o que justificou o uso do teste não paramétrico de Mann-Whitney. A Tabela 6 apresenta os resultados do teste para os parâmetros analisados, comparando os períodos com e sem retirada de água para irrigação, bem como os valores de clorofila-*a* mensurados e estimados. O valor de *p* indica a significância estatística, sendo que valores inferiores a 0,05 indicam diferença significativa entre os fatores. Já o valor de *H* representa a estatística do teste, refletindo a magnitude da variação observada.

Tabela 6. Teste Mann-Whitney.

Variável	Critério	p-valor	H
Clorofila- <i>a</i>	<i>In situ</i> vs estimada AlgaeMAp	0,531	0,393
Clorofila- <i>a</i>	Irrigação vs Sem irrigação	0,003*	8,74
Sólidos em suspensão	Irrigação vs Sem irrigação	0,781	0,0773
OD (Oxigênio dissolvido)	Irrigação vs Sem irrigação	0,001*	10,623
NTK (Nitrogênio Total Kjeldahl)	Irrigação vs Sem irrigação	0,354	0,861
Fósforo total	Irrigação vs Sem irrigação	0,776	0,0810
pH	Irrigação vs Sem irrigação	0,54	0,375
Turbidez	Irrigação vs Sem irrigação	0,062	3,482

*Significativo ($p < 0,05$).

Fonte: Autora.

A comparação entre os valores calculados e estimados de clorofila-*a* resultou em um p-valor de 0,531, indicando que não houve diferença estatisticamente significativa entre eles. Isso sugere que o AlgaeMAp representa de forma coerente os valores medidos *in situ*.

As coletas 2, 3 e 4 foram consideradas como representativas do período com irrigação, enquanto as coletas 1, 5 e 6 corresponderam ao período sem irrigação. Ao comparar as concentrações de clorofila-*a* entre esses dois períodos, o p-valor de 0,003 e o valor H de 8,74 indicaram uma diferença significativa. Observou-se que as concentrações foram mais elevadas durante o período de irrigação, sugerindo que a retirada de água influencia diretamente a proliferação fitoplanctônica. Essa influência pode estar associada ao aporte de nutrientes provenientes do escoamento superficial concatenado à redução do nível do reservatório, que favorecem o crescimento das algas (Onwuteaka e Choko, 2018; Ilie *et al.*, 2017; Sales *et al.*, 2020).

Estudos anteriores (ROCHA JUNIOR *et al.*, 2018; HAN *et al.*, 2023) demonstraram que as variações no volume de água acumulada nos reservatórios, relacionadas às características climáticas regionais, têm impacto significativo na estabilidade da coluna d'água e na composição da comunidade de cianobactérias, o que por sua vez altera a concentração de biomassa.

O oxigênio dissolvido apresentou diferença significativa entre os períodos analisados, com p-valor de 0,001 e valor H de 10,623. No entanto, é importante destacar que, para essa análise, o período sem irrigação foi representado apenas pela coleta 5, uma vez que não foi possível obter dados de OD nas coletas 1 e 6 devido a limitações logísticas. Considerando essa única data como referência, as concentrações de OD foram menores durante o período com irrigação em comparação ao período sem irrigação. Essa diferença deve ser interpretada com cautela, dado o número limitado de amostras disponíveis para o período sem irrigação.

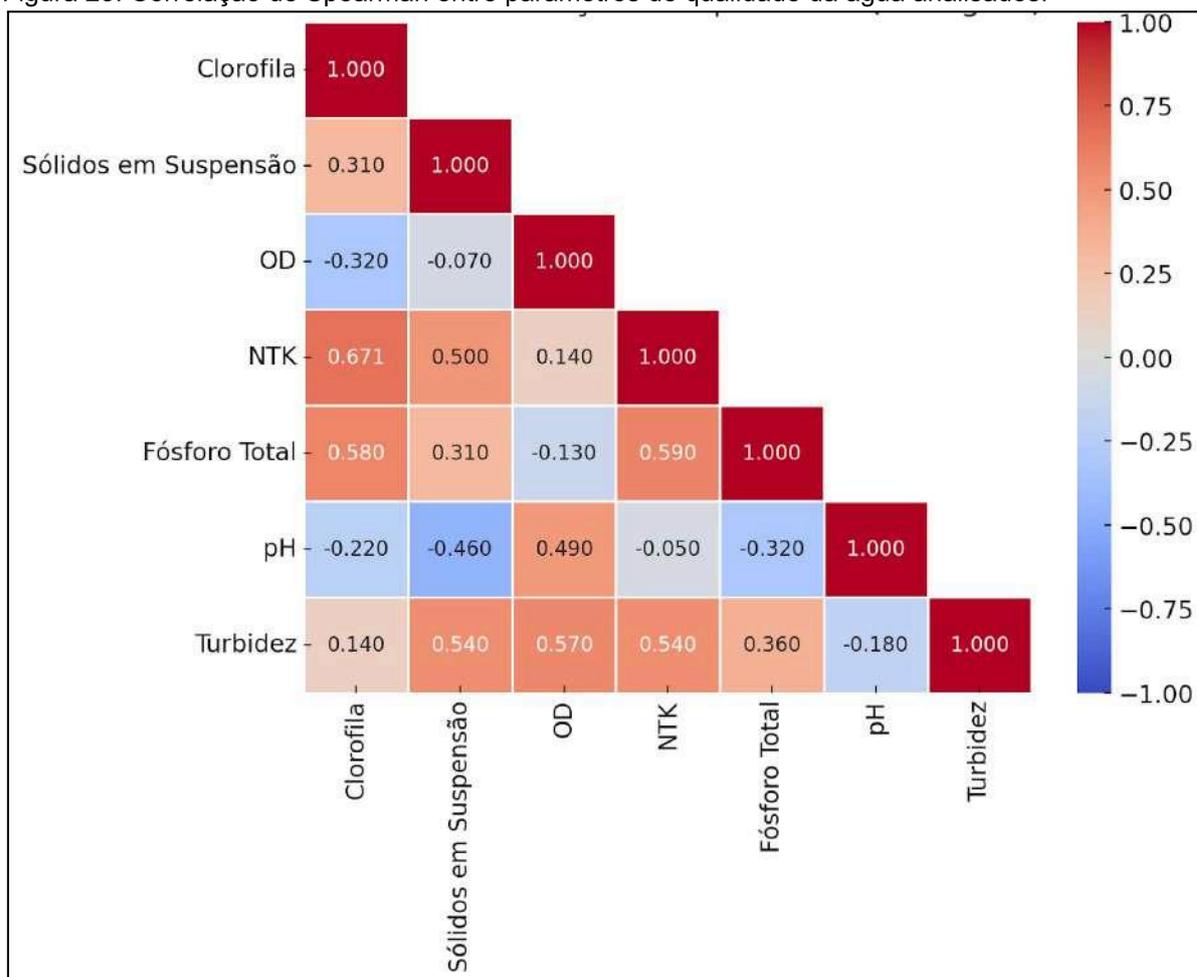
O aumento da temperatura e a redução da pressão são fatores que contribuem para a diminuição do oxigênio dissolvido na água, como ressaltado por Esteves (1998), Cleto Filho (2006) e Nalms (2015). Em lagos rasos, essa tendência é mais pronunciada durante o período chuvoso, quando ocorre um grande acréscimo de matéria orgânica, oriunda de escoamento superficial, efluentes e ressuspensão de sedimentos. Além disso, Verweij *et al.* (2010) observam que a

elevação da temperatura aumenta o consumo de oxigênio, principalmente por microrganismos, como as bactérias e cianobactérias, devido à aceleração da decomposição da matéria orgânica.

Por outro lado, as demais variáveis analisadas sólidos em suspensão, NTK, fósforo total, pH e turbidez não apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre os períodos, com p-valores superiores a 0,05. Isso indica que a retirada de água para irrigação não impactou diretamente de forma expressiva esses parâmetros, sugerindo que a qualidade da água, em termos desses componentes, manteve-se relativamente estável ao longo dos períodos analisados.

A Figura 23 apresenta a correlação de Spearman entre os parâmetros analisados. Relevando relações variadas entre as variáveis estudadas, refletindo as complexas interações no corpo hídrico.

Figura 23. Correlação de Spearman entre parâmetros de qualidade da água analisados.



Fonte: Autora.

Observou-se que a clorofila-*a* apresentou correlação positiva moderada com o nitrogênio total Kjeldahl e fósforo total. No entanto, essas correlações não foram muito elevadas, sugerindo que, embora o enriquecimento por nutrientes desempenhe um papel na proliferação de algas, outros fatores, como condições hidrodinâmicas, temperatura e incidência solar, podem influenciar a variabilidade da clorofila-*a* no ambiente avaliado (Rigosi *et al.*, 2014 ; Kamarainen *et al.*, 2008).

Além disso, a correlação entre NTK e fósforo total revelou um valor alto, corroborando a hipótese de que esses nutrientes estão interligados em seus padrões de aporte e ciclagem no ecossistema aquático. Essa associação, em consonância com estudos prévios (Albertoni *et al.*, 2017; Singh e Yadav, 2025; Li *et al.*, 2020), reforça a importância do equilíbrio entre nitrogênio e fósforo na regulação do crescimento algal e, conseqüentemente, na manifestação dos processos de eutrofização. Esse comportamento é relevante para um corpo hídrico destinado à irrigação, onde o controle da concentração de nutrientes é essencial para evitar o processo de eutrofização.

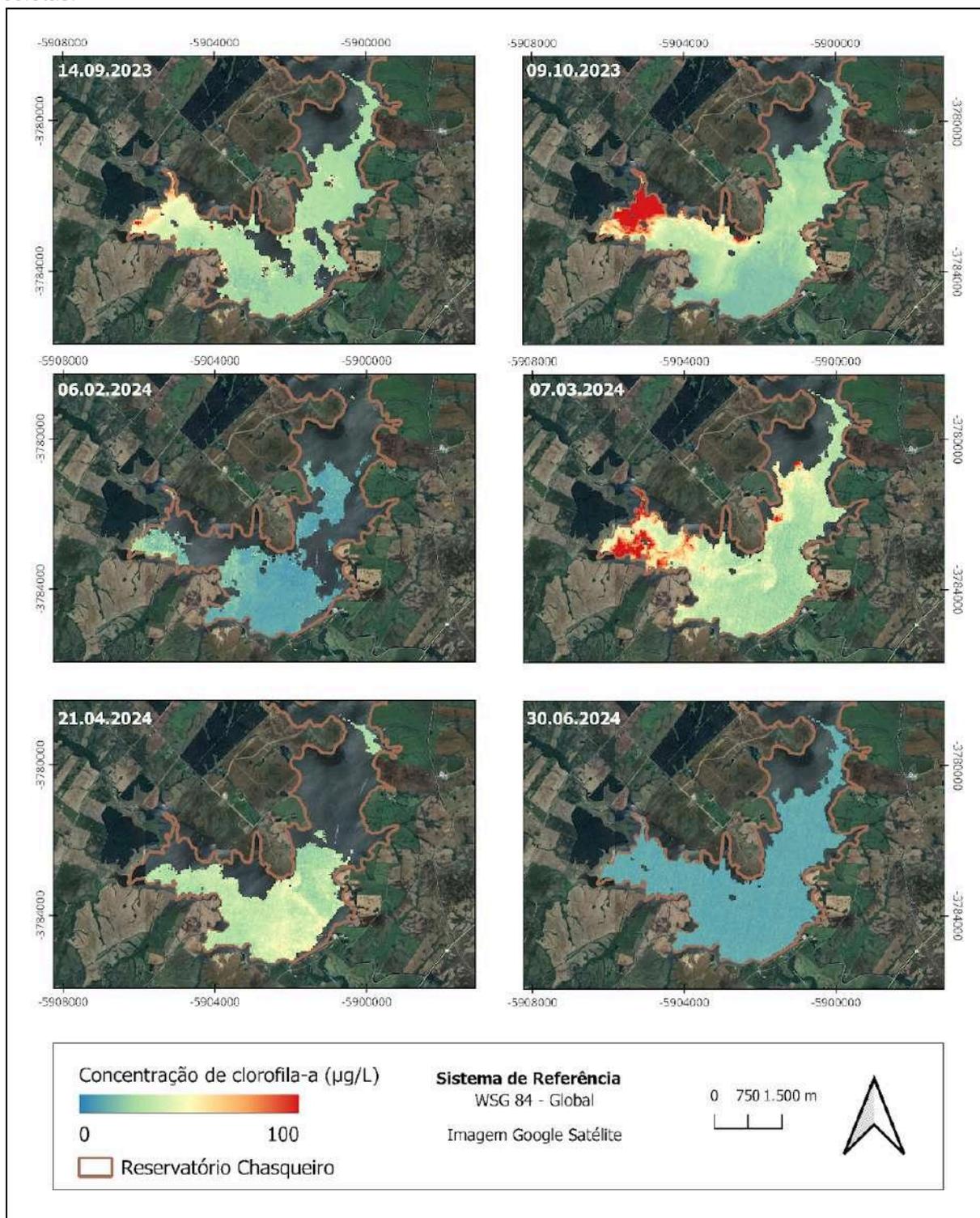
Os sólidos em suspensão mostraram correlação positiva com a clorofila-*a*, indicando que a matéria particulada, possivelmente derivada de células algais e matéria orgânica em decomposição, acompanha, em parte, as flutuações da biomassa fotossintética. Por sua vez, o oxigênio dissolvido apresentou correlação negativa com a clorofila-*a*, o que pode refletir o consumo de oxigênio decorrente da respiração e da decomposição orgânica, especialmente em períodos de alta atividade algal.

É importante ressaltar que, a quantidade amostral limitada pode ter impactado as correlações observadas. Com um número reduzido de amostras, as flutuações naturais podem ser mais evidentes, podendo resultar em correlações menos consistentes.

6.4. Resultados AlgaeMAp

A Figura 24 revela uma variação espacial nas concentrações de clorofila-a no reservatório Arroio Chasqueiro ao longo do ano.

Figura 24. Concentração espacial de clorofila-a no reservatório Chasqueiro nas respectivas datas de coletas.



Fonte: Autora

Observa-se uma elevação expressiva na concentração de clorofila-a no braço esquerdo do reservatório em praticamente todas coletas, o que sugere que essa região pode ser mais suscetível a acumulações de nutrientes. Esse comportamento pode estar relacionado à dinâmica de entrada e saída de água no reservatório, com

o aumento de irrigação e o conseqüente rebaixamento do nível de água, o que tende a concentrar nutrientes em determinadas áreas e favorecer o crescimento de algas. As concentrações de chl-*a* podem ser influenciadas por variações no pH, altas intensidades de luz, temperatura e outros fatores (TALLING *et al.*, 1980). O aumento da clorofila-*a* na estação seca também foi relatado por Ferral *et al.* (2017), Onwuteaka e Choko (2018) e Ilie *et al.* (2017) e esse aumento decorreu provavelmente da elevação na temperatura e da taxa de fluxo de água reduzida.

Em contrapartida, as menores concentrações de clorofila-*a* se distribuíram pela barragem do reservatório e pelo braço direito, onde as flutuações foram menos acentuadas. Esse resultado pode ser explicado pelo maior volume de água nessas regiões e pela maior distância das fontes de poluição pontuais e difusas, o que reforça a influência dos processos de diluição e depuração na melhoria da qualidade da água (Prado, 2007).

No mês de março, período em que o nível d'água do reservatório estava significativamente mais baixo devido ao uso intensivo para irrigação, foi registrada uma maior concentração de clorofila-*a* distribuída ao longo do reservatório. Esse padrão pode ser explicado pela maior concentração de nutrientes associada à redução do volume de água, que potencializa os processos de eutrofização e favorece o crescimento de algas em diferentes regiões do reservatório. O estudo de Sales *et al.* (2020) avaliou a variabilidade da qualidade da água em áreas de agricultura irrigada e verificaram que, durante o período de seca, a concentração de clorofila-*a* foi superior à observada nos períodos de transição e chuvoso.

De acordo com Santos (2020), a diminuição das precipitações, aliada ao aumento das temperaturas, contribuiu para a intensificação da eutrofização, com o conseqüente aumento das concentrações de nutrientes, clorofila-*a*, condutividade e sólidos totais em suspensão.

No mês de julho, período em que o reservatório atingiu seu maior nível de volume, foram registradas as menores concentrações de clorofila-*a*. Esse padrão pode estar associado ao efeito de diluição, uma vez que o aumento do volume de água reduz a concentração de nutrientes disponíveis para o desenvolvimento fitoplanctônico. Além disso, a menor retirada de água para irrigação nesse período contribui para a estabilidade do sistema, minimizando a ressuspensão de sedimentos e a redistribuição de nutrientes na coluna d'água. A redução da temperatura e a menor incidência solar durante o inverno também podem influenciar

negativamente o crescimento algal, limitando a taxa de fotossíntese e a proliferação do fitoplâncton. Ouyang *et al.* (2006) e Ojok *et al.* (2017) destacam a relevância de se caracterizar as variações sazonais na qualidade da água superficial, uma vez que essa análise é fundamental para compreender as tendências temporais da poluição difusa nos rios, resultante tanto de fontes naturais quanto antropogênicas, incluindo fontes pontuais e não-pontuais.

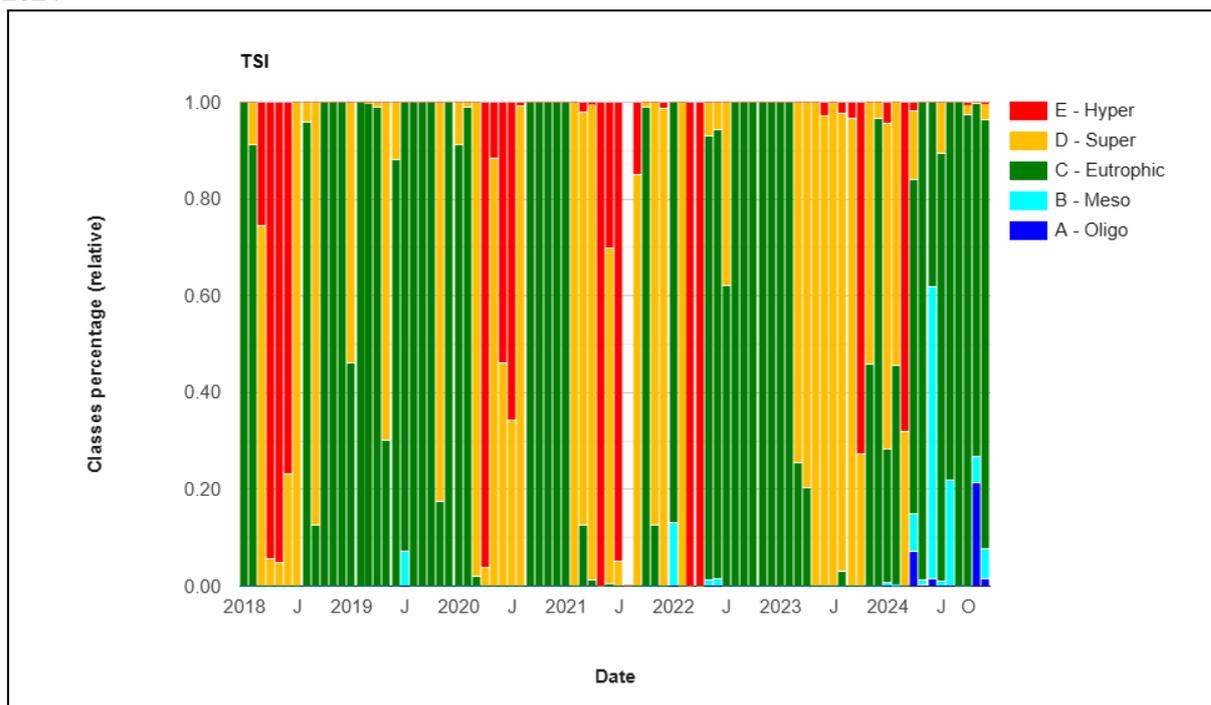
O estudo conduzido por Tormam *et al.* (2017) investigou parâmetros de qualidade da água na Bacia Hidrográfica da Lagoa Mirim, avaliando também a variação sazonal de variáveis como temperatura, condutividade elétrica, demanda química de oxigênio (DQO), nitrogênio total (NT), fósforo total (PT), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), pH, turbidez, coliformes totais, sólidos totais, oxigênio dissolvido (OD) e salinidade. Observou-se que as concentrações de nitrogênio total e fósforo total apresentaram relação com o início e o término da safra de arroz, evidenciando a influência das atividades agrícolas na qualidade da água. Além disso, as variações térmicas foram associadas às características climáticas da região, que possui estações do ano bem definidas, refletindo diretamente nos níveis de oxigênio dissolvido. Esses parâmetros, especialmente nutrientes, a temperatura da água e a turbidez, têm grande influência na concentração de clorofila-*a* (TALLING *et al.*, 1980).

A variação sazonal das concentrações de clorofila-*a* é determinada por uma série de fatores, como o aumento da atividade biológica, características hidráulicas, como a vazão e a velocidade da água, além das particularidades da bacia hidrográfica, que pode ser predominantemente ocupada por atividades agrícolas, industriais ou urbanas, influenciando diretamente o sistema aquático em estudo (Chai *et al.*, 2006; Neal *et al.*, 2006; Wysocki *et al.*, 2006).

O Índice de Estado Trófico (IET) é uma ferramenta amplamente utilizada para a classificação de corpos d'água, levando em consideração a concentração de fósforo total, a clorofila-*a* e o disco de Secchi, permitindo a determinação do grau de trofia das águas (Barreto *et al.*, 2013).

A Figura 25 apresenta a área relativa do Índice de Estado Trófico no Reservatório Chasqueiro entre 2018 e 2024, destacando a distribuição das classes tróficas ao longo dos anos.

Figura 25. Área Relativa do Índice de Estado Trófico no Reservatório Chasqueiro: Análise de 2018 a 2024



Fonte: Autora

Os ecossistemas aquáticos são classificados conforme o nível de trofia em: Oligotrófico, com baixa concentração de nutrientes, águas claras, peixes de águas frias e alta concentração de oxigênio dissolvido; Mesotrófico, com um acúmulo moderado de sedimentos e crescimento planctônico moderado; Eutrófico, com altos níveis de nutrientes, intensa produção planctônica e baixos níveis de oxigênio dissolvido; e Hipereutrófico, que apresenta uma grande quantidade de algas, plantas aquáticas e nutrientes (Espírito Santo, 2021).

A análise do comportamento temporal do estado trófico do reservatório Chasqueiro, representada na Figura 25, evidencia variações importantes ao longo dos anos. Observa-se que, embora o estado eutrófico seja predominante, há flutuações significativas entre as classes mesotrófica, supereutrófica e hipereutrófica, especialmente nos anos de 2022 e 2024, quando a distribuição entre as classes se torna mais heterogênea.

Além disso, evidencia uma dinâmica sazonal no IET do reservatório Chasqueiro, indicando que os maiores níveis de eutrofização ocorrem, geralmente, no início do ano, estendendo-se até o primeiro semestre do ano. Esse comportamento varia a cada ano, possivelmente influenciado por fatores ambientais e pelo uso do reservatório. De acordo com Figueirêdo *et al.* (2007), a expansão

urbana, as atividades agropecuárias e o desmatamento potencializam o processo de eutrofização em fontes de água.

O aumento das classes hipereutrófica e supereutrófica em determinados períodos pode estar associado ao acúmulo de nutrientes decorrente do uso agrícola nas proximidades e ao reduzido volume de água em momentos críticos, como o início e o fim do período de irrigação. Por outro lado, a presença de classes mesotróficas e oligotróficas, embora menos frequente, indica que há momentos de melhora na qualidade da água, possivelmente interligadas com efeito de diluição com o aumento da precipitação e diminuição de pressão antrópica.

A eutrofização progressiva nos meses analisados pode impactar diretamente a qualidade da água utilizada para irrigação, principal destinação do reservatório Chasqueiro. Isso reforça a necessidade de estratégias de manejo que contemplem práticas como o monitoramento contínuo da qualidade da água, a gestão eficiente do uso hídrico e a implementação de boas práticas agrícolas nas áreas ao redor do reservatório.

Os resultados deste estudo corroboram com pesquisas anteriores que demonstram o impacto significativo do fósforo no crescimento de algas em corpos d'água lênticos (Filstrup e Downing, 2017; Mamun *et al.*, 2018; Atique e An, 2018). A formulação de planos de gestão eficazes para mitigar os efeitos ecológicos em tais sistemas depende de uma compreensão específica da dinâmica dos nutrientes (Tabrett *et al.*, 2024).

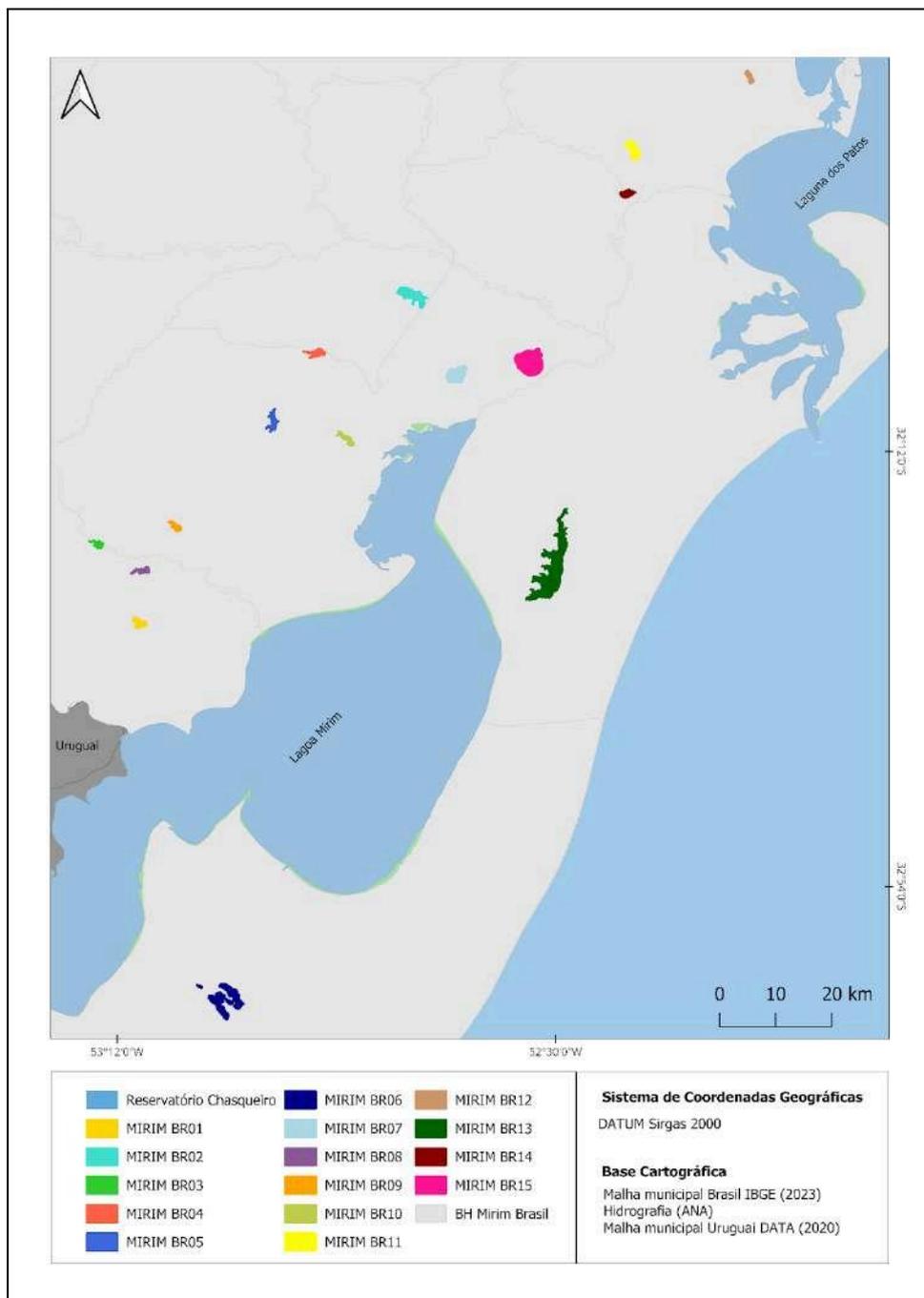
O estudo realizado por Fia *et al.* (2009) revelou que o estado trófico da Bacia Hidrográfica da Lagoa Mirim é caracterizado por uma instabilidade. Em determinados períodos, o estado trófico indica uma melhoria na qualidade da água, enquanto em outros, os valores se tornam críticos, especialmente no Canal São Gonçalo e na Eclusa, sugerindo uma deterioração na qualidade das águas.

Resultados semelhantes foram observados por Coradi *et al.* (2009) ao avaliarem a qualidade das águas dos principais afluentes da Lagoa Mirim. A pesquisa concluiu que a qualidade hídrica desses afluentes era, em geral, considerada aceitável, com o fósforo sendo identificado como o principal poluente que impacta a qualidade das águas.

6.5. Bacia Hidrográfica Lagoa Mirim

A Figura 26 representa os corpos hídricos selecionados para a análise trófica no lado brasileiro da Lagoa Mirim.

Figura 26. Mapa de localização dos 15 corpos hídricos brasileiros selecionados para análise do índice de estado trófico.



Fonte: Autora.

A seleção priorizou corpos hídricos de tamanho considerável, visando garantir a obtenção de resultados mais robustos e representativos. Destaca-se que a maioria dos corpos hídricos na Bacia Hidrográfica da Lagoa Mirim é de origem artificial, com

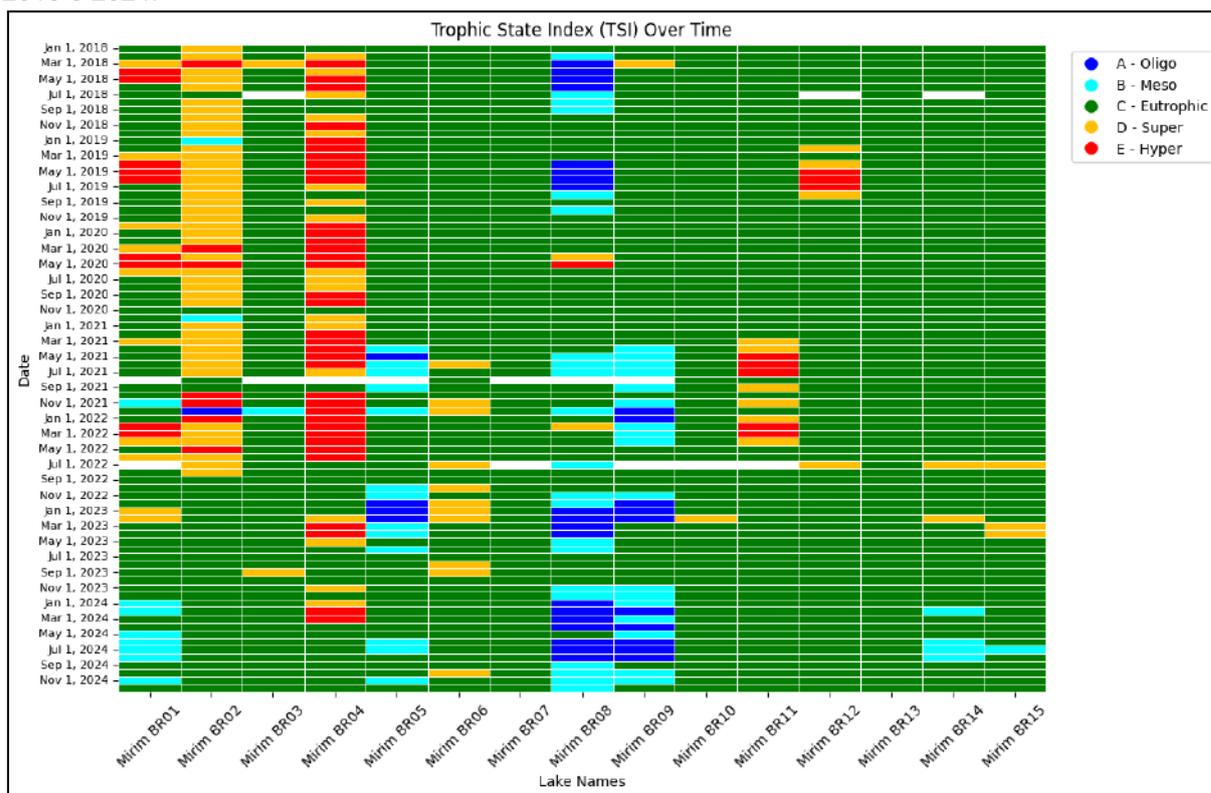
predominante utilização para atividades agropecuárias, especialmente irrigação, embora também existam corpos hídricos naturais na região. Além disso, a Tabela 7 apresenta a descrição dos corpos hídricos analisados, incluindo seus nomes, destinação e natureza. O resultado do IET está representado na Figura 27, onde são ilustradas as classificações tróficas dos corpos hídricos analisados. A figura destaca a distribuição espacial dos diferentes níveis tróficos, permitindo a identificação de padrões e possíveis fatores que influenciam a qualidade da água na região estudada.

Tabela 7. Caracterização de corpos hídricos do lado brasileiro.

Identificação	Corpo hídrico	Nome original	Natureza	Uso principal
MIRIM BR01	Açude Guarita	Barragem 0856/13	Artificial	Irrigação
MIRIM BR02	Açude dos Schuch		Artificial	Irrigação
MIRIM BR03	Barragem Agropecuária Rastilho Ltda.		Artificial	Irrigação
MIRIM BR04	Barragem da Palma		Artificial	Agropecuária
MIRIM BR05	Arroio Sarandi		Artificial	Irrigação
MIRIM BR06	Banhado do Arroio Del Rey		Artificial	Irrigação
MIRIM BR07	Estância sangradouro	Barragem 1109/07	Artificial	Irrigação
MIRIM BR08	Barragem Hermínio Braga Lucena		Artificial	Irrigação
MIRIM BR09	Barragem João Walter Ribeiro		Artificial	Irrigação
MIRIM BR10	Barragem Luiz Duarte Ribeiro da Costa		Artificial	Irrigação
MIRIM BR11	Represa Santa Bárbara		Artificial	Abastecimento
MIRIM BR12	Barragem Gustavo Ayub Lara		Artificial	Irrigação
MIRIM BR13	Lagoa Caiubá		Natural	Irrigação, pecuária e pesca
MIRIM BR14	Lagoa Fragata		Natural	Abastecimento
MIRIM BR15	Lagoa formosa		Artificial	Irrigação

Fonte: Autora.

Figura 27. Resultado do índice de estado trófico dos 15 corpos hídricos brasileiros supracitados entre 2018 e 2024.



Fonte: Autora

Observa-se que a variação dos valores de IET ao longo dos anos reflete tanto os processos naturais quanto às influências antrópicas, principalmente relacionadas ao uso da água para irrigação e abastecimento.

A análise temporal revela que a maioria dos corpos hídricos mantém-se no estado eutrófico, indicando concentrações moderadas a altas de nutrientes, favoráveis ao crescimento de algas.

É possível observar que entre 2018 e 2020 há momentos em que alguns reservatórios atingem estados supereutrófico e hipereutrófico, sugerindo picos de concentração de Chl-a que podem estar associados ao aumento na disponibilidade de fósforo e nitrogênio na coluna d'água. Esses períodos coincidem com ciclos agrícolas intensivos e variações sazonais no regime hidrológico, evidenciando a relação entre o uso da terra e a qualidade da água. Essa oscilação pode ser marcada pela influência direta do manejo agrícola, que adiciona nutrientes à coluna d'água através de esgotos, fertilizantes e outras práticas conforme apontado por estudos de Quinton *et al.* (2001), Sousa *et al.* (2018) e Veiga (2010).

Compreender a dinâmica da qualidade da água é essencial, pois esse fator representa um indicador fundamental da saúde dos ecossistemas (Kwong *et al.*, 2022). Vale ressaltar que nas áreas em torno da Lagoa Mirim, as águas são amplamente utilizadas para irrigação de lavouras de arroz (Oliveira *et al.*, 2015; Albertoni *et al.*, 2017; Gallego *et al.*, 2017), a influência da atividade agrícola é evidente. Gallego *et al.* (2017) identificaram que bacias hidrográficas com uma maior proporção de áreas agrícolas apresentaram um aumento nos indicadores de eutrofização e Guidotti (2023) identificou a presença de agrotóxicos na Lagoa Mirim e em seus afluentes, sendo que as águas mais próximas de áreas agrícolas apresentaram as maiores concentrações dessas substâncias.

Embora a maioria dos corpos hídricos seja utilizada para irrigação, os reservatórios MIRIM BR11 e MIRIM BR14, que possuem destinação para abastecimento, apresentam um comportamento distinto, com menor frequência de estados tróficos mais elevados. Esse padrão pode estar relacionado a um maior controle na captação e no monitoramento da qualidade da água para consumo humano. No entanto, mesmo esses reservatórios não estão imunes à variação da Chl-a, reforçando a necessidade de medidas de manejo para mitigar a eutrofização.

Outro aspecto relevante é a alternância entre estados mesotrófico e oligotrófico observada em determinados períodos, especialmente nos corpos hídricos MIRIM BR06, MIRIM BR07 e MIRIM BR10. Esse padrão pode indicar maior renovação da água, seja por um fluxo mais dinâmico nesses reservatórios, seja por uma menor entrada de nutrientes em determinados períodos do ano. A sazonalidade e a influência das precipitações são fatores determinantes na dinâmica da qualidade da água, pois influenciam tanto a diluição quanto o aporte de nutrientes provenientes do escoamento superficial. Ainda que esses corpos hídricos sejam utilizados de forma mais particular, o que dificulta a obtenção de resultados conclusivo, eles evidenciam a necessidade de estudos adicionais para uma compreensão mais aprofundada de seus mecanismos de renovação e das variações de qualidade da água.

O estudo de Fia (2009) selecionou 11 pontos amostrais na foz de diferentes corpos hídricos afluentes à Lagoa Mirim e apresentou os resultados da análise da qualidade da água. Os corpos d'água avaliados recebem esgotos urbanos e efluentes industriais sem tratamento, resultando no aporte de material orgânico rico em nutrientes, muitas vezes excedendo a capacidade depurativa natural. Esse

processo contribui para a redução da qualidade da água e intensifica a eutrofização em alguns dos ambientes analisados.

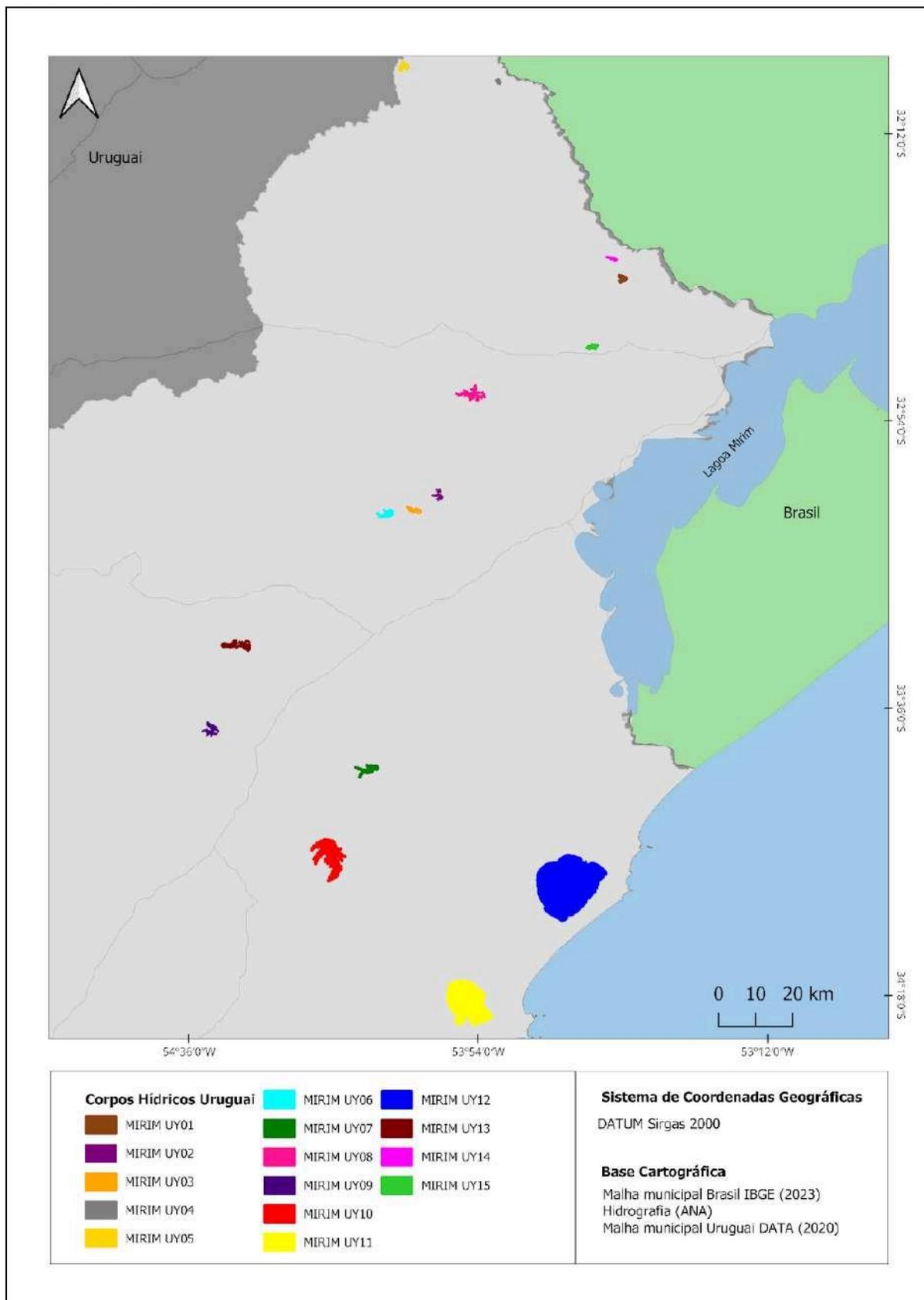
Embora a qualidade da água apresenta variações ao longo do tempo, não foi identificado um padrão sazonal consistente em todos os reservatórios. Eventos climáticos extremos, como períodos de chuvas intensas ou estiagens, podem desencadear processos de eutrofização. No entanto, essa resposta não ocorre de forma sistemática, indicando que fatores locais, como o uso e ocupação do solo, práticas agrícolas e dinâmicas hidrológicas, desempenham um papel essencial na determinação dessas variações (Rigosi *et al.*, 2014 ; Kamarainen *et al.*, 2008).

O estudo de Souza *et al.* (2017) investigou a qualidade das águas superficiais na área de agricultura irrigada do Projeto de Irrigação de Cotinguiba/Pindoba, localizado no Baixo São Francisco Sergipano, utilizando o índice de estado trófico (IET). Os resultados indicaram que a sazonalidade teve um impacto significativo nos índices de qualidade, com os melhores resultados ocorrendo no período chuvoso, caracterizado como oligotrófico. Durante a estação seca, a drenagem dos lotes de arroz aumentou a concentração de nutrientes, o que fez com que o IET médio fosse classificado como mesotrófico.

O monitoramento contínuo da Chl-a e de outros parâmetros limnológicos é essencial para compreender melhor a dinâmica trófica e prever possíveis impactos ambientais. Estratégias de manejo, como o controle da carga de nutrientes, a proteção das áreas de recarga e a regulação do uso da terra nas áreas adjacentes, são fundamentais para minimizar os impactos da eutrofização e garantir a sustentabilidade dos usos múltiplos da água na região.

A Figura 28 representa os corpos hídricos selecionados para a análise trófica no lado uruguaio da Lagoa Mirim, com suas descrições e resultados, na Tabela 8 e Figura 29, respectivamente.

Figura 28. Mapa de localização dos 15 corpos hídricos uruguaios selecionados para análise do índice de estado trófico



Fonte: Autora

Tabela 8. Caracterização de corpos hídricos do lado uruguaio.

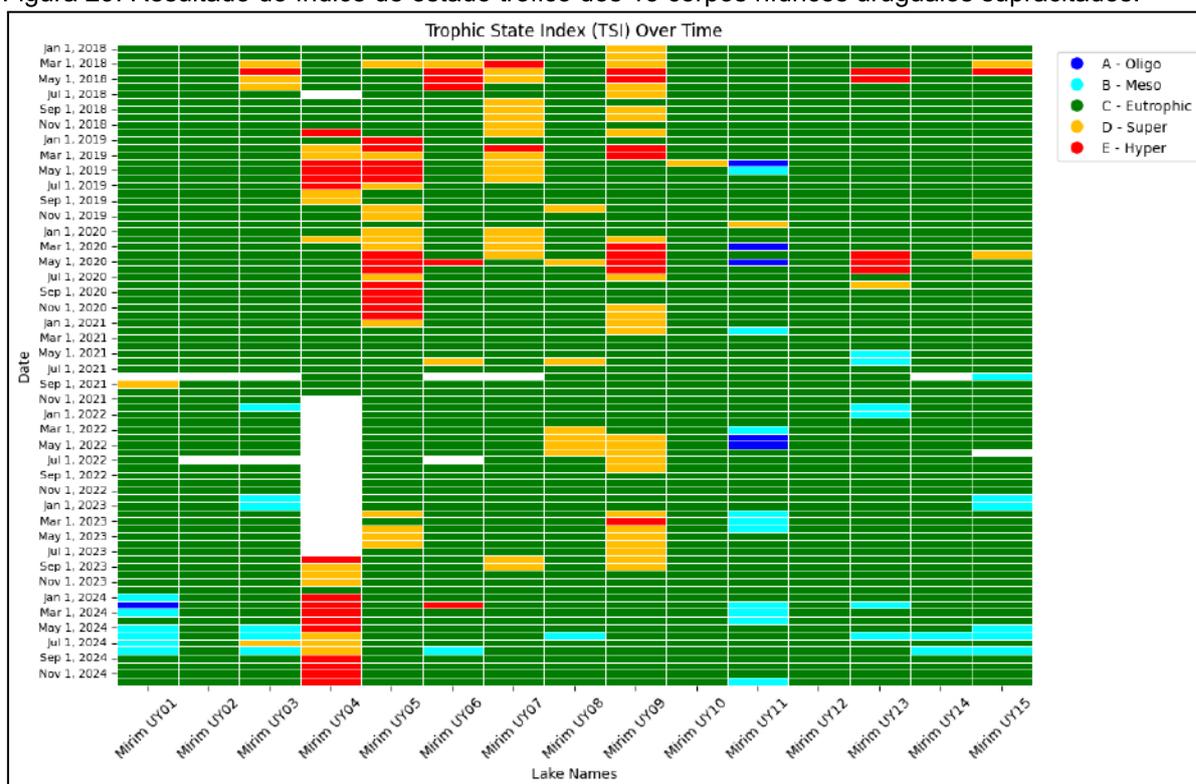
Identificação	Corpo hídrico
MIRIM UY01	Arrozal Rosales
MIRIM UY02	Arrozera las palmas
MIRIM UY03	Arrozera Santa Fé
MIRIM UY04	Barragem Mangrullo *
MIRIM UY05	Barragem Puesto de Estância *
MIRIM UY06	Barragem Santa Fé "2" *
MIRIM UY07	Embalse Estância Gaúcho
MIRIM UY08	Estacao Rincon
MIRIM UY09	Estancia el Butia
MIRIM UY10	Índia Muerte
MIRIM UY11	Laguna de Castilhos
MIRIM UY12	Laguna negra
MIRIM UY13	Barragem de Los Cotto *
MIRIM UY14	Puente de las Mercedes
MIRIM UY15	Barragem Walter Albernaz

* Sem identificação

Fonte: Autora.

Vale ressaltar que a tabela inclui os nomes dos corpos hídricos selecionados, mas, devido à ausência de informações sobre alguns deles, foi necessário acrescentar o nome da região. Os corpos hídricos marcados com * não possuíam identificação prévia. Além disso, a maior parte da área em estudo é caracterizada pelo uso predominante para irrigação e pela presença de corpos hídricos de origem artificial. A ausência dessas informações dificulta a análise detalhada e a interpretação precisa dos dados

Figura 29. Resultado do índice de estado trófico dos 15 corpos hídricos uruguaios supracitados.



Fonte: Autora

A Figura 29 apresenta a variação temporal dos estados tróficos dos corpos hídricos uruguaios da Bacia Lagoa Mirim, demonstrando uma predominância de condições eutróficas, com episódios recorrentes de estados supereutróficos e hipereutróficos durante o período analisado.

Dentre os corpos hídricos monitorados, destacam-se MIRIM UY04 e MIRIM UY05, que apresentam os níveis mais elevados de eutrofização, com frequentes registros de estados supereutróficos e hipertróficos. Esses corpos hídricos estão situados na porção mais próxima à fronteira com o Brasil, o que pode indicar uma influência de atividades antrópicas mais intensas nessa região, como práticas agrícolas, pecuária e outros usos da terra que contribuem para o aporte de nutrientes.

Por outro lado, os lagos localizados mais ao sul, como MIRIM UY10, MIRIM UY11 e MIRIM UY12, apresentam menores níveis de eutrofização ao longo do período analisado. Embora esses corpos hídricos também registrem eventos de eutrofização, eles são menos frequentes e, na maior parte do tempo, permanecem em estados mesotróficos ou mesmo oligotróficos. Esse padrão pode estar

relacionado a uma menor influência antrópica direta, fluxos hidrológicos distintos ou diferenças nas características físicas e químicas da água.

Análises realizadas no ano de 2023 na Lagoa Mirim (Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental, 2023) indicaram que a concentração de clorofila-a na bacia permaneceu baixa, sem representar riscos significativos para a qualidade da água. Esses resultados corroboram com a maioria dos dados observados nos corpos hídricos apresentados na Figura 27, que se apresentam mesotrófico e eutrófico.

O estudo realizado na Bacia Hidrográfica da Lagoa Mirim (Ministro de Ambiente, 2021) com foco nos principais afluentes localizados no território uruguaio, envolveu a análise das estações de monitoramento de diversos rios que deságuam na laguna, como os rios Yaguarón, Tacuarí, Cebollatí, Olimar Grande, San Luis e San Miguel no período de 2015 a 2019. Os resultados indicaram condições eutróficas, com episódios recorrentes de estados supereutróficos e hipereutróficos, destacando as dinâmicas complexas da bacia em relação à qualidade da água.

Esse monitoramento contínuo da qualidade da água é essencial para a gestão dos recursos hídricos, sobretudo em regiões onde a agropecuária exerce papel principal, pois possibilita a identificação de padrões sazonais, a avaliação dos impactos climáticos e a mensuração da influência das atividades humanas. De acordo com Lajmanovich e Peltzer (2008), o cultivo de arroz pode causar impactos ambientais significativos, especialmente devido ao uso de agroquímicos que podem comprometer os recursos hídricos e os ecossistemas aquáticos. A aplicação de pesticidas e fertilizantes nos arrozais pode gerar poluentes que prejudicam tanto a qualidade da água quanto a biodiversidade local.

O estudo de Kruk *et al.* (2022) aborda as questões socioambientais no território da Lagoa Mirim, no lado uruguaio. Destaca a intensificação da agricultura, que altera o ciclo hidrológico e provoca conflitos socioambientais, afetando tanto os valores patrimoniais quanto a saúde das comunidades locais. Em relação à qualidade da água, foram observados sérios problemas, com descumprimento das normas ambientais, incluindo altas concentrações de contaminantes agrícolas, como pesticidas e nutrientes, o que prejudica os ecossistemas e a saúde das pessoas que dependem desses recursos. A conversão de zonas húmidas em plantações de arroz, que utilizam grandes quantidades de agroquímicos, tem gerado contaminação nos rios e riachos devido ao escoamento superficial, além de afetar a qualidade das

águas subterrâneas pela infiltração. Isso tem agravado os problemas ambientais e comprometido os recursos hídricos da região (Achkar, Domingues e Pesce, 2012).

Observa-se que alguns reservatórios mantêm comportamentos estáveis, enquanto outros apresentam flutuações mais acentuadas, possivelmente decorrentes de variações no manejo da irrigação, na conectividade hidrológica e na intensidade das atividades agrícolas locais. Tais diferenças ressaltam a necessidade de estratégias de gestão específicas para cada sistema, com o intuito de mitigar os efeitos da eutrofização e promover a sustentabilidade dos recursos hídricos. Segundo Ministro de Ambiente (2021), a agricultura é a principal fonte de nutrientes que afetam a qualidade da água na região, especialmente na parte inferior da bacia, onde o cultivo de arroz exerce grande pressão sobre os corpos hídricos. A pecuária, incluindo a atividade leiteira, também contribui para essa degradação. A mudança no uso do solo pode influenciar a carga de nutrientes, destacando a necessidade de práticas agrícolas sustentáveis. Além disso, eventos como chuvas intensas e descargas acidentais podem impactar a qualidade da água, dificultando a correlação com o uso do solo devido à baixa frequência de monitoramento.

Embora se observe variações temporais na qualidade da água, não há um padrão sazonal uniforme em todos os reservatórios. Eventos climáticos extremos, como chuvas intensas ou estiagens, podem ocasionar períodos de eutrofização. Contudo, essa resposta não se manifesta de maneira sistemática, sugerindo que fatores locais incluindo o uso do solo, práticas agrícolas e características hidrodinâmicas exercem influência determinante.

Essa constatação reforça a necessidade de um monitoramento contínuo e detalhado, fundamental para identificar os principais agentes de degradação e para a elaboração de estratégias de manejo e conservação mais eficazes na região da Lagoa Mirim.

As variações nos parâmetros de qualidade da água ao longo das diferentes estações refletem o entendimento de como a temperatura e a dinâmica dos nutrientes influenciam os ecossistemas aquáticos (Sun *et al.*, 2023). A clorofila-*a* em sistemas aquáticos indica o impacto da eutrofização, um processo no qual um ecossistema se torna progressivamente mais produtivo devido ao aumento de nutrientes (Andrade *et al.*, 2020).

7. Conclusões

Diante do exposto, é possível concluir que, a análise dos parâmetros de qualidade da água do Reservatório Chasqueiro indicou que, apesar de a turbidez, oxigênio dissolvido (OD) e pH estarem dentro dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/2005, o fósforo total e a clorofila-a apresentaram níveis elevados, sugerindo processos de eutrofização e um potencial impacto negativo sobre o equilíbrio ecológico. A validação da plataforma AlgaeMAp mostrou uma boa relação entre as concentrações de clorofila-a estimadas e medidas, com um coeficiente de determinação (R^2) de 74,8%. O modelo apresentou uma superestimação das concentrações em valores baixos, mas um bom desempenho para concentrações médias a altas.

A análise limnológica revelou uma dinâmica sazonal complexa no reservatório, com variações significativas nas concentrações de clorofila-a e no Índice de Estado Trófico (IET) ao longo do ano. As concentrações de clorofila-a foram mais elevadas no braço esquerdo do reservatório, especialmente durante o período seco, o que sugere uma forte influência da eutrofização, associada ao uso intensivo de irrigação e à concentração de nutrientes. Fatores climáticos, como temperatura e precipitação, também desempenham um papel importante nesse processo. A análise estatística indicou diferenças significativas nas concentrações de clorofila-a entre os períodos de irrigação, destacando a pressão antrópica e o impacto da agricultura na bacia hidrográfica.

Os resultados mostraram uma predominância de estado eutrófico no reservatório, com flutuações nas classes tróficas, especialmente nos anos de 2022 e 2024. Embora períodos mesotróficos e oligotróficos tenham sido observados, sugerindo melhores condições de qualidade da água, a relação entre eutrofização e uso agrícola permanece clara.

No contexto da Bacia Hidrográfica da Lagoa Mirim, observou-se uma relação entre as atividades agropecuárias e a eutrofização, com picos de clorofila-a em regiões com maior uso agrícola. No lado uruguaio da bacia, corpos hídricos próximos à fronteira com o Brasil apresentaram maiores níveis de eutrofização devido ao cultivo de arroz, enquanto regiões mais ao sul mostraram menores níveis, provavelmente devido à menor pressão antrópica.

8. Referências

- ALM - Agência Lagoa Mirim. **Relatório Técnico Lagoa Mirim e Canal São Gonçalo**. Disponível em <https://agencialagoamirim.com.br/wp-content/uploads/2023/09/Relatorio-Tecnico-ALM_Expedicao-Lagoa-Mirim-Canal-Sao-Goncalo-1.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2024.
- ALM - Agência Lagoa Mirim. **Bacia Hidrográfica Mirim**. Disponível em: <<https://agencialagoamirim.com.br/bacia-hidrografica/>>. Acesso em: 3 jul. 2024.
- ANA - Agência Nacional de águas. **Atlas irrigação**. Disponível em <<https://www.ana.gov.br/atlasirrigacao/>>. Acesso em: 20 out. de 2024.
- ANA - Agência Nacional de águas. **Atlas irrigação**. Disponível em <<https://qualidadedaagua.ana.gov.br/>>. Acesso em: 22 out. de 2024.
- ACHKAR, M.; DOMINGUEZ, A.; PESCE, F. Cuenca de la Laguna Merín-Uruguay. 2012. **Aportes Para la Discusión Ciudadana**. Available online: <<https://www.redes.org.uy/2012/12/18/cuenca-de-la-laguna-merin-uruguay-aportes-para-la-discusion-ciudadana/>>. Acesso em: 12 jan, 2025.
- ANDRADE, E. M. *et al.* 2020. Balanço de nitrogênio e fósforo em um reservatório na região semiárida tropical. **Revista Ciência Agronômica**, v. 51, n. 1. 2020.
- APHA American Public Health Association. Standard methods for the examination of water and wastewater. 23 ed. Washington: APHA, 2017.
- AVDAN, Z. Y., *et al.*. Monitoring the Water Quality of Small Water Bodies Using High-Resolution Remote Sensing Data. **ISPRS International Journal of Geo-Information**. v. 8, n. 12, p. 553, 2019.
- Barreto, L.V., *et al.*. Eutrofização em rios brasileiros. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia 9, 2166. 2013.
- BARBOSA, C. C. F.; DE MORAES NOVO, E. M. L.; MARTINS, V. S. (Ed.). **Introdução ao sensoriamento remoto de sistemas aquáticos: princípios e aplicações**. 1. ed. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019.
- BERTONI, B. G. L.; SIGOLO, J. B.. Utilização de técnicas de sensoriamento remoto nas imagens cbers 4 a para a avaliação de aspectos da qualidade da água (macrófitas e clorofila-a): estudo no reservatório Biritiba-Mirim-SP. In: **VIGILÂNCIA E SAÚDE AMBIENTAL: NO CONTEXTO DA EDUCAÇÃO**. Editora Científica Digital, 2021. p. 163-184.
- BRASIL. **Conselho Nacional do Meio Ambiente Resolução CONAMA no. 357/2005, 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. 2005.

BRAGA JR, *et al.* Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação. 2015.

BRESSAN, L. M.. **Acoplamento de técnicas de batimetria e aerofotogrametria para determinação do volume útil e área alagada da barragem do Arroio Chasqueiro - RS.** 2021. 66f. Trabalho de Conclusão de Curso - Bacharelado Engenharia Hídrica, Universidade Federal de Pelotas.

CABALLERO, I.; NAVARRO, G. Monitoring cyanoHABs and water quality in Laguna Lake (Philippines) with Sentinel-2 satellites during the 2020 Pacific typhoon season. **Science of the Total Environment.** 2021.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *IET – Índice do Estado Trófico.* São Paulo, 2013. Disponível em: <https://www.cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2013/11/04.pdf>. Acesso em: fev. 2025.

CHAI, C., *et al.* The status and characteristics of eutrophication in the Yangtze River (Changjiang) Estuary and the adjacent East China Sea. **Hydrobiologia**, v. 563, p. 313-328, 2006.

CHEN, F. F.; LI, S.; SONG, K.. Remote sensing of lake chlorophyll-a in Qinghai-Tibet Plateau responding to climate factors: Implications for oligotrophic lakes. **Ecological Indicators**, v. 159, p. 111674, 2024.

CHENG, C. *et al.* Remote sensing estimation of Chlorophyll a and suspended sediment concentration in turbid water based on spectral separation. **Optik**, v. 124, n. 24, p. 6815-6819, 2013.

CLETO FILHO, S. E. N. O clima e a vida no ambiente aquático. *Limnologia - Eventos térmicos em corpos d'água afetam organismos que ali vivem.* **Ciência Hoje**, vol.38, nº224. 2006.

COELHO, E. F; SIMÕES, W. L. **Onde posicionar sensores de umidade e de tensão de água do solo próximo da planta para um manejo mais eficiente da água de irrigação.** Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e fruticultura, 2015. (Embrapa Mandioca e fruticultura. Circular técnica, 109).

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Safras.** Disponível em <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras>>. Acesso em: 27 de nov. de 2024.
COODIC – Cooperativa dos Proprietários do Distrito de Irrigação da Barragem do Arroio Chasqueiro Ltda. Disponível em: < <http://coodic.com.br/index.php>> . Acesso em: 31 de outubro de 2023.

CORADI, P. C. *et al.* Qualidade da Água Superficial da Bacia Hidrográfica da Lagoa Mirim. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 3, n. 1, p. 53-64, 2009.

ELACHI, C.; VAN ZYL, Jakob J. **Introduction to the physics and techniques of remote sensing.** 3 ed. John Wiley & Sons, 2021.

ESPÍRITO SANTO, A. B. M. do. **Análise nictemeral de fitoplâncton e zooplâncton no reservatório do Passauna em Curitiba-pr**. Trabalho de Conclusão de Curso. Bacharel em Engenharia Ambiental. Departamento Acadêmico de Ambiental. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 38 f. 2021.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

FARIAS, M. S. S. **Monitoramento da qualidade da água na bacia hidrográfica do rio Cabelo. Campina Grande, Paraíba**. Campina Grande, Paraíba. 2006. 152 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Campina Grande.

FERRAL, A., *et al.*. Spatio-temporal changes in water quality in an eutrophic lake with artificial aeration. **Journal of Water and Land Development**. 35(1), 27-40. 2017.

FERREIRA, L. D. I. S. et al. Concentração de Clorofila e Parâmetros Físico-Químicos para Avaliação de Níveis de Eutrofização do Rio Cereja Bragança-Pa. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 5, p. 2153-2163, 2022.

FERNANDES, F. de M.; COLLARES, G. L.; CORTELETTI, R.. A água como elemento de integração transfronteiriça: o caso da Bacia Hidrográfica Mirim-São Gonçalo. **Estudos Avançados**, v. 35, n. 102, p. 59-77, 2021.

FIA, R. *et al.* Estado trófico da água na bacia hidrográfica da Lagoa Mirim, RS, Brasil. **Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 4, n. 1, p. 132-141, 2009.

FIGUEIRÊDO, M.C.B. *et al.*. Avaliação da vulnerabilidade ambiental de reservatórios à eutrofização. **Eng. Sant. Ambient.** v.12, n.4, p.399-409, 2007.

FILHO, A.N.C. **Análise dos impactos ambientais das atividades potencialmente poluidoras na bacia hidrográfica do arroio Chasqueiro**. 2016. 109f. Dissertação (Mestrado em Manejo e Conservação do Solo e da Água) – Curso de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Universidade Federal de Pelotas.

GERMÁN, A. *et al.*. Space-time monitoring of water quality in an eutrophic reservoir using SENTINEL-2 data – A case study of San Roque, Argentina. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**. 2021.

OGASHAWARA, I., *et al.*. The use of Sentinel-2 for chlorophyll-a spatial dynamics assessment: A comparative study on different lakes in northern Germany. **Remote Sensing**, v. 13, n. 8, p. 1542, 2021.

GUIMARÃES, P. R. B.. **Análise de Correlação e medidas de associação**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2017.

HANISCH W.; e FREIRE-NORDI, C.S. Monitoramento remoto em tempo real de mananciais visando às florações de cianobactérias. In: Pompêo et al. (Orgs.) **Ecologia de reservatórios e interfaces**, São Paulo : Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, 2015, p. 190-211.

HAN, H. et al. Influence of a heavy rainfall event on nutrients and phytoplankton dynamics in a well-mixed semi-enclosed bay. **Journal Of Hydrology**, v. 617, p. 1-13, fev. 2023.

HUDNELL, H. K. (Ed.). Cyanobacterial harmful algal blooms: state of the science and research needs. 2008.

ILIE, M., *et al.*. Assessment of Nutrients-Chlorophyll-a Relationship in the Lower Danube River. **International Journal of Advances in Chemical Engineering and Biological Sciences**, v. 4, n. 1, p. 1-6. 2017.

KRUK, C. *et al.* Problemáticas socioambientales en el territorio hidrosocial de la Laguna Merín: aportes desde la interdisciplina. **Revista Uruguaya de Antropología y Etnografía**, v. 7, n. 2, 2022.

LAJMANOVICH, R. C.; PELTZER, P. M. Plan de monitoreo ambiental para el estudio del impacto de cultivos extensivos de arroz sobre el macrosistema Iberá. **UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL–CONICET**, 2008.

LAMON III, E.C.; RECKHOW, K.H.; HAVENS, K. E.. Using generalized 323 additive models for prediction of chlorophyll a in Lake Okeechobee, Florida. Lakes & 324 Reservoirs: **Research and Management**, v.2, p. 37-46. 1996.

LIU Q., *et al.*. Changing riverine organic C:Nratios along the Pearl River: Implications for estuarine and coastal carbon cycles. 709, 1- 10. 2020.

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Oficina de Textos, 2015.
LI, Jing *et al.* Drivers to spatial and temporal dynamics of column integrated phytoplankton biomass in the shallow lake of Chaohu, China. **Ecological indicators**, v. 109, p. 105812, 2020.

LOBO, F. de L. *et al.*. AlgaeMAP: Algae bloom monitoring application for inland waters in Latin America. **Remote Sensing**, v. 13, n. 15, p. 2874, 2021.

LOPES, H. *et al.* Comportamento espacial da clorofila-a no reservatório de Itaparica, rio São Francisco. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 20, n. 03, p. 475-484, 2015.

LOPES, M. C. **Qualidade das águas de represas artificiais do córrego da olaria pindorama–sp: perspectivas para o controle e manejo do solo e da água para usos múltiplos**. Tese de doutorado. Programa de Pós Graduação em Agronomia – Ciência do solo. 2019.

LOPES, W. S., *et al.*. Determinação de um índice de desempenho do serviço de esgotamento sanitário. Estudo de caso: cidade de Campina Grande, Paraíba.

Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 21, n.1, Porto Alegre, p. 01-10,. 2016.

MAROCO, J. *Análise Estatística com utilização do SPSS*, Lisboa: Edições Sílabo. 2003.

MERÍN, CUENCA DE LA LAGUNA. *EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA DE LA*. 2021.

MENEZES, J. P. C., *et al.*. Relação entre padrões de uso e ocupação do solo e qualidade da água em uma bacia hidrográfica urbana. **Engenharia Sanitaria E Ambiental**, 21(3), 519 – 534. 2016.

MISHRA, S.; MISHRA, D. R. Normalized difference chlorophyll index: a novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 117, p. 394–406, 2012.

MOLOZZI, J.; PINHEIRO, A.; SILVA, M.R.da. Qualidade da água em diferentes estádios de desenvolvimento do arroz irrigado. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.41, n.9, p.1393-1398, 2006.

NALMS, **Management guide for lakes and reservoirs**. North American Lake Management Society, P.O. Box 5443, Madison, WI, 53705-5443, USA. 1987.
NAVEEDULLAH, *et al.* Water quality characterization of the siling reservoir (Zhejiang, China) using water quality index. **CLEAN–Soil, Air, Water**, v. 44, n. 5, p. 553-562, 2016.

NEAL, C., *et al.*. Chlorophyll-a in the rivers of eastern England. **Science of the Total Environment**, v. 365, p. 84-104, 2006.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. Editora Blucher, 2010.

OJOK W.; WASSWA J.; NTAMBI E. Assessment of Seasonal Variation in Water Quality in River Rwizi Using Multivariate Statistical Techniques, Mbarara Municipality, Uganda. **Journal of Water Resource and Protection**, n. 9, p. 83-97, 2017.

OLIVEIRA, H. A. de, *et al.*. Processos hidrológicos e hidrodinâmicos da Lagoa Mirim. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n. 1, p. 34-45. 2015
ONWUTEAKA, J.; CHOKO, P. Phytoplankton Community Response to Seasonal Changes in Chlorophyll a and Nitrate-Phosphate Concentrations in a Tidal Blackwater River in Niger Delta. **Annual Research & Review in Biology**, v. 21, n. 6, p. 1-19. 2018.

OUYANG Y., *et al.*. Assessment of seasonal variations in surface water quality. **Water research**, v. 40, p. 3800-3810, 2006.

PEEL, M.C., FINLAYSON, B.L., MCMAHON, T.A., Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences** 11, 1633–1644. 2007.

PEREIRA, J. A. V.; SILVA, J. B.; DUARTE, S. M. A. Análise ambiental da bacia de drenagem do açude Mucutú/PB utilizando sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 3, p. 1017-1038, 2019.

PERIOTTO, F.; MARTENSEN, A. C.. Restauo de Áreas Degradadas: Impactos Geradores e Processos de Restauração Ecológica. **ESTUDOS SOBRE IMPACTOS AMBIENTAIS**, p. 153, 2019.

Pestana, M. H.; GAGEIRO, J. N. Análise de Dados para Ciências Sociais: A complementaridade do SPSS, Lisboa: Edições Sílabo. 2008.

PU, F., *et al.*. Water-quality classification of inland lakes using Landsat8 images by Convolutional Neural Networks. **Remote Sensing**, Switzerland, v.11, n.14, p.1674, 2019.

ROCHA JUNIOR, C. A. N. *et al.* Water volume reduction increases eutrophication risk in tropical semi-arid reservoirs. **Acta Limnologica Brasiliensia**, [s.l.], v. 30, 5 abr. 2018.

SANTOS, A. L. C.; DE CARVALHO, C. M.; DE CARVALHO, T. M. Importância de remanescentes florestais para conservação da biodiversidade: Estudo de caso na Mata Atlântica em Sergipe através de sensoriamento remoto. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 7, n. 2, p. 58-84, 2013.

Santos, D. F. **A seca e seus impactos quali quantitativos na disponibilidade hídrica de reservatórios na Região Semiárida**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 59. 2020.

SALES, J. M. de J. *et al.*. Variabilidade espaço-temporal da qualidade da água em área de agricultura irrigada. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 14, n. 3, p. 4071-4085, 2020.

SCHAUER, M.; SENAY, G. B. Characterizing Crop Water Use Dynamics in the Central Valley of California Using Landsat-Derived Evapotranspiration. **Remote Sensing (MDPI)**, v. 11, n. 15, p. 1782, 2019.

SCHNEIDER, C., *et al.*. Littoral eutrophication indicators are more closely related to nearshore land use than to water nutrient concentrations: A critical evaluation of stressor-response relationships. **Science of the Total Environment**, v. 748, p. 141193, 2020.

SCHINDLER, D. W.; HECKY, R. E.; McCULLOUGH, G. K.. The rapid eutrophication of lake winnipeg: greening under global change. **Journal of Great Lakes Research**, v.38, s.2, p.6-13, 2012.

SHARIP, Z., *et al.*. Lakes of Malaysia: Water quality, eutrophication and management. **Lakes and Reservoirs: Research and Management**, v. 19, p. 130-141, 2014.

SILVA, T. F. d. G. *et al.*. Modelagem da Lagoa da Pampulha: uma ferramenta para avaliar o impacto da bacia hidrográfica na dinâmica do fitoplâncton. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 1, p. 95-108, 2016.

SIMÕES, A. M. **Análise do comportamento de clorofila-a no reservatório Chasqueiro/RS com auxílio do Algae Bloom Monitoring Application - AlgaeMap**. Trabalho de Conclusão de Curso - Bacharel Engenharia Hídrica, Universidade Federal de Pelotas. 63p. 2023.

SINGH, P.; YADAV, B.. Seasonal eutrophication in lentic small waterbodies: Understanding nutrients-chlorophyll-a relationships and implications. **Journal of Hazardous Materials Advances**, v. 17, p. 100563, 2025.

SINGH, P.; YADAV, B.. Seasonal eutrophication in lentic small waterbodies: Understanding nutrients-chlorophyll-a relationships and implications. **Journal of Hazardous Materials Advances**, v. 17, p. 100563, 2025.

STREIT, N. M. *et al.* As clorofilas. **Ciência Rural**, v. 35, p. 748-755, 2005.
SOUZA, A. O. *et al.* Investigação da qualidade de águas superficiais pelo índice de estado trófico no baixo São Francisco Sergipano. In: **NOVAGRI INTERNACIONAL MEETING**, 4., 2017.

TALLING, J. F. *et al.* Methods for Physical and Chemical Analysis of Fresh Waters. **Journal of Ecology**, v. 68, n. 1, p. 337, 1980.
TORMAM, M. F. *et al.* Variabilidade sazonal da qualidade da água na Lagoa Mirim, RS, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 4, n. 2, p. 54-59, 2017.

VALÉRIO, A. M. **O uso do sensoriamento remoto orbital e de superfície para o estudo do comportamento do corpo de água do reservatório de Manso, MT, Brasil**. 2009. 119 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

VERWEIJ, W., *et al.*. **Impact of climate change on water quality in the Netherlands**. RIVM rapport 607800007. 2010.

VIDAL, R. S., *et al.*. Distrito de irrigação da barragem do Arroio Chasqueiro: Importância Histórica. **VIII Congresso de Extensão e Cultura**. Universidade Federal de Pelotas. 2021.

VIEIRA, H.M., *et al.* Links between surface sediment composition, morphometry and hydrodynamics in a large shallow coastal lagoon. **Sedimentary Geology** 398. 2020.
VIEIRA, E. F. Planície costeira do Rio Grande do Sul: geografia física, vegetação e dinâmica sociodemográfica. Porto Alegre: Sagra, 1988. 256 p.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Editora UFMG, v. 1., 243 p. 1996.

WYSOCKI, L. A., *et al.*. Spatial variability in the coupling of organic carbon, nutrients, and phytoplankton pigments in surface waters and sediments of the Mississippi River plume. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 69, p. 47-63, 2006.

YACOBI, Y.Z.; GITELSON, A.; MAYO, M. Remote sensing of chlorophyll in Lake Kinneret using high spectral-resolution radiometer and Landsat TM: Spectral features of reflectance and algorithm development. **Journal of Plankton Research**, v. 17, p. 2155-2173, 1995.

ZHAO, Q. *et al.* Seasonal dependency of controlling factors on the phytoplankton production in Taihu Lake, China. **Journal of Environmental Sciences**, v. 76, p. 278-288, 2019.

ZHOU, Y., *et al.* Eutrophication control strategies for highly anthropogenic influenced coastal waters. **Science of the Total Environment**, v. 705, p. 135760, 2020.