

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DO SERTÃO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

SILMAYKO GOMES DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA ESTIMATIVA DA CLOROFILA-A USANDO ALGAEMAP EM UM
SISTEMA ESTUARINO-LAGUNAR TROPICAL**

DELMIRO GOUVEIA - AL

2024

SILMAYKO GOMES DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA ESTIMATIVA DA CLOROFILA-A USANDO ALGAEMAP EM UM
SISTEMA ESTUARINO-LAGUNAR TROPICAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharelado em Engenharia civil.

Orientador: Profa. Dra. Regina Camara Lins

DELMIRO GOUVEIA - AL

2024

Página reservada à ficha catalográfica (item obrigatório, elaborado, somente, por Bibliotecário). Para saber como solicitar a sua ficha, acesse:

http://sibi.ufal.br/portal/?page_id=579.

Folha de Aprovação

SILMAYKO GOMES DA SILVA

AVALIAÇÃO DA ESTIMATIVA DA CLOROFILA-A USANDO ALGAEMAP EM UM SISTEMA ESTUARINO-LAGUNAR TROPICAL

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas e aprovada em 21 de novembro de 2024.

Orientadora: Profa. Dra. Regina Camara Lins
(Universidade Federal de Alagoas - Centro de Tecnologia – CTEC)

Banca examinadora:

Examinador Externo - Prof. Dr. Manoel Mariano Neto da Silva
(Universidade Federal de Alagoas - Centro de Tecnologia – CTEC)

Examinador Interno - Prof. Dr. Wendell Jose Soares dos Santos
(Universidade Federal de Alagoas - Campus do Sertão)

A vida é uma constante oscilação entre a ânsia
de ter e o tédio de possuir.

- Arthur Schopenhauer

AGRADECIMENTOS

À minha avó Janice, que, mesmo com todas as dificuldades e sem letramento, sempre me guiou e cuidou de mim, ajudando a formar o meu caráter.

À minha mãe Genilda, que, embora não tão presente na minha infância devido aos estudos e ao trabalho, se esforçou em cuidar de mim e garantir o meu futuro.

Aos meus amigos, que sempre confiaram no meu potencial mais do que eu mesmo. Em especial a Eduarda, Erik e Iranildo, que hoje são meus irmãos de outras vidas e sempre foram luz quando eu mais precisei de esperança.

Ao Marcilio, que entrou na minha vida em meio ao caos e trouxe a calma que eu precisava, ajudando-me a me reconhecer e a aceitar o que o futuro nos reserva.

Ao PET Engenharias, que me deu a oportunidade de compartilhar minhas habilidades e descobrir talentos que jamais saberia que tinha, se não fosse por essa verdadeira família.

Aos meus professores, que, com toda a paciência, compartilharam seus conhecimentos e sempre estiveram dispostos a ajudar. Em especial, à professora Angélica Silva e ao professor Odair Moraes.

A todos que conheci na jornada acadêmica, que, de algum modo, tornaram meus dias mais leves em meio às dificuldades da graduação.

À minha orientadora, Regina, que acreditou no potencial deste trabalho e confiou que eu chegaria até aqui.

Aos meus familiares e amigos, que torceram por mim e, de alguma forma, me ajudaram ao longo desta caminhada: o sonho se concretizou, e vocês fizeram parte dessa história. Este é mais um passo dado, mas não o fim da jornada, pois a busca pelo conhecimento será sempre eterna.

RESUMO

Este trabalho analisa a estimativa de Clorofila-a em corpos hídricos utilizando imagens do satélite Sentinel-2, com o objetivo de avaliar a qualidade ambiental de ecossistemas aquáticos. A pesquisa foi conduzida no Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM), em Alagoas, através do aplicativo AlgaeMAp para integrar dados de satélite e medições in situ provenientes de estudos anteriores. Os objetivos incluem avaliar a compatibilidade temporal entre os dados de campo e as imagens de satélite, investigar a influência dessas diferenças na estimativa de Clorofila-a pelo AlgaeMAp, comparar os resultados com análises laboratoriais e determinar a necessidade de ajustes no modelo NDCI para aplicação na área de estudo. As diferenças temporais não se mostraram um fator decisivo, uma vez que não houve variações significativas nos coeficientes, que se mantiveram entre R^2 0,52 e 0,55. No entanto, estudos anteriores realizados na mesma região demonstraram modelos ajustados com desempenho superior, atingindo valores de R^2 maiores que 0,8. Dessa forma, o aplicativo requer ajustes no modelo para melhorar sua precisão na área de estudo.

Palavras-chave: Complexo Estuarino Mundaú-Manguaba; NDCI; Sensoriamento remoto; Sentinel-2; Eutrofização.

ABSTRACT

This study analyzes the estimation of Chlorophyll-a in water bodies using Sentinel-2 satellite images, aiming to assess the environmental quality of aquatic ecosystems. The research was conducted in the Mundaú-Manguaba Estuarine-Lagoon Complex (CELMM) in Alagoas, using the AlgaeMAp application to integrate satellite data and in situ measurements from previous studies. The objectives include evaluating the temporal compatibility between field data and satellite images, investigating the influence of these differences on the Chlorophyll-a estimation by AlgaeMAp, comparing the results with laboratory analyses, and determining the need for adjustments in the NDCI model for application in the study area. Temporal differences were not a decisive factor, as there were no significant variations in the coefficients, which remained between R^2 0.52 and 0.55. However, previous studies conducted in the same region demonstrated adjusted models with superior performance, reaching R^2 values greater than 0.8. Thus, the application requires adjustments to the model to improve its accuracy in the study area.

Keywords: Mundaú-Manguaba Estuarine Complex; NDCI; Remote Sensing; Sentinel-2; Eutrophication.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comprimento de ondas no espectro eletromagnético em centímetros.	19
Figura 2 - Captura de tela do AlgaeMAP	24
Figura 3 - Fluxograma da metodologia.	26
Figura 4 - Local de estudo.	27
Figura 5 - Pontos de coleta.	28
Figura 6 – Campanha no AlgaeMAP do Mundaú.....	29
Figura 7 - Campanha no AlgaeMAP da Manguaba.....	29
Figura 8 - Correlação entre Clorofila-a medida em campo e estimada por satélite, considerando diferença temporal entre os dados de campo e disponibilidade de imagem de satélite: (a) até 5 dias; (b) até 3 dias e (c) até 1 dia.	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Modelos e equações utilizados pelo AlgaeMap, Tavares e Lins para o processamento dos dados e cálculo do coeficiente de determinação.	21
Tabela 2 - Estimativas de Clorofila-a obtidas pelo AlgaeMAp (i) e medições de campo (ii) em 2018.	31
Tabela 3 - Estimativas de Clorofila-a obtidas pelo pelo AlgaeMAp (i) e medições de campo (ii) em 2019.	32

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SIMBOLOS

AlgaeMAp	Algae Bloom Monitoring Application
CELMM	Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba
Chl-a	Clorofila-a
COA	Componentes Opticamente Ativos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ESA	European Space Agency
MSI	Multispectral Imager
NDCI	Normalized Difference Chlorophyll Index
NIR	Infravermelho
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
Red	Vermelho
Red-Edge	Borda do vermelho
REM	Radiação Eletromagnética

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo geral.....	14
2.2	Objetivos específicos.....	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	Sistemas estuarinos.....	15
3.2	Qualidade dos corpos hídricos	16
3.3	Sensoriamento remoto.....	18
3.3.1	Radição eletromagnética.....	18
3.3.2	Modelos de estimativa de Clorofila-a.....	19
3.3.3	Sentinel-2.....	22
3.3.4	NDCI	22
3.3.5	AlgaeMAp	23
4	METODOLOGIA.....	26
4.1	Área de estudo.....	26
4.2	Dados locais de Clorofila-a	27
4.3	Estimativa de Clorofila-a a partir de dados de reflectância de satélite	28
4.4	Análise e validação dos dados.....	30
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	35
	REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

Os ecossistemas aquáticos costeiros possuem grande importância para a preservação de diversas espécies de fauna e flora, desempenhando um papel crucial na manutenção da biodiversidade (Marins *et al.*, 20007). Os sistemas estuarinos são ecossistemas aquáticos localizados nas áreas costeiras continentais, onde a água doce dos rios se mistura com a água salgada do oceano. Eles são parcialmente fechados e servem como uma zona de transição entre a água doce e a água salgada (Lima Filho, 2022).

O Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM) é considerado um dos ecossistemas mais importantes do Brasil (MMA, 2005). Localizado na região centro-sul do litoral de Alagoas, é formado por um extenso sistema de lagunas, ilhas e canais flúvio-marinhos que abrange áreas dos municípios de Maceió, Marechal Deodoro, Rio Largo, Satuba, Pilar, Coqueiro Seco e Santa Luzia do Norte (Silva; Ferreira, 2021).

A deterioração da qualidade desses ambientes está se tornando cada vez mais frequente, impactando de forma direta e indiretamente o desenvolvimento e a qualidade de vida das pessoas e de organismos que deles dependem. Algumas ações humanas vêm impactando CELLM, incluindo lançamento de esgotos, disposição inadequada de resíduos sólidos, assoreamento, eutrofização, lançamento de efluentes industriais não tratados, ocupação desordenada do entorno, práticas agrícolas inadequadas, pesca não sustentável, e uso excessivo de fertilizantes e agroquímicos na agricultura, especialmente na produção de cana-de-açúcar (Wanderley *et al.*, 2020).

Diversos estudos têm abordado a questão da eutrofização no Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba, evidenciando diferentes aspectos e impactos desse processo nos ecossistemas da região. Pesquisas recentes destacam a contribuição de fatores como o lançamento de efluentes domésticos e industriais, o uso intensivo do solo nas áreas adjacentes e as alterações nos parâmetros físico-químicos da água, que promovem a proliferação de nutrientes e alteram o equilíbrio ecológico da área (Luz, 2021; Silva, 2020; Mendes, 2020).

Além disso, a concentração de clorofila-a, um dos principais indicadores da eutrofização, tem sido amplamente estudada como parâmetro de monitoramento da qualidade da água e da saúde dos ecossistemas aquáticos do CELMM, com destaque para os impactos diretos na biodiversidade local e nos processos biogeoquímicos (Macías,2018; Lins, 2019).

O monitoramento da Clorofila-a, que revela a biomassa do fitoplâncton, tem sido extensivamente aplicado na avaliação da qualidade das águas de interior e costeiras, devido à sua sensibilidade e capacidade de reagir prontamente a diversos fatores ambientais (Boyer et

al., 2008). Assim, têm sido investigadas análises estimativas utilizando satélites que buscam tornar a quantificação dessa variável mais prática. Um exemplo é o estudo de Lobo et al. (2021), que validou o algoritmo do aplicativo AlgaeMAP na Bacia do Rio Tietê, situada no Estado de São Paulo, Brasil.

Segundo os autores, para expandir o projeto para outras regiões, são necessários dados *in situ* para validar o algoritmo. Neste trabalho, são comparadas as estimativas de Clorofila-a fornecidas pelo AlgaeMAP com dados de Clorofila-a medidos *in situ* para avaliar o desempenho da plataforma no CELMM. Além disso, para orientar a investigação, foi realizada uma análise comparativa dos resultados obtidos neste estudo com modelos de outros autores, que utilizaram estimativa de Clorofila-a a partir de dados de reflectância medidos *in situ*.

Este trabalho visa avaliar a eficácia do AlgaeMAP para estimar a concentração de Clorofila-a no Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM) por sensoriamento remoto. Foram verificadas a compatibilidade dos dados de campo com as imagens de satélite, comparadas as estimativas de Clorofila-a com medições laboratoriais e analisada a necessidade de adequação do modelo NDCI. Os resultados contribuirão para o aprimoramento das ferramentas de monitoramento ambiental, beneficiando a gestão da qualidade da água no CELMM.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a eficácia do AlgaeMAP para estimativa por sensoriamento remoto da concentração de Clorofila-a no Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM).

2.2 Objetivos específicos

- Verificar a compatibilidade de informações entre as datas de monitoramento de campo e de imagens de satélite;
- Analisar a influência da diferença temporal entre as datas de monitoramento de campo e as imagens de satélite na estimativa de Clorofila-a utilizando o AlgaeMAP.
- Comparar a estimativa de Clorofila-a obtida no AlgaeMAP com as concentrações obtidas em laboratório;
- Aferir a necessidade de adequação do modelo NDCI utilizado no AlgaeMAP para a aplicação na área de estudo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Sistemas estuarinos

O termo 'estuário' deriva da palavra latina *aestuar-ium*, usada pelos romanos para designar a parte de um rio influenciada pela maré (Flemming, 2011). Um estuário é descrito como um corpo d'água costeiro parcialmente fechado, que mantém uma conexão direta com o oceano e onde a água do mar é misturada de forma significativa com água doce proveniente da drenagem das terras adjacentes (Elliott; Mclusky, 2002).

Os sistemas estuarinos desempenham um papel crucial em suas regiões, sendo de grande relevância ecológica, econômica e social. Caracterizados por uma rica biodiversidade, os estuários se beneficiam da interação entre águas doces e salgadas, o que aumenta sua complexidade ecológica. Como afirmam Kennish e Paerl (2024), os insumos de água doce são essenciais para manter os gradientes químicos em lagoas costeiras, promovendo tanto a biodiversidade quanto a complexidade ecológica. Essa interação não só apoia atividades econômicas e protege as áreas costeiras, mas também oferece benefícios sociais às comunidades locais, ao sustentar uma ampla variedade de espécies.

A abundância de pequenas formas larvais e juvenis, como peixes e crustáceos, pode ser explicada por dois fatores principais: primeiro, estuários são áreas de alta produtividade, oferecendo uma abundância de recursos alimentares que favorecem o crescimento rápido desses juvenis; segundo, a diversidade de habitats dentro dos estuários proporciona refúgio essencial para pequenos peixes e invertebrados, protegendo-os de predadores que frequentam esses ambientes para se alimentar, como afirmam Day et al. (2012).

A biodiversidade dos estuários está profundamente ligada não apenas à sua produtividade, mas também às suas características físicas. A diversidade morfológica e de habitats desses ecossistemas cria condições favoráveis para uma ampla gama de espécies, ao mesmo tempo que requer classificações baseadas em parâmetros geográficos e biológicos. Zhang et al. (2018) destacam que a morfologia do sistema estuarino, o prisma de maré e o transporte de sedimentos estão interconectados por mecanismos de retroalimentação dinâmica, onde mudanças em um desses elementos influenciam e são influenciadas pelos outros.

A morfologia e a biologia dos estuários variam tanto geograficamente que as classificações devem se limitar à identificação e criação de um número restrito de tipos básicos, facilmente reconhecíveis por alguns parâmetros característicos, reconhecendo que existirão muitas transições e subdivisões dentro dessas categorias básicas (Flemming, 2011).

Diante dos pontos mencionados, reforça-se a importância dos estuários para a vida

marinha, sendo essencial garantir que os parâmetros ecológicos mantenham esses ambientes limpos. Em consonância, José (2004) aponta que a qualidade da água nesses ecossistemas é fundamental para sua preservação e equilíbrio. A degradação desses ambientes pode comprometer sua biodiversidade e os benefícios que proporcionam, afetando tanto a economia quanto o bem-estar das comunidades costeiras.

3.2 Qualidade dos corpos hídricos

A qualidade da água é definida pelas características físicas, químicas e biológicas, sendo que sua avaliação envolve a medição desses parâmetros para determinar se é adequada para usos específicos ou se sustenta um ecossistema saudável (Chapman, 1996). A qualidade está diretamente relacionada ao seu uso, e não há uma forma simples de avaliar se a água é boa ou ruim, sendo ideal desenvolver métodos que indiquem se estar apropriada para o uso específico a que se destina (Porto, 2002).

A pureza hídrica em uma determinada região é influenciada por fatores naturais, como a intensidade das chuvas, o intemperismo e a cobertura vegetal, além de ser impactada por atividades humanas, como a agricultura, a urbanização, a atividade industrial e o uso excessivo dos recursos hídricos (Andrade et al., 2007). Esse recurso natural é essencial para a vida e indispensável para uma ampla variedade de atividades humanas, como o abastecimento público e industrial, a irrigação agrícola, a geração de energia elétrica, as atividades de lazer e recreação, além da preservação da vida aquática (Castro, 2008).

As atividades humanas na bacia hidrográfica tendem a modificar as características das águas, frequentemente resultando em sua degradação (Amaro, 2009). O monitoramento ambiental em corpos hídricos visa identificar aspectos importantes para diagnosticar as mudanças no uso e ocupação do solo, possibilitando a avaliação dos impactos das atividades humanas sobre os ecossistemas desses corpos (Queiroz et al., 2010).

As leis estaduais de recursos hídricos criadas no início dos anos 1990, seguidas pela Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), estabelecida pela Lei nº 9.433/1997, adotaram uma abordagem de gestão para coordenar e otimizar o uso dos recursos hídricos, definindo o modelo de gestão brasileiro que considera tanto a quantidade quanto a qualidade da água (Libânio; Chernicharo; Nascimento, 2005)

Ao Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) é atribuída a tarefa de assessorar, estudar e propor ao Conselho de Governo diretrizes de políticas relacionadas aos recursos naturais. Além disso, o CONAMA delibera, no âmbito de sua competência, normas e padrões

que visam garantir um ambiente ecologicamente equilibrado, mantendo a qualidade de vida (Silva, Miranda e Santana, 2016, p. 83).

A Resolução nº 357/2005, é um documento chave que define os critérios e padrões para a classificação das águas. A Resolução estabelece diretrizes gerais para a qualidade das águas junto as classificações, de acordo com seus usos principais, em águas doces, salinas e salobras do Território Nacional. Além dessa divisão, a resolução especifica parâmetros e requisitos para a manutenção dos ecossistemas aquáticos, de acordo com cada classe (Brasil, 2005).

Para enquadrar os corpos hídricos nas classes indicadas pelo CONAMA, especialmente os sistemas estuarinos, é necessário considerar a forte influência dinâmica das marés. Esses ambientes, que possuem salinidade intermediária entre águas doces e salinas, apresentam uma faixa de variação que exige uma análise mais complexa (Eschrique et al., 2011).

Dois aspectos principais que afetam a qualidade da água são a poluição e a eutrofização. A eutrofização ocorre quando há um aumento excessivo de nutrientes em ambientes aquáticos, frequentemente causado pelo lançamento de resíduos orgânicos provenientes de atividades humanas (Alves; Oliveira, 2018). A avaliação do estado trófico de um ecossistema aquático pode ser realizada utilizando diversos parâmetros limnológicos, como a concentração de Clorofila-a, a transparência da água, a desoxigenação do hipolímnio e indicadores biológicos, incluindo fitoplâncton e zooplâncton, entre outros (Odum, 1997).

As clorofilas são os pigmentos naturais mais comuns encontrados nas plantas, presentes nos cloroplastos das folhas e em outros tipos de tecidos vegetais (Streit et al., 2005). A Clorofila-a, por ser encontrada em todos os organismos que realizam fotossíntese e desempenhar um papel crucial nesse processo, é frequentemente utilizada para medir a biomassa de fitoplâncton e avaliar a qualidade da água, refletindo assim na quantidade de nutrientes e nas condições gerais do ecossistema aquático (Cicerelli, 2010).

A quantidade de Clorofila-a presente no ecossistema indica o grau de proliferação das algas em resposta ao aumento de nutrientes, evidenciando de forma clara e ambientalmente significativa o impacto do enriquecimento, especialmente por nitrogênio e fósforo (Agostini, 2024). Esse pigmento é amplamente usado como um indicador em índices de eutrofização, pois ao monitorar e avaliar os níveis de Clorofila-a, é possível controlar os processos de eutrofização e implementar ações apropriadas para evitar os efeitos negativos ligados ao crescimento exagerado de algas (Agostini, 2024).

Dentro das partículas orgânicas que flutuam na água, o fitoplâncton é o componente mais importante em termos de alimentação para outros organismos aquáticos. Portanto, sua biomassa, ou seja, o peso total dos organismos fotossintetizantes presentes no plâncton, medido

por unidade de volume ou área, indica a quantidade imediata de alimento disponível na coluna d'água. Contudo, medir a biomassa do fitoplâncton em amostras naturais é uma tarefa complexa. Por esse motivo, a medição do pigmento fotossintético Clorofila-a é amplamente utilizada na ecologia aquática como um dos principais indicadores da biomassa de fitoplâncton (Proença, 2002).

3.3 Sensoriamento remoto

O sensoriamento remoto é uma técnica que permite a aquisição de imagens e informações da superfície da Terra por meio da captura e do registro da energia refletida ou emitida. Segundo Moraes (2002), sensoriamento remoto é um conjunto de metodologias que possibilita a aquisição de dados sobre os componentes da superfície da Terra sem interação direta. O termo "sensoriamento" refere-se à coleta de dados por sensores instalados em plataformas terrestres, aéreas e orbitais, enquanto "remoto" indica que a coleta ocorre a uma certa distância, sem o contato direto entre o sensor e os objetos na superfície terrestre (Florenzano, 2011).

Segundo Figueiredo (2005), o desenvolvimento do monitoramento por satélites foi impulsionado por quatro áreas tecnológicas: os sensores melhoraram a qualidade das imagens; o sistema de telemetria aumentou a capacidade de transmissão de dados; os sistemas de processamento aprimoraram o armazenamento e a manipulação digital; e os lançadores evoluíram para colocar em órbita satélites mais pesados e equipados com mais instrumentos.

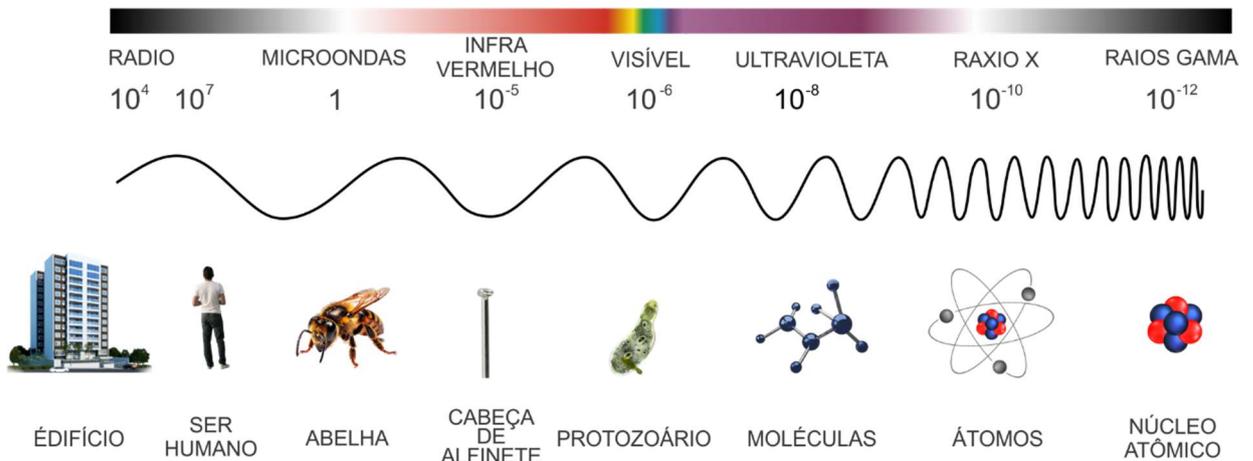
3.3.1 Radiação eletromagnética

De acordo com Moraes (2002), as informações são obtidas por meio da detecção, coleta e análise da energia eletromagnética emitida ou refletida pelos objetos, capturada por sensores a distância, sendo a energia utilizada nesses procedimentos conhecida como radiação eletromagnética.

Conforme Baptista (2021), a radiação eletromagnética é produzida pela conversão de outras formas de energia, como a energia cinética, química, térmica, elétrica, magnética e nuclear, sendo capaz de realizar trabalho, causar aquecimento ou alterar o estado físico. O espectro eletromagnético é contínuo, mas é dividido de forma arbitrária pelo ser humano em faixas de comprimento de onda, fundamentado nos mecanismos físicos que geram a energia eletromagnética e nos métodos físicos de sua detecção (Quartaroli; Vicente; Araujo, 2014).

Há diversas denominações para as radiações eletromagnéticas, que variam conforme a frequência e o comprimento de onda, como radiação gama, raios X, ultravioleta e radiação visível, que corresponde à luz que, ao atingir nossos olhos, provoca a percepção de cor, como podemos observar na Figura 1 (Sausen, 2008). O olho humano é receptivo à radiação eletromagnética com comprimentos de onda entre 400 nm e 780 nm, conhecida como luz visível, como destacado por Salicio e Castro (2016).

Figura 1 - Comprimento de ondas no espectro eletromagnético em centímetros.



Fonte: Secretaria de educação do paraná, elaborado pelo autor.

As propriedades de atenua o da radia o eletromagnética no visível pelos pigmentos fotossintéticos, são fundamentais para a estimativa da concentra o de Clorofila-a na água por meio de sensores ópticos (Costa, 1998). Para obter estimativas precisas,   essencial compreender as características espectrais dos pigmentos e de outros componentes ópticos presentes na  gua (Kirk, 1986).

De acordo com Ferreira (2011), a clorofila   considerada uma substância fluorescente, pois, ao ser irradiada com luz em um comprimento de onda específico (de excita o), seu estado eletr nico   alterado. No estudo, foram observados picos de fluorescência entre 400 e 450 nm. Após essa altera o, a clorofila retorna rapidamente ao seu estado fundamental por meio de um processo de decaimento energético radiativo, emitindo luz em um comprimento de onda geralmente superior ao de excita o.

3.3.2 Modelos de estimativa de Clorofila-a

No âmbito das ciências que exploram o espaço geográfico, o sensoriamento remoto se destaca como uma ferramenta amplamente empregada em diferentes áreas de pesquisa sobre a

superfície terrestre, devido à versatilidade dos satélites, sua ampla cobertura espacial e à frequência das observações (Gaida et al., 2020). A utilização de satélites para o acompanhamento de amplas áreas territoriais é essencial, especialmente quando esses satélites são combinados com técnicas de georreferenciamento espacial (Formaggio; Sanches, 2015)

Sob a perspectiva técnico-científica, as imagens de monitoramento a distância têm sido utilizadas como fontes de dados para pesquisas e levantamentos geológicos, ambientais, agrícolas, cartográficos, florestais, urbanos, oceanográficos, entre outros (Crósta, 1992). Segundo Potes et al. (2018), o sensoriamento remoto de corpos d'água se baseia nas variações de cor das águas naturais, que refletem diferentes reflectâncias espectrais influenciadas pelos constituintes da água, sendo utilizado para monitorar a cor do oceano desde a década de 1960, com crescente interesse nas últimas três décadas em sua aplicação na avaliação da qualidade da água interior.

De acordo com Palmer, Kutser e Hunter (2015), o monitoramento de lagos por satélite tem sido limitado pela falta de sensores adequados para essa finalidade. Conforme Toming et al. (2016), sensores como o MODIS e MERIS proporcionam revisita frequente e boa resolução radiométrica, mas sua resolução espacial é restrita a grandes lagos, excluindo a maioria dos lagos menores; em contrapartida, o lançamento do Multispectral Imager (MSI) a bordo do Sentinel-2 em 2015 representou um avanço significativo no sensoriamento remoto, permitindo o estudo de pequenos lagos devido às suas resoluções espaciais de 10 m, 20 m e 60 m.

Potes et al. (2011) propuseram um método para monitorar a Clorofila-a e cianobactérias em reservatórios interiores, com base nas propriedades ópticas das massas de água naturais, que são determinadas principalmente pelo material orgânico e inorgânico presente em solução ou suspenso. Assim como afirmam Rudorff et al. (2007), sedimentos suspensos, pigmentos fotossintéticos, matéria orgânica dissolvida e as próprias moléculas de água são os principais responsáveis pelas propriedades ópticas da água, sendo, portanto, denominados constituintes opticamente ativos (COAs).

Utilizando de técnicas de sensoriamento remoto, é viável monitorar ecossistemas de maneira integrada, com um custo mais baixo (Dall'olmo et al., 2003). A utilização de sensores remotos para investigar a distribuição do fitoplâncton fundamenta-se no princípio de que os pigmentos fotossintetizantes das algas são componentes opticamente ativos que capturam a radiação eletromagnética em comprimentos de onda determinados (Kirk, 2011).

A Clorofila-a é o pigmento fotossintetizante predominante, responsável pela captação da radiação eletromagnética (REM) e presente em todas as categorias de algas (Souza, 2019). Esse pigmento desempenha um papel crucial nos processos ecológicos dos sistemas aquáticos,

sendo amplamente utilizado como indicador para avaliar os níveis de eutrofização nesses ambientes.

Nesse contexto, diversos estudos têm se concentrado no desenvolvimento e na calibração de modelos baseados no NDCI para estimar a concentração de Clorofila-a. Lins et al. (2017), por exemplo, avaliaram algoritmos de sensoriamento remoto em um complexo estuarino-lagunar tropical, utilizando medições *in situ* de reflectância e bandas de satélite simuladas. Tavares et al. (2021) analisaram o desempenho de modelos baseados na radiância da água, utilizando dados de radiância e concentrações de Clorofila-a obtidos *in situ*. Por sua vez, Lobo et al. (2021) desenvolveram um aplicativo que validou o modelo utilizando dados da Bacia do Rio Tietê, em São Paulo. Os resultados desses estudos estão sintetizados na Tabela 1.

Tabela 1- Modelos e equações utilizados pelo AlgaeMap, Tavares e Lins para o processamento dos dados e cálculo do coeficiente de determinação.

Autor	Modelo	Equações	R²
Lobo et al. (2021)	Estimativa da concentração de Chl-a usando o NDCI através de um modelo não linear.	$NDCI_{sat} = \frac{(SR_{705} - SR_{665})}{(SR_{705} + SR_{665})}$ $Chla = 23.44X(NDCI_{sat} + 1)^{7.95}$ $R^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2}$ $MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left \frac{y_i - \hat{y}}{y_i} \right $	0,86
Tavares et al. (2021)	Semi-analytical NIR-red ratio algorithm – 2SAR com correção atmosférica e solar Aco-SG.	$chla_{2SAR} = \frac{\frac{R_{rs}(778)}{R_{rs}(665)} X (\alpha_w(708) + b_b) - \alpha_w(665) - b_b^a}{b}$ $b_b = 1.61x \frac{\pi R_{rs}(778)}{0.082 - 0.6\pi R_{rs}(778)}$	0,95
Lins et al. (2017)	The two- and three-band NIR-Red ratio model	$Chla \propto R_{721} / R_{660}$ $Chla \propto (R_{690}^{-1} - R_{714}^{-1}) * SR_{720}$	> 0,8

Fonte: autoria própria.

Por meio do sensoriamento remoto, é viável analisar as reações resultantes de intervenções causadas pela atividade humana, permitindo antecipar o impacto dessas ações sobre as condições de sustentabilidade a médio e longo prazo (Novo, 2005, apud Lopes; Barbosa; Novo; Andrade; Chaves, 2023). Nesse contexto, as séries temporais de imagens de satélite possibilitam a avaliação dos fatores de risco e potencial presentes em ambientes naturais ou antropizados, com o objetivo de orientar o uso adequado, a exploração sustentável, a

conservação, a mitigação de impactos e a priorização de respostas (Carvalho Júnior, 2018).

3.3.3 Sentinel-2

Segundo a *European Space Agency - ESA* (2018), o Sentinel-2 foi desenvolvido para suportar os três principais serviços fornecidos pelo programa Copernicus, abrangendo gestão de territórios, cultivo, manejo florestal, monitoramento de catástrofes, atividades de assistência humanitária, cartografia de ameaças e questões de segurança.

De acordo com Perez (2018), o Sentinel-2 possui uma resolução espectral que inclui 4 bandas (5, 6, 7 e 8a) na faixa do red-edge, cada uma com 20 metros de resolução espacial, além de 4 bandas de 10 metros, correspondentes às cores azul, verde, vermelho e infravermelho próximo (B2, B3, B4 e B8, respectivamente). Conforme afirmado por Nisieimon (2020), sua frequência de revisita de 5 dias oferece um volume considerável de imagens, possibilitando que o monitoramento seja conduzido de forma mais minuciosa e eficiente.

O satélite Sentinel-2, projetado para monitorar vegetação e solos, possui bandas espectrais (Red – NIR) especialmente adequadas para estimar a concentração de clorofila em lagos eutróficos (Matthews, 2011). Soria et al. (2017) destacam que, embora os satélites Sentinel-2 não tenham sido projetados especificamente para monitorar a qualidade da água, sua combinação de resoluções espectral, temporal e radiométrica os torna altamente eficazes na estimativa de Clorofila-a em lagos eutróficos, permitindo seu uso regular no acompanhamento da Clorofila-a em corpos d'água continentais de diferentes tamanhos.

A introdução do satélite Sentinel-2, em junho de 2015, oferece uma nova fonte de informações para a vigilância de ecossistemas aquáticos por meio de sensores remotos, graças a inovações tecnológicas em relação à resolução radiométrica (Ferreira et al., 2017). A aplicação de sensores orbitais, como os das séries Landsat e Sentinel, em ambientes aquáticos, oferece características ideais para a estimativa da qualidade da água, incluindo o espectro óptico disponível, o tempo de revisita, a área de cobertura e a influência atmosférica, entre outras variáveis (Mertes et al., 2004, apud Pizani et al., 2022).

3.3.4 NDCI

Cândido et al. (2016) destacam que os algoritmos derivados de índices de vegetação são muito eficazes na estimativa da concentração de clorofila em um corpo d'água. Mistha e Mishra (2012) apresentam um novo índice denominado Índice de Clorofila por Diferença Normalizada (NDCI), fundamentado em dados de sensoriamento remoto em águas turvas produtivas de

ambientes estuarinos e costeiros. Os autores utilizam o mesmo conceito do NDVI, porém considerando as características espectrais do pico de reflectância situado em 708 nm e o pico de absorção espectral que varia entre 665 nm e 675 nm, ambas sensíveis às flutuações de clorofila. A Equação 1 apresenta a formulação desenvolvida por Mistha e Mishra.

$$C_{chl-a} = \frac{[R_{rs}(708) - R_{rs}(665)]}{[R_{rs}(708) + R_{rs}(665)]} \quad (1)$$

O uso de índices espectrais e processamento de dados em nuvem busca automatizar o monitoramento e reduzir custos (Pereira et al., 2020), gerando equações de ajuste com base em dados coletados para representar o espaço amostral (Barbosa et al., 2019). O NDCI é um índice fundamental para o monitoramento ambiental por meio de detecção remota (Vieira, 2023). O indicador visa prever a presença de clorofila na vegetação e na água, variando de -1 a 1, onde valores acima de 0 indicam a presença de algas (Caballero et al., 2020).

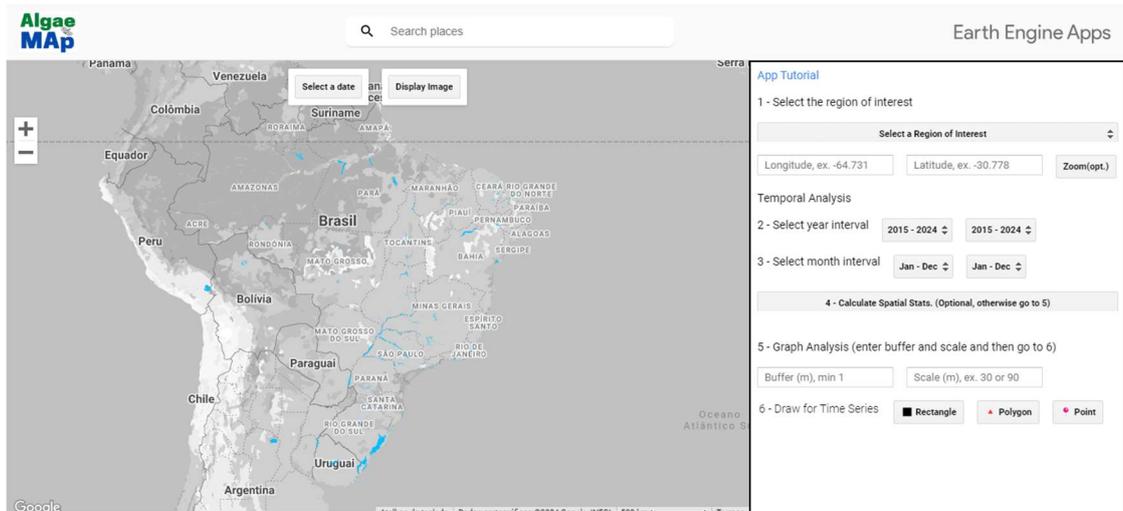
Esse índice espectral se destaca como uma ferramenta crucial para a detecção de clorofila na coluna d'água, funcionando como um indicador da biomassa no sistema e estando diretamente associado ao estado trófico do ambiente, conforme apontado por Rodrigues et al. (2016), que investigaram a estimativa da concentração de Clorofila-a em reservatórios em cascata no rio Tietê, São Paulo.

A análise do NDCI deve ser levada em conta juntamente com outras informações, como dados de campo ou outras medições (Vieira, 2023). Elementos como a presença de outros sólidos em suspensão na água também podem afetar os resultados do NDCI (Khalili & Hasanlou, 2019).

3.3.5 AlgaeMAp

O AlgaeMAp é um aplicativo desenvolvido na plataforma Google Earth Engine para monitorar o florescimento de algas em águas interiores na América Latina, Figura 2. Utilizando dados de refletância de superfície do satélite Sentinel-2, o aplicativo gera imagens do NDCI (Índice de Diferença Normalizada de Clorofila). As imagens são corrigidas para efeitos atmosféricos e brilho solar, criando uma coleção que permite a estimativa da qualidade da água com base na concentração de Clorofila-a.

Figura 2 - Captura de tela do AlgaeMAP



Fonte: Algaemap.

O aplicativo foi desenvolvido com o objetivo de simplificar a obtenção de produtos relacionados à floração de algas em sistemas de monitoramento de águas na América Latina. Sua calibração e validação iniciais baseiam-se na classificação da Clorofila-a e do Índice de Estado Trófico, utilizando dados *in situ* e do Sentinel-2/MSI. Os primeiros resultados foram obtidos para a Bacia do Rio Tietê, localizada no Estado de São Paulo, Brasil.

As amostras *in situ* de Clorofila-a disponíveis no mesmo dia da aquisição de imagens de satélite, diferentes janelas de tempo foram testadas para aumentar o número de amostras. A janela de ± 2 dias mostrou-se a mais eficaz, equilibrando quantidade de amostras, precisão e exatidão para a estimativa de Clorofila-a e classificação do Índice de Estado Trófico (IET). Essa abordagem resultou em 130 amostras de 25 estações coletadas entre agosto de 2015 e novembro de 2020, com maior frequência de dados no reservatório Billings. Além disso, seis amostras adicionais de Clorofila-a foram incorporadas em novembro de 2020, totalizando 136 pares de dados usados para o desenvolvimento do modelo de Clorofila-a.

A estimativa da Clorofila-a é realizada através do cálculo do NDCI, que compara a refletância em comprimentos de onda específicos associados à absorção de clorofila e à refletância da água. De acordo com a Equação 2, o NDCI utiliza os comprimentos de onda centrais da Refletância de Superfície em 705 nm e 665 nm, correspondendo às Bandas 5 (borda vermelha) e 4 (vermelho), respectivamente.

$$NDCI_{sat} = \frac{(SR_{705} - SR_{665})}{(SR_{705} + SR_{665})} \quad (2)$$

Sendo:

SR_{705} valor da refletância de superfície a 705 nm

SR_{665} valor da refletância de superfície a 665 nm

Para calcular a concentração de Chl-a, como ilustrado na Equação 3, foi realizada uma série de testes de ajustes não lineares, incluindo curvas de ajuste polinomial de 2ª ordem e power-law, conforme descrito por Lobo et al. (2021). A análise determinou a utilização da função power-law para essa estimativa. De acordo com os autores, o ajuste polinomial revelou uma tendência parabólica, que resultou em um aumento na estimativa de Chl-a à medida que o NDCI diminuía. A escolha da função power-law foi baseada na sua capacidade superior de modelar a relação entre o NDCI e a concentração de Chl-a de forma mais precisa.

$$Chla = 23.44X(NDCI_{sat} + 1)^{7.95} \quad (3)$$

Sendo:

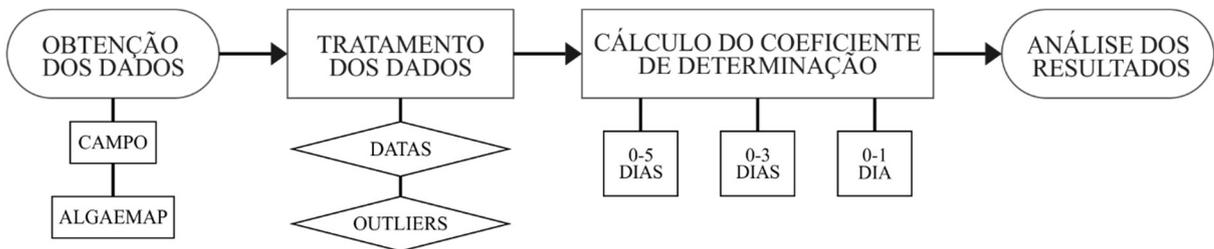
$NDCI_{sat}$ valor calculado pela equação 1.

4 METODOLOGIA

O processo teve início com a coleta dos dados para análise, no entanto os dados *in situ* foram obtidos de estudos prévios realizados na região entre os anos de 2017 e 2019, os quais forneceram informações sobre a concentração de Clorofila-a e as coordenadas geográficas dos pontos amostrais. Com base nessas informações, os mesmos pontos de amostragem foram utilizados para a coleta de dados de Clorofila-a por meio do aplicativo AlgaeMAP.

Com os dados *in situ* e os dados obtidos pelo aplicativo, foi realizada a catalogação de acordo com as datas mais próximas entre ambos os métodos. Além disso, os dados passaram por um processo de filtragem para identificação e exclusão de outliers, assegurando maior consistência nas análises subsequentes. Com o intuito de aprimorar a precisão da análise, calculou-se o coeficiente de determinação para diferentes intervalos de tempo entre as coletas de campo e os dados de satélite, considerando diferenças de 0 a 5 dias, 0 a 3 dias e 0 a 1 dia. Concluídos esses procedimentos, iniciou-se a análise das estatísticas obtidas. A Figura 3 apresenta um fluxograma que resume o processo descrito.

Figura 3 - Fluxograma da metodologia.

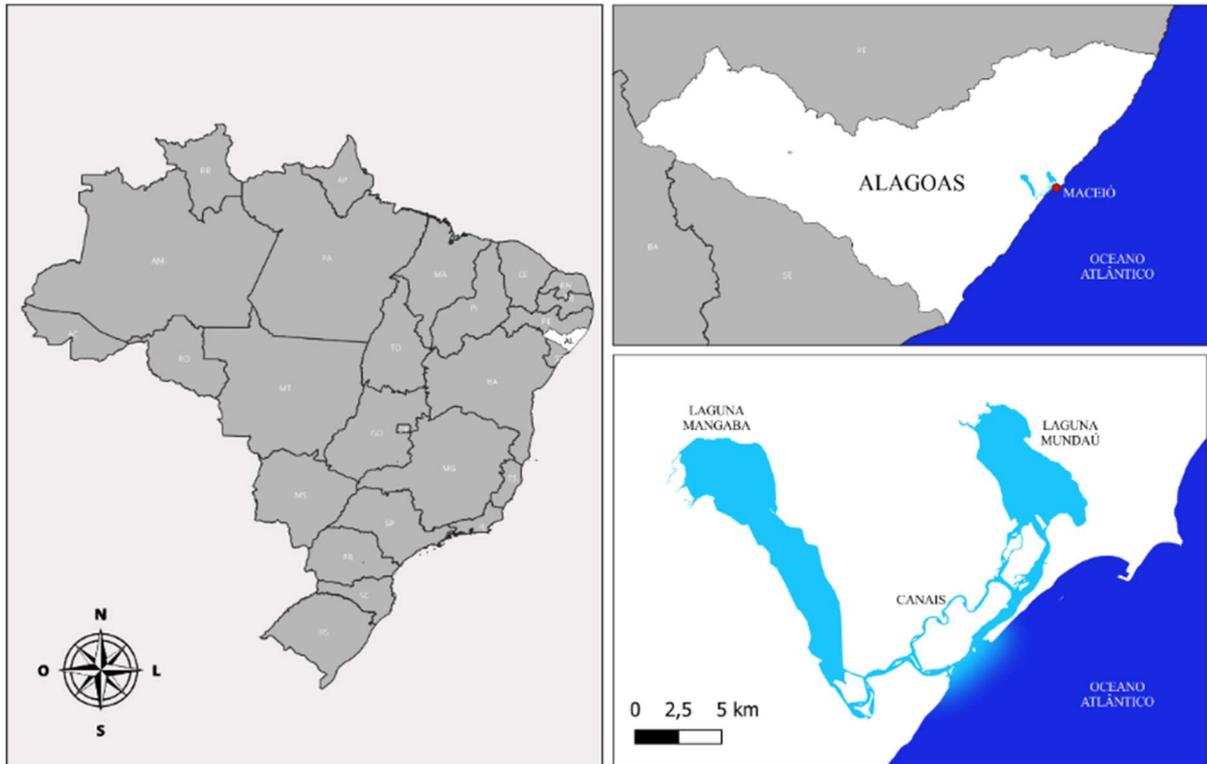


Fonte: autoria própria.

4.1 Área de estudo

Este estudo abrange o Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú – Manguaba (CELMM), localizado entre as latitudes 9°35' e 9°45' Leste e longitudes 35°44' e 35°58' Oeste, na região litorânea do Estado de Alagoas, como mostrado na Figura 4. A área inclui os municípios de Santa Luzia do Norte, Coqueiro Seco, Marechal Deodoro, Pilar e Maceió. A laguna Mundaú, com cerca de 27 km² e profundidade média de 1,7 metros, forma o curso inferior da bacia hidrográfica do rio Mundaú. Já a laguna Manguaba, com 42 km² e profundidade média de 2,1 metros, é alimentada pelos rios Paraíba do Meio, Sumaúma e Remédios. A região dos canais, com aproximadamente 15 km, conecta as lagunas entre si e ao Oceano Atlântico.

Figura 4 - Local de estudo.



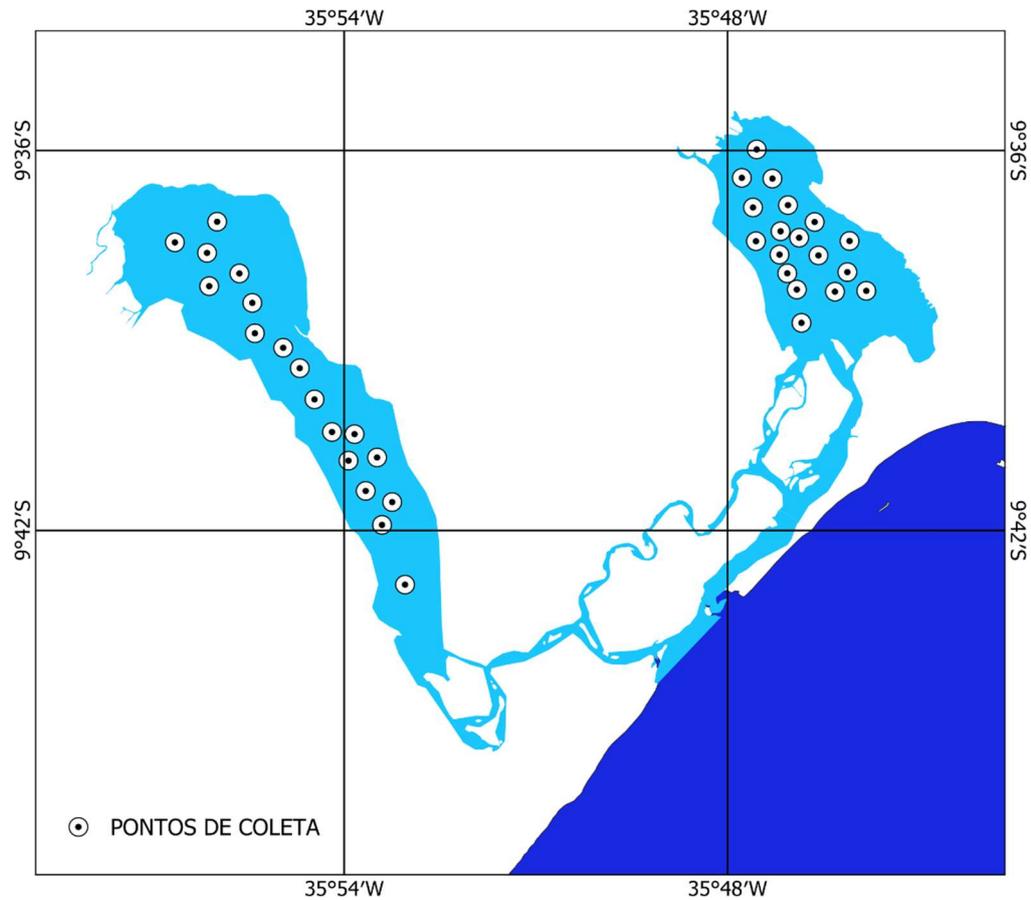
Fonte: IBGE, elaborado pelo autor.

4.2 Dados locais de Clorofila-a

Os dados *in situ* foram coletados em pesquisas realizadas por Lins et al. (2017), Santos et al. (2018) e Tavares et al. (2021), com o objetivo de avaliar a eficácia de novos modelos para estimativa de Clorofila-a, além de métodos de correção atmosférica e solar. Esses estudos utilizaram dados de reflectância de sensoriamento remoto no Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM), considerando uma faixa espectral de 320 a 950 nm.

Os 36 pontos de amostragem foram distribuídos uniformemente ao longo do sistema em estudo, como mostra a Figura 5. Em cada ponto, foram coletadas amostras de água superficial, que foram mantidas em local escuro e refrigerado até a filtragem e o processamento para a análise estimada de Clorofila-a. A metodologia detalhada para coleta e análise dos dados de Clorofila-a no CELMM pode ser encontrada em Santos e et al., (2018) e Tavares et al., (2021).

Figura 5 - Pontos de coleta.

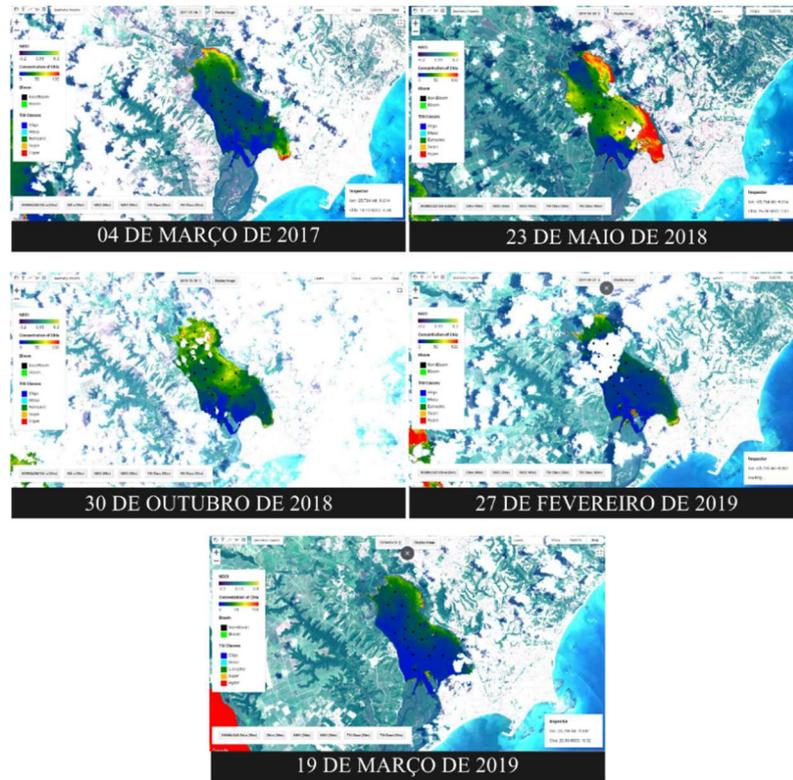


Fonte: autoria própria.

4.3 Estimativa de Clorofila-a a partir de dados de reflectância de satélite

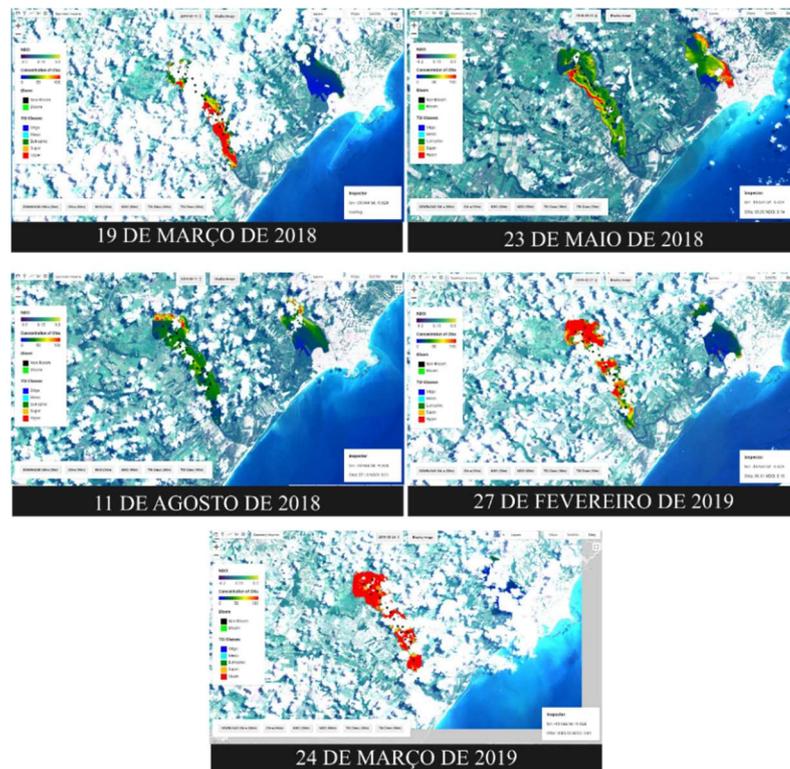
Foram obtidos valores estimados por satélite de Clorofila-a no Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM) em 36 pontos correspondentes às campanhas de campo. Esses pontos foram georreferenciados com o auxílio do aparelho de medição TriOs RAMSES, o que contribuiu para a precisão na extração dos dados de Clorofila-a no aplicativo, conforme ilustrado na Figura 6, para o Mundaú, e na Figura 7, para o Manguaba.

Figura 6 – Campanha no AlgaeMAP do Mundaú



Fonte: autoria própria.

Figura 7 - Campanha no AlgaeMAP da Manguaba



Fonte: autoria própria.

Levando em consideração as datas da análise de campo e a resolução temporal do Sentinel-2, este estudo priorizou a correspondência exata das datas na coleção de dados gerada. Na impossibilidade de datas iguais, foram analisadas datas próximas com uma diferença máxima de 5 dias, considerando as características do satélite utilizado pelo AlgaeMAP. Conforme afirma Betta et al. (2022), o Sentinel-2 possui uma resolução temporal de 5 dias e um tempo de revisita de 16 dias.

Ademais, outro fator que influenciou a coleta dos dados foram as condições climáticas. Em dias com presença de nuvens, a coleta de dados de satélite em alguns dos 36 pontos tornou-se inviável. Dessa forma, foram descartados os pontos onde houve presença de nuvens, pois nesses casos não foi possível capturar os dados do aplicativo.

4.4 Análise e validação dos dados

A fim de obter uma visão mais detalhada da aplicabilidade do AlgaeMAP para a estimativa de Clorofila-a no CELMM, os valores de Clorofila-a coletados em campo e os estimados pelo aplicativo foram tabelados e organizados cronologicamente, de 2018 a 2019. Em seguida, foi realizada uma regressão linear para avaliar o coeficiente de determinação entre os dados das campanhas de campo e os obtidos pelo aplicativo.

Conforme mencionado anteriormente, algumas datas de coleta em campo não coincidiram exatamente com as datas do satélite. Portanto, também foi realizada uma análise do CELMM excluindo progressivamente essas diferenças entre datas. Foram avaliados dados com diferenças de 5, 3 e 1 dia entre as datas de coleta em campo e as datas do satélite fornecidas pelo aplicativo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na aquisição dos dados, um aspecto relevante a ser destacado nas tabelas 1 e 2 é a compatibilidade das datas entre as imagens de satélite (i) e as medições de campo (ii). Na maioria das observações, há uma diferença de até 5 dias entre elas, sendo que apenas em duas ocasiões as medições coincidem exatamente: 23 de março de 2018 e 27 de fevereiro de 2019.

Em 2018, as concentrações de Clorofila-a estimadas pelo AlgaeMAp (i) variaram de 6,93 a 101,75 mg/m³, enquanto as medições de campo (ii) registraram valores entre 1,07 e 164,47 mg/m³. A Tabela 1 apresenta essa variação, destacando em vermelho e azul os valores mínimo e máximo diários, respectivamente. A análise diária revela uma baixa correlação entre as estimativas do aplicativo e as medições de campo, com destaque visual para os valores extremos ao longo de todas as datas.

Tabela 2 - Estimativas de Clorofila-a obtidas pelo AlgaeMAp (i) e medições de campo (ii) em 2018.

(i)	(ii)								
19/mar	22/mar	23/mai	23/mai	23/mai	22/mai	11/ago	06/ago	30/out	25/out
66,88	154,86	36,49	87,58	9,35	68,35	19,99	30,28	6,93	56,12
23,46	59,81	29,08	44,86	41,63	41,65	30,44	22,48	24,58	53,76
40,34	65,15	62,01	50,20	42,95	51,26	30	38,10	40,91	53,32
29,03	46,99	60,39	51,26	36,94	45,92	21,87	34,56	42,21	37,96
67,98	42,72	24,31	57,67	30,94	74,76	24,04	39,58	46,26	47,92
-	-	22,38	164,47	28,19	46,99	28,45	27,77	22,46	47,69
-	-	31,91	70,49	40,34	21,36	26,33	21,79	27,17	39,84
-	-	48,45	59,81	36,1	37,38	43,85	32,72	29,51	31,53
-	-	101,75	61,94	26,58	1,07	34,53	56,13	25,9	39,56
-	-	25,09	66,22	-	-	33,2	39,71	31,11	54,36
-	-	26,43	53,40	-	-	29,73	35,57	26,68	73,06
-	-	65,9	71,56	-	-	29,24	40,59	30,72	51,44
-	-	-	-	-	-	26,48	39,23	36,17	46,81
-	-	-	-	-	-	16,17	63,87	-	-
-	-	-	-	-	-	51,57	51,46	-	-
-	-	-	-	-	-	27,12	38,50	-	-

Fonte: autoria própria.

Para os dados de 2019, as correlações entre os valores podem ser observadas na Tabela 2. As concentrações de Clorofila-a variaram entre 6,75 e 163,09 mg/m³ nas estimativas pelo AlgaeMAp (i), enquanto as medições de campo (ii) registraram valores entre 2,11 e 189,98 mg/m³. Observa-se também uma baixa equivalência entre os valores do aplicativo e os de campo. Embora alguns valores sejam próximos, a maioria apresenta uma discrepância

significativa, indicando variações consideráveis entre as estimativas do AlgaeMAP e as medições de campo.

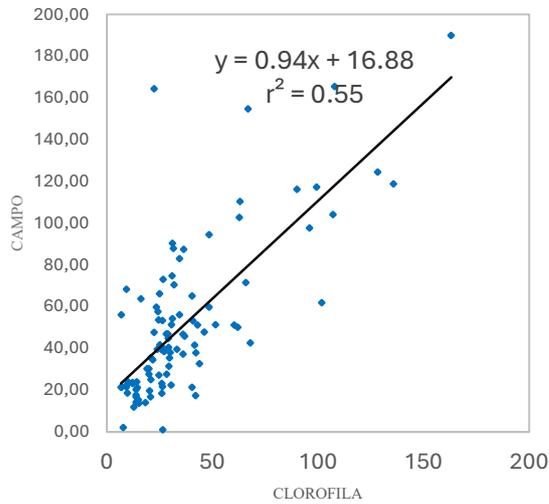
Tabela 3 - Estimativas de Clorofila-a obtidas pelo pelo AlgaeMAP (i) e medições de campo (ii) em 2019.

(i)	(ii)	(i)	(ii)	(i)	(ii)	(i)	(ii)
27/fev	27/fev	27/fev	26/fev	24/mar	22/mar	19/mar	24/mar
20,93	25,03	7,79	2,11	163,09	189,98	6,75	21,41
62,84	102,87	13,92	14,16	107,89	165,61	10,18	23,98
96,08	97,83	14,4	14,74	-	-	9,66	22,61
34,47	83,09	13,98	16,77	-	-	13,84	20,37
31,6	88,01	18,29	14,05	-	-	42,07	17,40
31,05	90,36	12,86	11,99	-	-	20,34	19,69
107,06	104,22	15,02	15,42	-	-	7,28	21,56
48,45	94,54	15,32	13,84	-	-	12,17	23,75
63,15	110,42	13,92	17,71	-	-	12,3	23,20
128,24	124,60	26,04	18,54	-	-	19,09	30,27
99,42	117,31	20,74	16,90	-	-	26,17	23,34
135,73	118,88	24,72	27,23	-	-	14,23	23,96
90,11	116,29	-	-	-	-	9,27	21,61
-	-	-	-	-	-	9,78	18,64
-	-	-	-	-	-	19,96	27,63
-	-	-	-	-	-	14,46	21,25
-	-	-	-	-	-	25,23	41,84
-	-	-	-	-	-	20,86	35,65

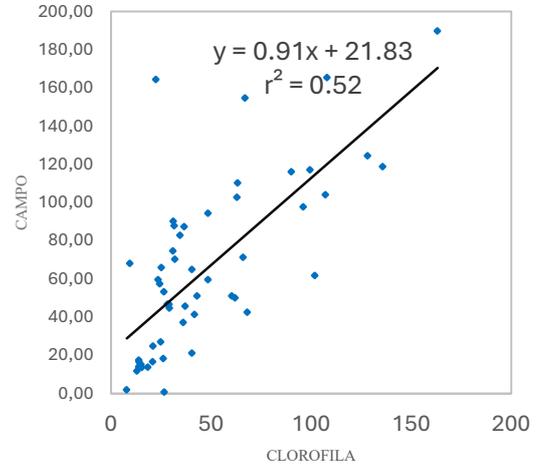
Fonte: autoria própria.

Nas análises dos coeficientes de determinação que levaram em conta diferenças de 5, 3 e 1 dia entre as datas de coleta em campo e as datas das imagens de satélite para o complexo estuarino CELMM, os resultados foram positivos, embora não muito elevados. Entre as três análises, os valores dos coeficientes de determinação ($r^2 \sim 0,52 - 0,55$) são bastante semelhantes, não apresentando grande variação. Isso pode ser observado na Figura 8, apresentada a seguir:

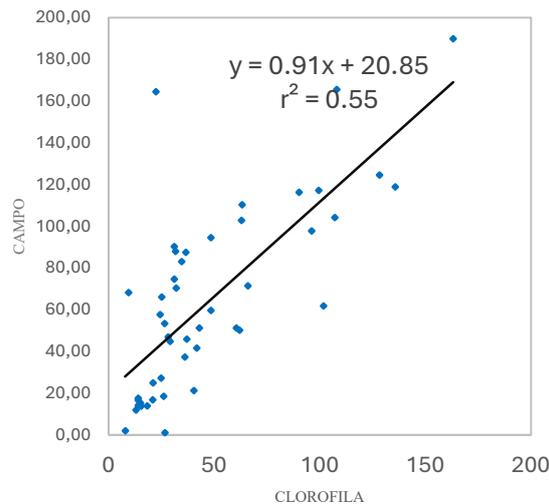
Figura 8 - Correlação entre Clorofila-a medida em campo e estimada por satélite, considerando diferença temporal entre os dados de campo e disponibilidade de imagem de satélite: (a) até 5 dias; (b) até 3 dias e (c) até 1 dia.



(a) CELMM (0-5 dias).



(b) CELMM (0-3 dias).



(c) CELMM (0-1 dia).

Fonte: autoria própria.

Os coeficientes de determinação (R^2) indicam um bom desempenho na estimativa de Clorofila-a no CELMM. O modelo de Tavares *et al.* (2021), com R^2 de 0,95 usando um modelo de 3 bandas, apresenta uma precisão superior em comparação com os demais. Nos estudos de Lins *et al.* (2017), que apresentaram valores superiores a 0,8 nos coeficientes, os resultados mostraram desempenho superior ao modelo utilizado por Lobo *et al.* (2021), que obteve um R^2 de 0,55 neste estudo. Embora os resultados sejam promissores, existe uma diferença de desempenho entre os algoritmos, com Tavares *et al.* (2021) e Lins *et al.* (2017) apresentando

estimativas de Clorofila-a mais precisas em relação ao modelo proposto no AlgaeMAp.

Um estudo mais recente de Oliveira et al. (2024), que utilizaram os mesmos dados de reflectância de campo deste trabalho para avaliar a eficácia de um novo modelo de estimativa de Clorofila-a baseado no NDCI, por meio da simulação de bandas do Sentinel-3, apresentou resultados promissores. Os ajustes linear e polinomial quadrático aplicados pelos autores resultaram em coeficientes de determinação de aproximadamente $R^2 \sim 0,77$ e $R^2 \sim 0,82$, respectivamente, valores superiores aos alcançados com o aplicativo utilizado neste estudo. Com esses resultados, demonstra-se que o mesmo método utilizado pelos autores para o Sentinel-3 pode ser utilizado simulando as bandas do Sentinel-2, no qual é o satélite utilizado pelo AlgaeMAp e assim podendo obter uma calibração mais adequada para essa região.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O aplicativo apresentou resultados positivos para estimar as concentrações de Clorofila-a no Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM), porém, com valores de coeficiente de determinação não muito elevados. A compatibilidade das datas entre o monitoramento de campo e as imagens de satélite não influenciou significativamente nos resultados, pois os valores dos coeficientes de determinação permaneceram relativamente constantes para as 3 análises de diferença de dias, variando apenas entre 0,52 e 0,55.

Outro fator relevante foram os modelos de NDCI presentes na literatura para o mesmo ambiente, os quais demonstraram resultados significativamente superior aos deste estudo. Entre os dois autores citados, Tavares et al. (2021) obteve um desempenho muito superior, e Lins et al. (2017) também apresentou valores elevados de coeficiente de determinação.

Dessa forma, observa-se a necessidade de adequar o modelo de NDCI empregado no AlgaeMAp, preservando as características específicas do CELMM. Recomenda-se, ainda, a ampliação da série temporal de dados de Clorofila-a, para uma melhor compreensão dos padrões de comportamento espaço-temporal. Outra sugestão é testar o modelo NDCI com dados de radiometria de campo, avaliando se uma calibração local poderia aprimorar o desempenho do modelo.

REFERÊNCIAS

AGOSTINI, Raphaela Fuchs de. Caracterização do estado trófico da Lagoa Rodrigo de Freitas – RJ: uma análise integrada de metodologias e variáveis ambientais. 2024. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Recursos Hídricos e Meio Ambiente) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2024.

ALGAEMAP v1.0. Disponível em: <<https://felipelobo.users.earthengine.app/view/algaemapv10>>. Acesso em: 01 Nov. 2024.

ALVES, Alessandra Matias; OLIVEIRA, Ana Claudia Pimentel de. Avaliação da qualidade hídrica das lagoas de Jacarepaguá e Camorim, no município do Rio de Janeiro, RJ. In: **SIMPÓSIO DE GESTÃO AMBIENTAL E BIODIVERSIDADE**, 7., 2018, Seropédica. Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://www.itr.ufrj.br/sigabi/wp-content/uploads/7_sigabi/53Matias_Alessandra_201a205.pdf>. Acesso em: 10 set. 2024.

AMARO, Cristiane Araújo. Proposta de um índice para avaliação de conformidade da qualidade dos corpos hídricos ao enquadramento. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.11606/D.3.2009>>.tde-11082009-121147. Acesso em: 09 set. 2024.

ANDRADE, Eunice Maia de; ARAÚJO, Lúcia de Fátima Pereira; ROSA, Morsyleide de Freitas; GOMES, Raimundo Benvindo; LOBATO, Francisco Antonio de Oliveira. Fatores determinantes da qualidade das águas superficiais na bacia do Alto Acaraú, Ceará, Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 6, p. 1791-1797, nov./dez. 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0103-84782007000600045>>. Acesso em: 10 set. 2024.

BAPTISTA, Gustavo. Fundamentos de Sensoriamento Remoto. [S.l.]: Laboratório de Propulsão Digital, 2021.

BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M.; MARTINS, V. S. Introdução ao Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos: Princípios e Aplicações. 1. ed. São José dos Campos: **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**, 2019. 161 p.

BETTA, M.M.D.; TRABAQUINI, K.; ELIAS, H.T.; SILVA, M.S. (2022). *Mapeamento da soja por meio de imagens Landsat e Sentinel-2 nos municípios de Lages e Capão Alto em Santa Catarina*. **Agropecuária Catarinense**, Florianópolis, v.35, n.2, p.68-73, Maio/Agosto, 2022.

BOYER, J.N.; KELBLE, C.R.; ORTNER, P.B.; RUDNICK, D.T. (2008). Phytoplankton bloom status: Chlorophyll a biomass as na indicator of water quality condition in the southern estuaries of Florida, USA. **Ecological indicators 9s** (2009)s 56– s67.

CABALLERO, I.; FERNÁNDEZ, R.; ESCALANTE, O. M.; MAMÁN, L.; NAVARRO, G. New capabilities of Sentinel-2A/B satellites combined with in situ data for monitoring small harmful algal blooms in complex coastal waters. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 8743, 2020. DOI: 10.1038/s41598-020-65600-1.

CÂNDIDO, A. K. A. A.; FILHO, A. C. P.; HAUPENTHAL, M. R. Water quality and chlorophyll measurement through vegetation indices generated from orbital and suborbital images. **Water Air Soil Pollut.**, v. 227, p. 224, 2016. DOI: 10.1007/s11270-016-2919-7.

CARVALHO JÚNIOR, Osmar Abílio de. Aplicações e perspectivas do sensoriamento remoto para o mapeamento de áreas inundáveis. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 35, n. 4, edição especial XII SINAGEO, 2018.

CASTRO, Ana Anita Aleksandra Seixas de. Avaliação ecotoxicológica de efluentes industriais utilizando *Danio rerio* Hamilton-Buchanan, 1822 (Teleostei, Cyprinidae). 2008. 64 f. Dissertação (Mestrado em Bioecologia Aquática) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

CHAPMAN, D. (Ed.). *Water Quality Assessments: A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring*. 2. ed. Publicado em nome da United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, World Health Organization e United Nations Environment Programme. Cambridge: E&FN Spon, 1996.

CICERELLI, Rejane Ennes. Estudo da ocorrência de cianobactérias no reservatório de Nova Avanhandava-SP por meio da inferência do pigmento. 2010. 150 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2010.

CONAMA. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Estabelece as diretrizes para a qualidade das águas e apresenta a classificação das águas doces, salobras e salinas no território nacional. Brasília, DF: **Conselho Nacional do Meio Ambiente**, 2005.

COSTA, A.M.; LINS R.C.; SANTOS, L.S.; DOMINGOS, H.V.; MATIAS, R.S.; FRAGOSO, C.R. (2019). Avaliação de modelos semi-empíricos para estimativa remota da concentração de sólidos suspensos totais em um sistema estuarino lagunar tropical” in **Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Santos – SP, Abr. 2019.

COSTA, M. P. F.; GALVÃO, S. M. G.; NOVO, E. M. L. M. Quantificação espacial de clorofila-a na água do mar utilizando dados do sensor TM/Landsat-5: região costeira de Ubatuba, SP. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 9., 1998, Santos. São José dos Campos: INPE, 1998. p. 805-816.

CRÓSTA, Álvaro Penteadó. *Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto*. 2. ed. rev. Campinas, SP: IG/UNICAMP, 1992. 170 p.

DALL’OLMO, G.; GITELSON, A. A.; RUNDQUIST, D. C. Towards a unified approach for remote estimation of chlorophyll-a in both terrestrial vegetation and turbid productive waters. *Geophysical Research Letters*, v. 30, n. 18, p. 1-4, 2003.

DUM, E. P. *Fundamentos de Ecologia*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1997. 927 p.

ELLIOTT, M.; MCLUSKY, D. S. The need for definitions in understanding estuaries. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 55, p. 815–827, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1006/ecss.2002.1031>>.

ESCHRIQUE, S. A.; COELHO, L. H.; OLIVEIRA, E. N.; BRAGA, E. S. Qualidade da água

como ferramenta na gestão ambiental de estuários – exemplo do litoral sul de São Paulo. In: **V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE OCEANOGRAFIA - OCEANOGRAFIA E POLÍTICAS PÚBLICAS**, 2011, Santos, SP.

EUROPEAN SPACE AGENCY - ESA. MultiSpectral Instrument (MSI). 2018. Disponível em: <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/instrument-payload>>. Acesso em: 01 out. 2024.

FERREIRA, Monique Sacardo. Inferência espacial de clorofila a por redes neurais artificiais aplicadas a imagens multiespectrais e medidas tomadas in situ. 2011. 102 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2011.

FERREIRA, Renato Martins Passos; BARBOSA, Claudio Clemente Faria; MARTINS, Vítor Souza; CARVALHO, Lino Augusto Sander de; JORGE, Daniel Schaffer Ferreira; SILVA, Maria Paula. Aplicação do sensor MSI/Sentinel-2 na estimativa de componentes óticamente ativos em lagos de planície de inundação amazônica. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 18., 2017, Santos. Anais [...]. São José dos Campos: INPE, 2017. p. 1283-1290.

FIGUEIREDO, Divino. Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto. [S.l.]: Companhia Nacional de Abastecimento, 2005. Apostila.

FILHO, MARCONE C.O.. Modelos semiempíricos para estimativa remota de matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM) em um estuário tropical produtivo. 2022. 85 f. Dissertação (Mestrado Recursos Hídricos e Saneamento) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió - AL, 2022.

FLEMMING, B. W. Geology, Morphology, and Sedimentology of Estuaries and Coasts. In: WOLANSKI, E.; MCLAUSLAN, D. (Org.). **Estuarine and Coastal Geology**. Elsevier Inc., 2011. Cap. 3.02.

FLORENZANO, Teresa Gallotti. Iniciação em Sensoriamento Remoto. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

FORMAGGIO, Antonio Roberto; SANCHES, Ieda Del'Arco. Sensoriamento remoto em agricultura. São Paulo: Oficinas de Textos, 2015.

GAIDA, William; BREUNIG, Fábio Marcelo; GALVÃO, Lênio Soares; PONZONI, Flávio Jorge. Correção atmosférica em sensoriamento remoto: uma revisão. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 1, p. 229-248, 2020.

IBGE. Malhas Territoriais. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>>. Acesso em: 1 mai. 2024.

ISHRA, Sachidananda; MISHRA, Deepak 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. DOI: 10.1016/j.rse.2011.10.016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425711005722>>. Acesso em: 10 out. 2024.

JOSÉ, Edson Anselmo. Estimativa do tempo de renovação da água no estuário do rio Incomati: contribuição para o estudo da qualidade de água. 2004. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Física) – Universidade Eduardo Mondlane, Departamento de Física, Moçambique, 2004. Disponível em: <<http://monografias.uem.mz/handle/123456789/1007>>. Acesso em: 01 set. 2024.

KENNISH, M. J.; PAERL, H. W. (Eds.). Coastal Lagoons: Critical Habitats of Environmental Change. Boca Raton: CRC Press, 2010.

KHALILI, M. H.; HASANLOU, M. Harmful algal blooms monitoring using Sentinel-2 satellite images. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-4/W18, p. 609–613, 2019. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W18-609-2019.

KIRK, J. T. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. 3. ed. London: Cambridge University Press, 2011. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=It5GePwa2EIC&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 10 out. 2024.

LIBÂNIO, Paulo Augusto Cunha; CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos; NASCIMENTO, Nilo de Oliveira. A dimensão da qualidade de água: avaliação da relação entre indicadores sociais, de disponibilidade hídrica, de saneamento e de saúde pública. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 10, n. 3, p. 219-228, jul.-set. 2005.

LIMA FILHO, Marcone Correia de Oliveira. Modelos semiempíricos para estimativa remota de matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM) em um estuário tropical produtivo. 2022. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) — Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2022.

LINS, Regina Camara; MARQUES, David M. L. da; FRAGOSO JÚNIOR, Carlos Ruberto; SANTOS, Letícia da Silva; COSTA, Amesson Marques da; DOMINGOS, Heloisa Vital; MATIAS, Rafael dos Santos. Estimativa de clorofila-a em um complexo estuarino-lagunar utilizando análise derivativa de curvas hiperespectrais. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 19., 2019. Anais.... São José dos Campos: INPE, 2019.

LINS, Regina Camara; MARTINEZ, Jean-Michel; MARQUES, David da Motta; CIRILO, José Almir; FRAGOSO Jr., Carlos Ruberto. Assessment of Chlorophyll-a Remote Sensing Algorithms in a Productive Tropical Estuarine-Lagoon System. **Remote Sensing**, v. 9, n. 6, p. 516, 2017. doi:10.3390/rs9060516.

LOPES, Fernando B.; BARBOSA, Cláudio C. F.; NOVO, Evlyn M. L. de M.; ANDRADE, Eunice M.; CHAVES, Luiz C. G. Modelagem da qualidade das águas a partir de sensoriamento remoto hiperespectral. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 18, p. S13–S19, Supl., 2014. Disponível em: <<http://www.agriambi.com.br>>. Acesso em: 26 set. 2024.

LORENZZETTI, João A. Princípios Físicos de Sensoriamento Remoto. São Paulo: Edgard Blucher, 2015.

LUZ, Teresa Elane Bezerra. Influência das diferentes configurações de embocadura na qualidade da água do Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM). 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal do Rio

Grande do Norte, Natal, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/48369>> Acesso em: 01 de dezembro de 2024>.

MACÍAS, Erick Manzano. A comunidade zooplanctônica em um gradiente de poluição antrópica em um Complexo Estuarino Lagunar. 2018. Dissertação (Mestrado em Biologia Animal) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto, 2018.

MARINS, Rozane Valente; PAULA FILHO, Francisco José de; ROCHA, Carlos Artur Sobreira. Geoquímica de fósforo como indicadora da qualidade ambiental e dos processos estuarinos do Rio Jaguaribe - Costa Nordeste Oriental Brasileira. **Química Nova**, v. 30, n. 5, p. 1208-1214, 2007.

MATTHEWS, Mark William. Current review of empirical procedures of remote sensing in inland and near-coastal transitional waters. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, n. 21, p. 6855-6899, 2011.

MENDES, Newton César de Lima et al. Análises dos indicadores físico-químicos, microbiológicos e parasitológicos de contaminação ambiental em amostras de água da Lagoa Mundaú, em Alagoas. **Revista Principia**, João Pessoa, n. 50, p. 120-129, jul. 2020. ISSN 2447-9187. Disponível em: <<https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/3533>>. Acesso em: 01 Dez. 2024. doi: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-03062015v1n50p120-129>.

MERTES, L.; DEKKER, A.; BRAKENRIDGE, G.; BIRKETT, C.; LETOURNOU, G. Rivers and lakes. In: USTIN, S. (Ed.) Manual of remote sensing: remote sensing for natural resource management and environmental monitoring. New York: John Wiley & Son, 2004. p. 345-400.

MMA – Ministério do Meio Ambiente (2005). Plano de Ação e Gestão Integrado do Complexo Estuarino Lagunar Mundaú Manguaba (CLMM), Alagoas.

MORAES, Elisabete Cariade. Fundamentos de Sensoriamento Remoto. São José dos Campos: INPE, 2002.

NAGEL, G. E LOBO, F. (2021). “Tutorial para o uso do App AlgaeMap (Algae Bloom Monitoring Application). Versão 1”. Laboratório GeotecHídrica, CDTec/UFPel. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas – RS, 2021.

NISIEIMON, Vitor Hiroya. Estimativa de biomassa de pastagem utilizando técnicas de seleção de atributos e aprendizagem de máquina a partir de imagens do Sentinel-2. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Agrícolas) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, 2020.

ODUM, E. P. Fundamentos de Ecologia. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1997. 927 p.

OLIVEIRA, Iranildo Campos de; SILVA, Silmayko Gomes da; LINS, Regina Camara; FRAGOSO JÚNIOR, Carlos Ruberto. Estimativa de clorofila-a utilizando simulação de bandas do satélite Sentinel 3 em um sistema estuarino-lagunar tropical. In: **SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE**, XVII, 2024, João Pessoa. Anais do XVII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. João Pessoa: ABRHidro, 2024.

PEREIRA, R. C.; LATUF, M. O.; CANAVEZ, P. L.; PAMPLIN, P. A. Z.; MARTINS, G. F. L.; SILVA, P. R. S.; BERALDO, D. C.; MELO, D. A. S. Diagnóstico preliminar da eutrofização no reservatório de Furnas no entorno de Alfenas/MG. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 20., 2023, Florianópolis. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 2023. Disponível em: <<http://marte2.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marte2/2023/05.03.19.14/doc/156482.pdf>>. Acesso em: 1 Nov. 2024.

PEREZ, Gabriel Guariglia. Uso de imagens do Sentinel 2 na estimativa de parâmetros biofísicos da vegetação em áreas de Mata Atlântica. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

PINHEIRO, MARIANA K.R.. Circulação hidrodinâmica e renovação das águas no complexo estuarino lagunar mundaú-manguaba para diferentes configurações de embocaduras. 2020. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN, 2020.

PIZANI, Fernanda Mara Coelho; FERREIRA, Adrielly Fonseca Fialho; MAILLARD, Philippe. Estimativa de parâmetros não-opticamente ativos de qualidade da água a partir de sensores Sentinel-2/MSI e Landsat-8/OLI. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 23, n. 90, p. 399-414, dez. 2022.

PORTO, Monica Ferreira do Amaral. Sistemas de gestão da qualidade das águas: uma proposta para o caso brasileiro. 2002. Tese (Livre Docência) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. Acesso em: 09 set. 2024.

POTES, M. et al. Remote sensing of water quality parameters over Alqueva Reservoir in the south of Portugal. **International Journal of Remote Sensing**, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/01431161003747513>>. Acesso em: 19 out. 2024.

POTES, M. et al. Use of Sentinel 2 – MSI for water quality monitoring at Alqueva reservoir, Portugal. *Proc. IAHS*, v. 380, p. 73–79, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/piahs-380-73-2018>>.

QUARTAROLI, Carlos Fernando; VICENTE, Luiz Eduardo; ARAUJO, Luciana Spinelli de. Sensoriamento remoto. In: **Geotecnologias e geoinformação**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 61-79.

QUEIROZ, Manoel Moisés Ferreira de; IOST, Caroline; GOMES, Simone Damasceno; VILAS BOAS, Márcio Antonio. Influência do uso do solo na qualidade da água de uma microbacia hidrográfica rural. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Mossoró, v. 5, n. 4, p. 200-210, out./dez. 2010. Disponível em: <<http://revista.gvaa.com.br>>. Acesso em: 10 set. 2024.

RODRIGUES, Thanan et al. Comparação entre métodos empíricos para estimativa da concentração de clorofila-a em reservatórios em cascata (Rio Tietê, São Paulo). **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 68/1, p. 181-192, 2016. Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto. ISSN: 1808-0936.

RUDORFF, C. M. et al. Análise derivativa de dados hiperespectrais medidos em nível de campo e orbital para caracterizar a composição de águas opticamente complexas na Amazônia. **Acta**

Amazônica, v. 37, n. 2, p. 243-250, jun. 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0044-59672007000200014>>. Acesso em: 19 out. 2024.

SALICIO, Claudio Ubirajara; CASTRO, Pedro Arthur Augusto de. O espectro eletromagnético e as interações de cada faixa espectral com a matéria. In: **ECF5726-1 Física Óptica: Teoria, Experimentos e Aplicações**. 2016. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1884377/mod_resource/content/0/%3D%3D%20S EMINARIO%2024ago16-TEXTO.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1884377/mod_resource/content/0/%3D%3D%20S%20EMINARIO%2024ago16-TEXTO.pdf)> Acesso em: 16 set. 2024.

SANTOS, L.S.; LINS, R.C.; FRAGOSO, C.R. (2018). Calibração de algoritmos semi-empíricos para estimativa de clorofila-a no sistema estuarino lagunar mundaú-manguaba (AL) in **Anais do XIV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, Maceió – AL, Nov. 2018.

SAUSEN, Tania Maria. Desastres Naturais e Geotecnologias - Sensoriamento Remoto. Cadernos Didáticos, n. 2. São José dos Campos: INPE, 2008.

Secretaria de educação do Paraná. Imagem ilustrativa Espectro eletromagnético. Disponível em: <<http://www.fisica.seed.pr.gov.br/modules/galeria/detalhe.php?foto=118&evento=2>>. Acesso em: 01 dez. 2024.

SILVA, Maria do Socorro Rocha da; MIRANDA, Sebastião Atila Fonseca; SANTANA, Genilson Pereira. Bacia Hidrográfica do Rio Amazonas: Condições de suas águas versus Resolução nº 357/CONAMA/2005. Volume 6, p. 83-90, 2016.

SILVA, Robert Germano Alves da. Avaliação da qualidade ambiental do Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM), Alagoas: uma abordagem biológica e da paisagem. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado Profissional em Tecnologias Ambientais) – Instituto Federal de Alagoas, Marechal Deodoro, 2020.

SIMÕES, Aline Machado. Análise do comportamento de clorofila-a no reservatório Chasqueiro/RS com auxílio do Algae Bloom Monitoring Application - AlgaeMap. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Hídrica) – Universidade Federal de Pelotas, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Pelotas, 2023.

SORIA, X. et al. Validación de algoritmos para la estimación de la Clorofila-a con Sentinel-2 en la Albufera de Valencia. In: RUIZ, L. A.; ESTORNELL, J.; ERENA, M. (Eds.). Nuevas plataformas y sensores de teledetección. XVII **Congreso de la Asociación Española de Teledetección**, Murcia, 3-7 out. 2017. p. 289-292.

SOUZA, Mariana Elissa Vieira de. Uso do sensoriamento remoto para estimar a concentração de componentes opticamente ativos na Lagoa da Pampulha - MG. 2019. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

STREIT, Nivia Maria; CANTERLE, Liana Pedrolo; CANTO, Marta Weber do; HECKTHEUER, Luísa Helena Hycheki. The chlorophylls. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 748-755, mai.-jun. 2005.

TAVARES, M. H.; LINS, R. C.; HARMEL, T.; FRAGOSO Jr., C. R.; MARTÍNEZ, J.-M.; MOTTA-MARQUES, D. Atmospheric and sunglint correction for retrieving chlorophyll-a in a productive tropical estuarine-lagoon system using Sentinel-2 MSI imagery. **ISPRS Journal of**

Photogrammetry and Remote Sensing, v. 174, p. 215–236, 2021.

TOMING, K. et al. First experiences in mapping lake water quality parameters with Sentinel-2 MSI imagery. **Remote Sensing**, v. 8, n. 8, p. 640, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs8080640>. Acesso em: 19 out. 2024.

VIEIRA, José Guilherme Moreira Simões. Identificação de ocorrência de florescência de algas com recurso a imagens de Sentinel-3. 2023. Dissertação (Mestrado em Tecnologias de Informação Geográfica) – Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Matemática, 2023. Orientadores: Professora Doutora Cidália Fonte e Doutor Diogo Duarte.

WANDERLEY, A.D.P.; MEDONÇA, A.G.R.; OLIVEIRA, L.C.; FIGUEIREDO, I.M.; FERNANDES, A.P.; BATALHA, L.T.; BOTERO, W.G. (2020). Complexo estuarino lagunar mundaú-manguaba: caracterização da matéria orgânica natural e interação com íons hg^{2+} . **Quim. Nova**, Vol. 43, No. 2, 206-211, 2020.

ZHANG, X.; FAGHERAZZI, S.; LEONARDI, N.; LI, J. A positive feedback between sediment deposition and tidal prism may affect the morphodynamic evolution of tidal deltas. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 123, p. 2767–2783, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2018JF004639>