

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS SERTÃO
CURSO ENGENHARIA CIVIL

IRANILDO CAMPOS DE OLIVEIRA

**ESTIMATIVA DE CLOROFILA-A UTILIZANDO SIMULAÇÃO DE BANDAS DO
SATÉLITE SENTINEL 3 EM UM SISTEMA ESTUARINO-LAGUNAR TROPICAL**

Delmiro Gouveira - AL

2024

IRANILDO CAMPOS DE OLIVEIRA

**ESTIMATIVA DE CLOROFILA-A UTILIZANDO SIMULAÇÃO DE BANDAS DO
SATÉLITE SENTINEL 3 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.

Orientadora: Profa. Dra. Regina Camara Lins.

Delmiro Gouveira - AL

2024

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca do Campus Sertão
Sede Delmiro Gouveia

Bibliotecária responsável: Renata Oliveira de Souza – CRB-4/2209

O48e Oliveira, Iranildo Campos de

Estimativa de clorofila-a utilizando simulação de bandas do Satélite Sentinel 3 em um Sistema Estuarino-Lagunar Tropical / Iranildo Campos de Oliveira. – 2024.

38 f. : il.

Orientação: Regina Câmara Lins.

Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Curso de Engenharia Civil. Delmiro Gouveia, 2024.

1. Engenharia civil. 2. Sistema Estuarino-Lagunar Tropical. 3. Sensoriamento remoto. 4. Satélite Sentinel-3. 5. Clorofila-a. 6. Recursos hídricos. I. Lins, Regina Câmara, orient. II. Título.

CDU: 626

Folha de Aprovação

IRANILDO CAMPOS DE OLIVEIRA

ESTIMATIVA DE CLOROFILA-A UTILIZANDO SIMULAÇÃO DE BANDAS DO SATELITE SENTINEL 3 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.

Documento assinado digitalmente
 REGINA CAMARA LINS
Data: 03/12/2024 10:07:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientadora - Profa. Dra. Regina Camara Lins
Universidade Federal de Alagoas

Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 MANOEL MARIANO NETO DA SILVA
Data: 03/12/2024 10:15:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador Externo – Prof. Dr. Manoel Mariano Neto da Silva
Universidade Federal de Alagoas

Documento assinado digitalmente
 WENDELL JOSE SOARES DOS SANTOS
Data: 03/12/2024 11:16:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador Interno – Prof. Dr. Wendell Jose Soares dos Santos
Universidade Federal de Alagoas

Dedico

Aos meus pais João Batista e Marineide, as minhas maiores referências, aos meus irmãos Luan e Vânia, que sempre me incentivaram e aos meus sobrinhos Dom e Lua, que fazem dos meus dias mais felizes.

AGRADECIMENTOS

Na estrofe de uma de suas canções Belchior diz:

“Presentemente, eu posso me
Considerar um sujeito de sorte
Porque apesar de muito moço
Me sinto são, e salvo, e forte”

E hoje, como o autor dessa canção, me sinto muito sortudo, sortudo por ter pessoas maravilhosas em minha vida, pessoas que me ajudaram nessa longa e difícil trajetória da graduação do curso de Engenharia Civil. Sou grato não só pelas pessoas que fizeram parte diretamente, mas sinto que cada pessoa que passou em minha vida contribuiu de alguma forma para que esse momento chegasse.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão, primeiramente, aos meus pais, Marineide e João Batista, por me criarem com tanto amor, dedicação e carinho. Para mim, é extraordinariamente inspirador e marcante que, mesmo sem terem tido acesso à educação em suas próprias vidas, eles tenham investido tanto esforço e incentivado de forma tão intensa para que eu pudesse ter um futuro diferente. Suas atitudes refletem um exemplo de amor e determinação que levarei comigo para sempre.

Quero agradecer a meu irmão Luan, acho que o destino não podia me dar um irmão mais velho melhor. Sou muito grato a ele por ter me acolhido em sua casa e me sustentado durante todos esses anos sem nunca reclamar, me criando praticamente como se fosse um filho seu. Tenho nele uma inspiração como homem e pessoa, e espero que um dia consiga retribuir tudo que ele fez por mim.

Sou muito grato também a minha irmã Vânia, que conviveu comigo desde a infância, foi quem me influenciou em diversos aspectos de minha vida e de certa maneira moldou meu caráter. Meu coração enche de saudades ao lembrar da nossa casa, brincadeiras e até mesmo das brigas.

Quero agradecer também a família que obtive mais recentemente em minha vida, minha cunhada Lauana, e meus sobrinhos Dom e Lua. Sou muito grato por ter todos vocês em minha vida.

Quero agradecer a toda minha família, Família Campos e Família Oliveira, não poderia pedir uma família melhor de ambas as partes, quero sempre compartilhar momentos com todos vocês, estar ao lado sempre que possível, estar no Covão sempre que possível. Um agradecimento especial minha vó Joanita e minhas primas/irmãs Aurilene e Marcia.

E partindo para minha trajetória na Universidade, quero agradecer a todos meus colegas de turma, realmente fiz muitos amigos e pessoas que admiro muito. Alan, Raiane, Mirtts, Marivaldo, Silvia, Hildegard, Vitória e todos os amigos da turma 2018.1. Sou muito feliz em ter entrado na universidade quando entrei, pois, pude conhecer, conviver e ser amigo de todos vocês.

Quero agradecer ao grupo PET Engenharias, sou muito grato por ter feito parte desse grupo, nele pude ter as melhores experiências que poderia ter na universidade, pude conhecer muitas pessoas e aprender com muitas pessoas. Sinto que depois do PET minha vida mudou completamente, o crescimento que tive durante os anos de convívio no programa são inenarráveis. Sou muito grato pelos amigos que fiz no PET, laços de amizade que espero durar a vida toda, em especial aos meus xodós Eduarda e Erik, espero ter vocês para sempre em minha vida.

Quero agradecer a meu colega de turma, colega de PET, amigo e praticamente irmão Silmayko, que depois de compartilharmos a sala de aula, as reuniões de PET, os rolês, agora estamos compartilhando a área de estudo e a apresentação do TCC. Espero compartilhar mais inúmeros momentos com você amigo.

Quero agradecer a todos os professores que fizeram parte de minha graduação, obrigado pelos ensinamentos, conselhos, pelos elogios e pelas críticas, pelos momentos de dificuldade passado em disciplinas e pelas notas baixas. Todos esses momentos me ajudaram a ser quem eu sou hoje. Um agradecimento especial ao Professor Alvelando Ricardo, que foi meu professor durante toda a graduação e tutor no PET Engenharias, obrigado pela paciência, por me ajudar em tantos momentos difíceis e pelos conselhos dados.

Quero agradecer a minha Orientadora Profa. Dra. Regina Camara Lins, por ter aceitado o desafio de ser minha orientadora. Obrigado por ter tido paciência e não ter desistido de mim, obrigado pelos conselhos e pelos puxões de orelha, sem a senhora esse momento não seria possível.

E por fim obrigado a UFAL, por ser minha casa durante todos esses anos, e por ter me permitido realizar o sonho de ser Engenheiro Civil.

Justificar tragédia como “vontade divina” tira
da gente a responsabilidade por nossas
escolhas.

(Umberto Eco)

RESUMO

Um dos principais fatores que afetam a integridade dos corpos hídricos é o despejo excessivo de matéria orgânica, somado à carga natural advinda da bacia hidrográfica. Esses fatores contribuem para o aumento das concentrações de nutrientes no sistema, o que pode intensificar o processo de eutrofização e o aumento da frequência de florações de microalgas. A avaliação do estado trófico pode ser realizada por meio do monitoramento contínuo da concentração de clorofila-a, um pigmento verde presente nas microalgas. Uma técnica que vem ganhando espaço em substituição ao monitoramento tradicional é o uso de sensores *in situ* e satélites para obter propriedades radiométricas e estimar a concentração de clorofila-a em corpos d'água. Neste estudo, avaliou-se a eficácia do modelo NDCI, que utiliza duas bandas de satélite para estimar a concentração de clorofila-a utilizando dados de reflectância medidos *in situ* e simulando as bandas do satélite Sentinel-3 no Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM). Este sistema tem sofrido grandes impactos negativos devido à ocupação de suas áreas circundantes. Foram realizadas comparações entre os valores de reflectância medidos *in situ* e os simulados com base nas bandas do Sentinel-3. Adicionalmente, compararam-se os valores de clorofila-a obtidos em campo com aqueles estimados a partir do NDCI, utilizando ajustes lineares e polinomiais. Ambos os métodos apresentaram bons resultados, com coeficientes de determinação (r^2) superiores a 0,75. Esses resultados indicam que os modelos propostos são promissores para estimativas precisas de clorofila-a, oferecendo vantagens significativas em relação a outros modelos.

Palavras-chave: sensoriamento remoto; sentinel-3; clorofila-a; NDCI; sistema estuarino.

ABSTRACT

One of the main factors affecting the integrity of water bodies is the excessive discharge of organic matter, combined with the natural load from the watershed. These factors contribute to the increase in nutrient concentrations in the system, which can intensify the eutrophication process and increase the frequency of microalgae blooms. The assessment of the trophic state can be performed through continuous monitoring of the concentration of chlorophyll-a, a green pigment present in microalgae. A technique that has been gaining ground as a replacement for traditional monitoring is the use of in situ sensors and satellites to obtain radiometric properties and estimate the concentration of chlorophyll-a in water bodies. In this study, the effectiveness of the NDCI model was evaluated, which uses two satellite bands to estimate the concentration of chlorophyll-a using reflectance data measured in situ and simulating the bands of the Sentinel-3 satellite in the Mundaú-Manguaba Estuarine Lagoon Complex (CELMM). This system has suffered major negative impacts due to the occupation of its surrounding areas. Comparisons were made between the reflectance values measured in situ and those simulated based on the Sentinel-3 bands. Additionally, the chlorophyll-a values obtained in the field were compared with those estimated from the NDCI, using linear and polynomial fits. Both methods presented good results, with coefficients of determination (r^2) higher than 0.75. These results indicate that the proposed models are promising for accurate chlorophyll-a estimates, offering significant advantages over other models.

Keywords: remote sensing; sentinel-3; chlorophyll-a; NDCI; estuarine system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Concentração de Superfície de água nos biomas brasileiros	16
Figura 2- Obtenção de imagem por sensoriamento remoto.....	20
Figura 3 - Fluxograma da metodologia	25
Figura 4 - Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba	26
Figura 5 - Pontos de coleta	27
Figura 6 - Curva de Reflectância em relação ao comprimento de onda.....	29
Figura 7- Ajuste de função linear e quadrática baseado no NDCI+1 para estimar clorofila-a.	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
SST	Sólidos Suspensos Totais
Rsr	Refletância em sensoriamento remoto
SR	Sensoriamento Remoto
CDOM	Matéria Orgânica Dissolvida Colorida
NDCI	Índice de Diferença Normalizada da Clorofila
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
EVI	Índice de Vegetação Aprimorado
NDBI	Índice de Diferenças Normalizadas do Solo
BAI	Índice de Área Queimada
NDWI	Índice de Água por Diferença Normalizada
ESA	Agência Espacial Europeia
OLCI	Ocean and Land Colour Instrument
SLSTR	Sea and Land Surface Temperature Radiometer
SRAL	Synthetic Aperture Radar Altimeter
CELMM	Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba

LISTA DE SÍMBOLOS

\propto	Proporcional
K	Kelvin
μm	Micrometro
nm	Nanômetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo Geral	15
2.2	Objetivos Específicos	15
3	FUNDAMENTAÇÃO TEORICA	16
3.1	Diversidade e Caracterização das Águas Interiores no Brasil	16
3.2	Estuários	17
3.3	Sensoriamento remoto (SR)	19
3.3.1	Funcionamento da captação de imagem através do satélite	20
3.3.2	Monitoramento de clorofila-a.....	21
3.3.3	Índice de Diferença Normalizada de Clorofila (NDCI)	22
3.3.4	Sentinel-3.....	23
4	METODOLOGIA	25
4.1	Área de estudo	25
4.2	Dados de Campo	26
4.3	Obtenção das reflectâncias simuladas do Sentinel-3	27
4.4	Estimativa do Índice de Diferença Normalizada de Clorofila (NDCI)	28
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	32
	REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial para a vida na Terra, desempenhando um papel crucial em atividades como consumo humano, lazer e irrigação, segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2024). Entre os diversos ecossistemas aquáticos, destacam-se os estuários, descritos por Schmiegelow (2004) como regiões costeiras parcialmente fechadas, onde ocorre a mistura de água doce e salgada. Essas áreas, além de sua importância ecológica, frequentemente abrigam grandes concentrações populacionais humanas.

De acordo com Magossi (2003), as atividades humanas nessas regiões aumentam significativamente a carga de nutrientes nos corpos d'água, desencadeando processos de eutrofização cultural. Carlson (1977) ressalta que este fenômeno está diretamente relacionado a altos níveis de clorofila-a, que promovem a proliferação de algas (florações) e a consequente degradação da qualidade da água. Assim, conforme enfatiza a ANA (2024), é indispensável um monitoramento contínuo e rigoroso da qualidade da água para assegurar sua adequação aos múltiplos usos e a preservação desses ecossistemas sensíveis.

Os métodos de monitoramento da qualidade da água abrangem desde técnicas *in situ* até o uso de sensoriamento remoto (SR), cada um com aplicações específicas para diferentes parâmetros. As medições realizadas diretamente em campo, como análises de pH, turbidez e cor, fornecem avaliações precisas e em tempo real, como em estudos feitos por Moraes (2022), assim como medições radiométricas para a determinação da reflectância (R_{sr}) e coletas de amostras de água para análise laboratorial de clorofila-a e Sólidos Suspensos Totais (SST) como feito por Lins *et al.* (2017). No entanto, para o monitoramento de corpos d'água em larga escala e de forma contínua, o SR se mostra indispensável, permitindo análises abrangentes e sistemáticas, conforme observado por Moraes e Lorandi (2016). Nesse contexto, estudos recentes, como os de Borges (2018) e Tavares (2021), investigaram o potencial do uso de satélites na determinação da concentração de clorofila-a, demonstrando a eficácia do SR em ambientes aquáticos complexos e variados.

O uso de satélites amplia significativamente a capacidade de monitoramento e gestão de recursos hídricos, complementando as análises locais com dados em escala regional. No entanto, Borges (2018) aponta que a elevada complexidade óptica das águas interiores torna o monitoramento da concentração de clorofila-a um desafio significativo para o sensoriamento remoto, especialmente em ambientes com alta variação de partículas e matéria orgânica

dissolvida. Para enfrentar esse obstáculo, pesquisadores vêm aprimorando modelos para aumentar a precisão das estimativas, desenvolvendo abordagens adaptadas a esses ambientes.

Nesse contexto, modelos de sensoriamento remoto utilizando duas e três bandas, aplicados em sensores como MODIS (Terra/Aqua), MSI (Sentinel-2) e OLCI (Sentinel-3), têm sido amplamente aplicados na estimativa de clorofila-a em diferentes tipos de corpos d'água, como demonstrado por Santos et al. (2019). Esses modelos contribuem significativamente para o avanço do monitoramento ambiental em larga escala, particularmente em ecossistemas aquáticos complexos.

Um exemplo notável é o Índice de Diferença Normalizada da Clorofila-a (NDCI), desenvolvido por Mishra e Mishra. (2012), que utiliza duas bandas e é altamente eficaz na determinação de clorofila-a em águas turvas e produtivas. Esse modelo ampliou a aplicabilidade do sensoriamento remoto em estuários e regiões costeiras, onde a alta turbidez e a complexidade óptica frequentemente desafiam os métodos tradicionais de monitoramento.

O Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM) é uma dessas regiões, de elevada complexidade óptica, além de ter grande importância econômica para a região. Dada sua relevância, diversos estudos têm sido realizados com o objetivo de monitorar suas águas de forma precisa. Lins *et al.* (2017) conduziram a calibração e validação de quatro modelos NIR-Red semiempíricos utilizando dados radiométricos medidos *in situ*. Já Lima Filho *et al.* (2023) focaram no desenvolvimento de modelos semiempíricos para a estimativa remota de CDOM no CELMM. No entanto, ainda há a necessidade de estudos que busquem modelos alternativos para a estimativa de clorofila-a, cada vez mais adequados às características específicas do ambiente, utilizando satélites com diferentes atributos e maior adaptabilidade ao complexo.

Portanto, este estudo visa avaliar o desempenho do modelo NDCI aplicado a bandas simuladas do satélite Sentinel-3 para estimar a concentração de clorofila-a em um sistema estuarino-lagunar tropical.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho do modelo NDCI aplicado a bandas simuladas do satélite Sentinel-3 para a estimativa de clorofila-a no Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba, localizado em Alagoas.

2.2 Objetivos Específicos

- Verificar a adequação das bandas do Satélite Sentinel 3 para uso do modelo NDCI;
- Ajustar os dados de reflectância de campo às bandas do satélite Sentinel 3;
- Comparar as concentrações de clorofila-a de campo com as estimadas pelo modelo.

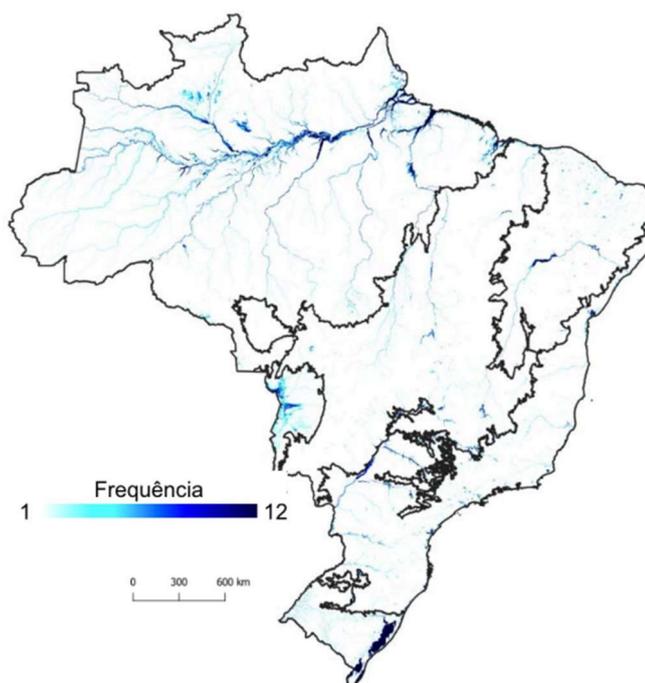
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Diversidade e Caracterização das Águas Interiores no Brasil

A água é um dos recursos mais vitais do planeta Terra e desempenha um papel essencial na regulação do clima e manutenção dos ecossistemas. Segundo Tundisi e Matsumura-Tundisi (2020), trata-se de um recurso estratégico essencial para a humanidade, pois sustenta a vida no planeta, mantém a biodiversidade, viabiliza a produção de alimentos e suporta os diversos ciclos naturais que regulam o equilíbrio ecológico.

As águas interiores são uma vasta e importante parte dos recursos hídricos do país. De acordo com dados do MapBiomias (2023), o Brasil tem cerca de 2% do seu território coberto por água, equivalente a 18,3 milhões de hectares (Mha), essa área corresponde a aproximadamente duas vezes o território de Portugal. A água está distribuída entre os seis principais biomas do país, entretanto, esta distribuição não é uniforme, de modo que mais de 50% estão concentradas na Amazônia (Figura 1).

Figura 1 - Concentração de Superfície de água nos biomas brasileiros



Fonte: MapBiomias (2023)

Segundo Carvalho (1984), as águas interiores podem ser correntes ou dormentes, onde às águas correntes englobam os rios, córregos e nascentes, enquanto as dormentes englobam os lagos e lagoas assim como as águas subterrâneas. O autor ainda descreveu diferentes corpos d'água de acordo com seu porte e características: um rio é um curso de água de grande porte, com fluxo contínuo e, frequentemente, navegável; um córrego ou ribeirão é menor e não navegável; enquanto uma nascente é uma pequena fonte de água que brota de um olho d'água ou brejo; um lago é um acúmulo de água em depressão, podendo ter saída ou ser fechado; e uma lagoa é formada pela estagnação de águas de chuva ou de rios, variando conforme a estação.

Dentro do conceito de águas interiores, pode-se destacar as bacias hidrográficas, que são áreas geográficas onde todas as águas pluviais convergem para um único ponto ou seção, geralmente um rio, lago ou oceano. Piroli (2022) descreveu as Bacias hidrográficas como áreas delimitadas pela topografia, onde as águas das chuvas escoam superficial e subsuperficialmente. Este escoamento é orientado pela gravidade, desde os pontos mais altos (divisores de água) até as regiões mais baixas do relevo. Ao longo do caminho, a água flui por canais, ravinas, córregos e afluentes, até alcançar o rio principal da bacia.

Quando as águas de um rio ou lago convergem com o oceano, a área de encontro é conhecida como estuário. De acordo com Silva (2000), a mistura entre a água salgada do mar e a água doce proveniente de uma bacia drenante cria gradientes de salinidade que definem as características químicas e biológicas únicas desses ecossistemas. Na sequência, foi abordado com mais detalhes as características e importância dos estuários.

3.2 Estuários

“Estuário é uma massa de água costeira semifechada que tem uma ligação livre com o mar aberto e dentro da qual a água do mar é mensuravelmente diluída com água doce derivada da drenagem terrestre” (Pritchard, 1967 *apud* SCHETTINI, 2002, p. 1). Essa é uma das definições de estuário mais aceitas e utilizadas na literatura, porém, a fim de complementar essa definição, Fairbridge (1980) descreve o estuário como uma área de transição onde o mar invade o vale de um rio, estendendo-se até o ponto em que a maré dinâmica perde influência. O autor divide esse ambiente em três setores principais: (a) o baixo estuário, ou zona marítima, que mantém conexão direta com o mar; (b) o estuário médio, caracterizado pela intensa mistura de

água doce e salgada; e (c) o estuário superior ou fluvio-marítimo, composto por água doce, mas ainda influenciado pela maré dinâmica.

Day *et al.* (2013) destacam também as características abióticas e bióticas dos estuários, onde as abióticas são a subida e descida da maré, movimentos complexos da água, altos níveis de turbidez e diferentes concentrações de sal. A natureza das formas de relevo, como praias, ilhas-barreira, planícies lamacentas e deltas, e a geometria da bacia. Enquanto as bióticas se trata de pântanos salgados, manguezais, leitos de grama submersos e recifes de ostras.

Devido a essa alta biodiversidade e produtividade, os estuários possuem uma importância econômica significativa, além de fornecerem uma ampla gama de serviços ecossistêmicos que beneficiam diversas atividades humanas. Day *et al.* (2013) afirmam que a abundância de alimentos inicialmente atraiu assentamentos humanos para as margens dos estuários. Com o tempo, essas regiões passaram a desempenhar um papel central no comércio, e hoje muitas das maiores cidades do mundo se desenvolveram ao redor de grandes sistemas estuarinos, como Nova York, Londres, Cairo, Calcutá, Daca, São Paulo, Buenos Aires, Guayaquil e Xangai. Desde os primórdios, as atividades humanas alteraram significativamente o estado natural dos estuários. Exemplos históricos incluem a construção de montes para habitação e a coleta de peixes e mariscos.

A realização de atividades humanas nesses ecossistemas inevitavelmente gera diversos impactos. Foram identificadas quatro categorias principais de impactos nos ecossistemas estuarinos: enriquecimento com níveis excessivos de material orgânico, nutrientes inorgânicos ou calor; modificações físicas; introdução de substâncias tóxicas; e alterações diretas na estrutura da comunidade, seja pela coleta excessiva ou pela introdução de espécies exóticas, ressaltam Baltz e Yáñez-Arancibia (2012).

Dentre essas categorias de impactos causados aos ecossistemas estuarinos, o que mais afeta as características da água, como a cor e qualidade, é o enriquecimento progressivo de nutrientes. Nesse aspecto Day *et al.* (2013) ainda afirmam que o enriquecimento progressivo das águas com nutrientes inorgânicos, matéria orgânica e calor elevado, leva ao crescimento excessivo de algas, aumento do metabolismo e alteração na estrutura da comunidade, causando a eutrofização do ambiente.

Estudar a qualidade da água dos estuários, portanto, é crucial para entender a complexidade desses ecossistemas e para garantir a sua proteção e uso sustentável, beneficiando tanto a biodiversidade quanto as atividades humanas que dependem deles.

3.3 Sensoriamento remoto (SR)

O sensoriamento remoto é uma tecnologia que permite a identificação, observação, coleta e medição de objetos sem a necessidade de contato direto, por meio da captação e registro da energia emitida ou refletida por suas superfícies. Essa energia é armazenada em formato de imagens digitais, conforme apontam Elachi *et al.* (2006). A fim de uma definição mais específica para Sensoriamento Remoto, Novo (2010) define como sendo a utilização integrada de sensores, equipamentos de processamento e transmissão de dados, instalados em aeronaves, satélites ou outras plataformas, com o propósito de estudar eventos, registrar e analisar as interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias presentes na superfície terrestre em suas mais diversas manifestações.

As imagens de satélite oferecem uma perspectiva única e privilegiada do planeta Terra, permitindo-nos observar e explorar vastas áreas de maneira integrada e abrangente. Elas proporcionam uma visão sinóptica, ou seja, uma visão de conjunto, e multitemporal, capturando mudanças ao longo do tempo em diferentes momentos. Isso possibilita o monitoramento contínuo de regiões extensas, incluindo áreas remotas ou de difícil acesso, conforme aponta Florezano (2013).

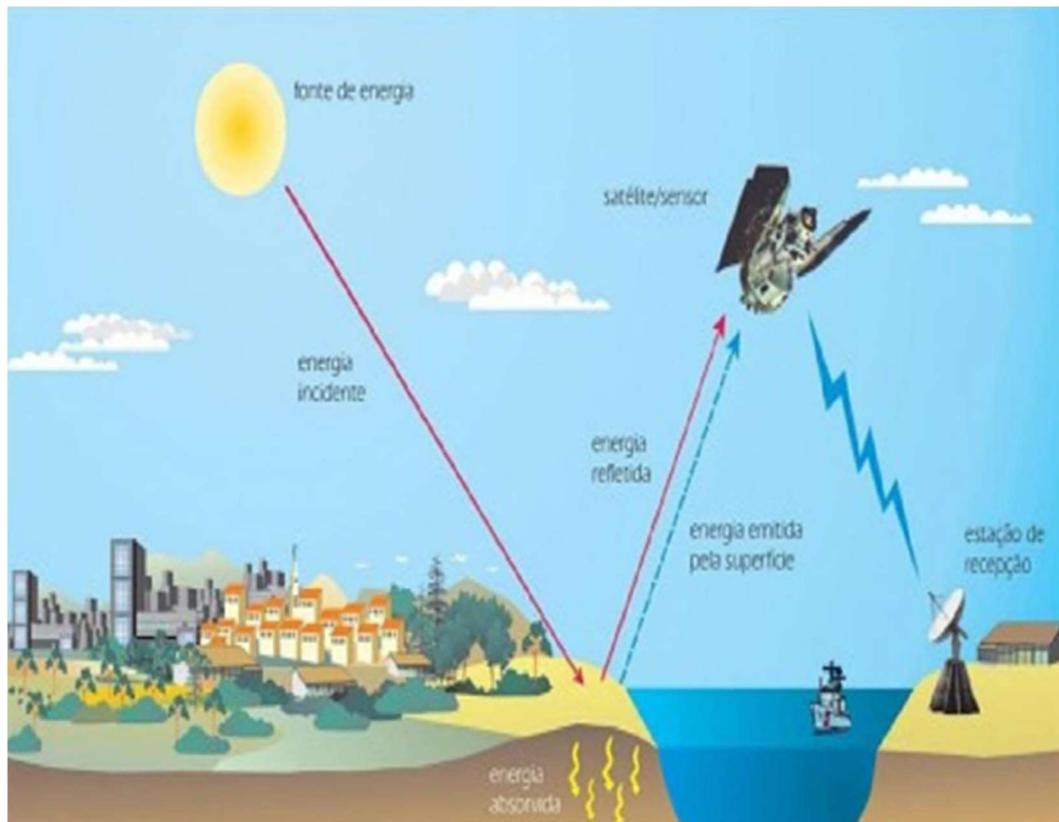
Segundo Novo (2010) e Lorenzetti (2015), o sensoriamento remoto possui uma vasta gama de aplicações em diferentes áreas do conhecimento, incluindo estudos urbanos, agrícolas, geológicos, ecológicos, florestais, cartográficos, oceanográficos, hidrológicos, limnológicos, militares e atmosféricos. Essa tecnologia oferece ferramentas essenciais para monitoramento, análise e tomada de decisões em relação ao uso sustentável de recursos naturais, planejamento territorial, preservação ambiental, gestão de desastres e segurança, entre outros setores.

Lobo *et al.* (2020), destacam que as aplicações do sensoriamento remoto em recursos hídricos são amplas e diversificadas. Na modelagem hidrológica, o SR permite a obtenção de dados cruciais, como informações sobre precipitação, delimitação de bacias hidrográficas e o mapeamento do uso e ocupação do solo. No que diz respeito ao monitoramento da qualidade da água, essa tecnologia possibilita a análise de parâmetros importantes, como a coloração, que pode indicar a presença de impurezas, fitoplâncton ou sedimentos em suspensão, contribuindo assim para uma avaliação contínua e precisa da saúde ambiental dos corpos d'água.

3.3.1 Funcionamento da captação de imagem através do satélite

O sensoriamento remoto opera capturando a energia refletida ou emitida por objetos em diferentes faixas do espectro eletromagnético (como o visível, infravermelho, micro-ondas, entre outros). Para isso, ele depende de uma fonte de energia, geralmente o Sol no caso do sensoriamento remoto passivo, ou de uma fonte artificial, no caso do sensoriamento remoto ativo. Essa energia interage com a superfície da Terra e com os objetos nela presentes, de acordo com Florenzano (2013).

Figura 2- Obtenção de imagem por sensoriamento remoto



Fonte: Florenzano (2013)

Lorenzetti (2015), destaca que a radiação emitida ou refletida pela superfície terrestre, como vegetação, água e solo, varia conforme as características de cada tipo de objeto. Cada superfície apresenta uma assinatura espectral única, ou seja, reflete ou emite radiação de forma particular. Sensores a bordo de satélites ou aeronaves captam essa radiação e a convertem em dados digitais.

Segundo Novo (2010), a unidade radiométrica fundamental é a reflectância, que representa a porcentagem de energia refletida por um objeto em relação à quantidade total de energia que incide sobre ele. A reflectância pode ser calculada para cada comprimento de onda ou banda dos satélites (faixas do espectro eletromagnético), o que permite identificar e caracterizar diferentes tipos de superfícies com base em suas propriedades espectrais específicas.

Esses dados são transmitidos para estações em terra, onde passam por processamento e análise. Geralmente, as informações são registradas em diferentes bandas do espectro eletromagnético, o que possibilita uma análise multiespectral. O processamento digital dos dados envolve a correção de erros (como distorções atmosféricas), o aprimoramento das imagens e a classificação de diferentes tipos de superfícies, resultando na geração de imagens e informações úteis para diversas aplicações, destacam Lobo *et al.* (2020).

3.3.2 Monitoramento de clorofila-a

A clorofila-a é amplamente reconhecida como um indicador da produtividade primária em ecossistemas aquáticos. Segundo Wetzel (2001), a clorofila-a é o principal pigmento fotossintético envolvido na conversão de energia luminosa em energia química. Sua concentração nos corpos d'água também serve como um parâmetro chave para o monitoramento da qualidade da água, sendo diretamente relacionada ao crescimento do fitoplâncton e ao estado trófico dos ambientes aquáticos Reynolds (2006). De acordo com Carlson (1977), níveis elevados de clorofila-a estão associados à eutrofização, um processo que resulta da entrada excessiva de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, levando a floração de algas e deterioração da qualidade da água.

Dessa forma, realizar um monitoramento preciso da concentração de clorofila-a em ambientes aquáticos é crucial. O sensoriamento remoto tem desempenhado um papel cada vez mais relevante nesse monitoramento, permitindo a avaliação contínua e em larga escala de lagos, estuários e reservatórios. Segundo Novo (2010) e Lobo *et al.* (2020), essa tecnologia facilita a detecção de padrões e variações na presença de clorofila-a, oferecendo informações valiosas para a gestão sustentável dos recursos hídricos.

Trabalhos realizados no Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM) destacam o avanço no uso de sensoriamento remoto para monitoramento de clorofila-a e outras propriedades aquáticas. Santos *et al.* (2018) avaliaram novos modelos de estimativa de

clorofila-a baseados em dados de reflectância medidos *in situ*. Tavares *et al.* (2021,) investigaram o desempenho de algoritmos de correção atmosférica utilizando imagens do Sentinel-2 MSI. Já Lima Filho *et al.* (2023) desenvolveram modelos semiempíricos para estimativa de matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM), crucial para processos fotobiológicos e ecológicos nos ecossistemas aquáticos.

Portanto, o monitoramento da clorofila-a, especialmente por meio de tecnologias como o sensoriamento remoto, é vital para a compreensão da dinâmica dos ecossistemas aquáticos e para a gestão eficaz dos recursos hídricos. A capacidade de detectar padrões de concentração desse pigmento fotossintético permite prever processos como a eutrofização e a degradação da qualidade da água, essencial para a manutenção da biodiversidade. Assim, avanços no uso de sensores e algoritmos de correção atmosférica demonstram a relevância dessa abordagem para o futuro da sustentabilidade ambiental.

3.3.3 Índice de Diferença Normalizada de Clorofila (NDCI)

Segundo Lobo *et al.* (2020), os índices espectrais são cálculos que combinam valores de reflectância em diferentes bandas espectrais para realçar certas características dos objetos na superfície terrestre. Muito usados no sensoriamento remoto, esses índices ajudam a analisar a vegetação, corpos d'água, solo e outros componentes. Alguns dos mais conhecidos incluem o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), que mede a densidade e saúde da vegetação, o Índice de Vegetação Aprimorado (EVI) é projetado para minimizar a saturação e os efeitos de fundo no NDVI, o Índice de Diferenças Normalizadas do Solo (NDBI) para auxiliar na diferenciação de áreas urbanas, o Índice de Área Queimada (BAI) para auxiliar no delineamento de cicatrizes de queimaduras e avaliação da gravidade da queimadura, o Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI), que identifica a presença de água e o Índice de Diferença Normalizada de Clorofila (NDCI), que é uma métrica desenvolvida para estimar a concentração de clorofila-a em águas produtivas. Tais índices são fundamentais para o monitoramento ambiental e a gestão de recursos naturais.

De acordo com Mishra e Mishar (2012), o NDCI é uma métrica desenvolvida para estimar a concentração de clorofila-a em águas produtivas, especialmente útil em monitoramento de ecossistemas aquáticos. Ele funciona utilizando bandas de reflectância em comprimentos de onda específicos do espectro visível e infravermelho, melhorando a detecção

de níveis de clorofila-a em comparação com outros índices como o NDVI, que é mais adequado para vegetação terrestre.

Pesquisas realizadas por Mishra e Mishra (2012), desenvolveram o NDCI utilizando a refletâncias em 665 nm e 708 nm, simulando bandas do sensor MERIS. Essas bandas capturam picos espectrais sensíveis à concentração de clorofila-a, com 665 nm abordando a absorção por pigmentos de clorofila-a e 708 nm refletindo variações na presença dessa substância. A formulação do NDCI (diferença entre 708 nm e 665 nm, normalizada pela soma) reduz interferências, como matéria orgânica dissolvida (CDOM) e sólidos suspensos (TSS), e corrige para variações sazonais e atmosféricas. O NDCI é formulado como apresentado na Equação 1:

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

Dessa forma, o objetivo principal do NDCI é aumentar a precisão na estimativa de clorofila-a em águas turvas e produtivas, usando um modelo simples e intuitivo, que estabelece uma relação prática e generalizada entre os valores de NDCI e os níveis de clorofila-a, permitindo uma aplicação confiável mesmo em situações em que dados de referência básicos não estão disponíveis. Isso torna o NDCI uma ferramenta universal, acessível e útil para análises de qualidade da água em contextos variados.

3.3.4 Sentinel-3

O programa Sentinel, parte da iniciativa Copernicus da Agência Espacial Europeia (ESA) e da União Europeia, visa monitorar o meio ambiente globalmente por meio de satélites de última geração. Segundo Potin *et al.* (2021, tradução nossa), o Componente Espacial Copernicus inclui as missões: Sentinel-1, para imagens de radar de alta resolução; Sentinel-2, para imagens multiespectrais de alta resolução; Sentinel-3, para imagens multiespectrais de média resolução e altimetria; Sentinel-4, para monitoramento da composição atmosférica a partir da órbita geostacionária; Sentinel-5 e Sentinel-5 Precursor, para monitoramento da composição atmosférica de órbita terrestre baixa; e Sentinel-6 Michael Freilich, para missão de radar altímetro de alta precisão. Essa infraestrutura de observação espacial proporciona um fluxo contínuo de dados, permitindo o desenvolvimento progressivo de serviços essenciais em

diversas áreas, como monitoramento terrestre, oceanografia operacional, análise da composição atmosférica, resposta a emergências, segurança e monitoramento de mudanças climáticas.

A missão Sentinel-3 consiste em uma constelação de satélites (unidades A/B e futuras unidades C/D para continuidade) que mede topografia e temperatura da superfície do mar e da terra, além da coloração de suas superfícies. Esses dados são essenciais para monitorar vegetação, identificar focos de incêndio, e medir altura de rios e lagos, além de fornecer produtos atmosféricos. As informações coletadas pelo Sentinel-3 têm ampla aplicação em estudos ambientais e no monitoramento de mudanças climáticas, de acordo com Potin *et al.* (2021, tradução nossa).

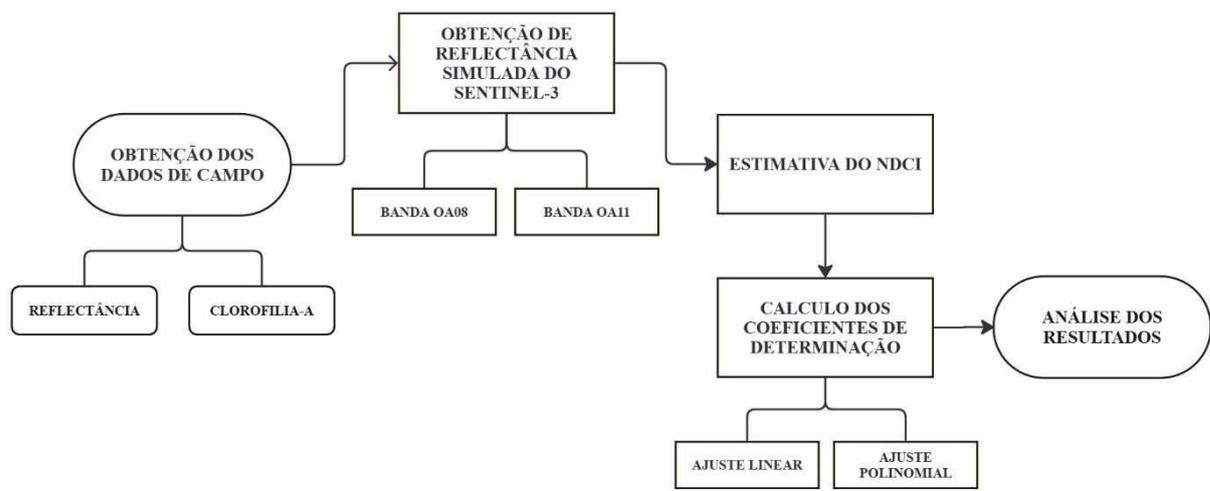
Segundo informações da plataforma *European Space Agency* (ESA, 2024), cada satélite da constelação Sentinel-3 possui três instrumentos principais que operam em conjunto: o *Ocean and Land Colour Instrument* (OLCI) com 21 bandas e resolução de 300m, o *Sea and Land Surface Temperature Radiometer* (SLSTR) que mede a temperatura da superfície do mar com precisão acima de 0,3 K, e o *Synthetic Aperture Radar Altimeter* (SRAL) com alta resolução. Sua órbita heliossíncrona de 814,5 km de altitude tem ciclo de 27 dias, com revisita de até dois dias, ideal para monitorar condições ambientais e climáticas globais.

Dadas essas características, diversos estudos vêm empregando dados do Sentinel-3, como base. Maciel *et al.* (2021) aplicaram dois métodos de correção atmosférica (6SV e ACOLITE) ao sensor OLCI, validando-os com medições de reflectância *in situ* no Lago Grande do Curuai, no Pará. Heinz *et al.* (2023) usou o Sentinel-3 para verificar padrões de produtividade no Arquipélago de São Pedro e São Paulo. Vieira (2023) utilizou dados do OLCI e SLSTR para identificar eflorescências de algas. Esses estudos reforçam o potencial do Sentinel-3 no monitoramento remoto de recursos hídricos.

4 METODOLOGIA

A Figura 3 apresenta o fluxograma com as principais etapas deste estudo. Em seguida, é apresentado de forma detalhada a metodologia do trabalho.

Figura 3 - Fluxograma da metodologia



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

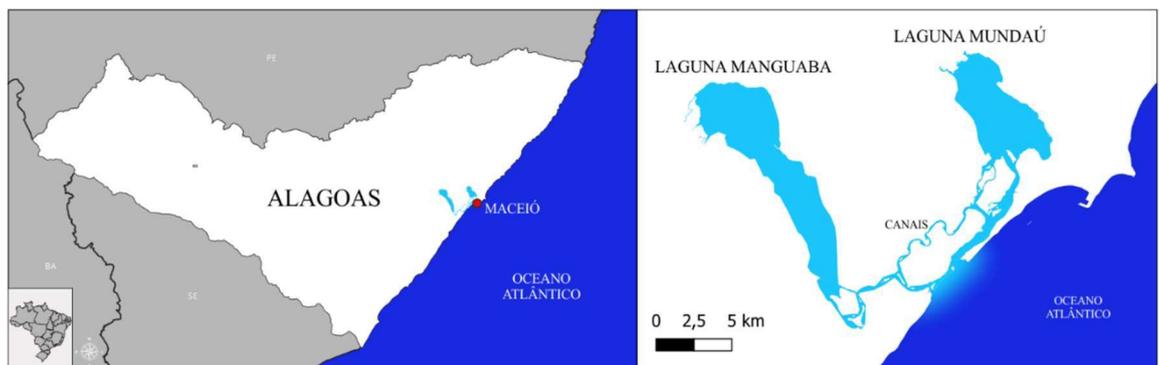
4.1 Área de estudo

O Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM) está localizado no Estado de Alagoas, Brasil (Figura 4). Este complexo inclui duas principais lagunas: a Laguna Mundaú e a Laguna Manguaba, que desempenham papéis importantes nos ecossistemas locais e na economia da região.

Segundo Lins *et al.* (2013), a Laguna Mundaú está situada entre os municípios de Maceió, Coqueiro Seco, Satuba, Santa Luzia do Norte e Rio Largo, esta laguna possui uma profundidade média de 1,5 metros, uma área de 27 km² e recebe uma descarga fluvial média anual de 35 m³/s, proveniente da bacia do Rio Mundaú. Enquanto a Laguna Manguaba abrange os municípios de Pilar e Marechal Deodoro, esta laguna tem uma profundidade média de 3 metros, se estende por uma área de 42 km² e recebe uma descarga fluvial média anual de 28 m³/s, alimentada pelas bacias dos rios Paraíba do Meio e Sumaúma.

A integração desses dados ressalta a importância hidrológica e ecológica do CELMM. As diferentes características de profundidade, extensão e descarga fluvial entre as lagoas Mundaú e Manguaba contribuem para a complexidade e diversidade dos habitats aquáticos na região. Além disso, a variabilidade das descargas fluviais influencia diretamente a dinâmica dos nutrientes e a qualidade da água, afetando a biodiversidade local e os usos econômicos dessas águas, como a pesca e o turismo.

Figura 4 - Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

4.2 Dados de Campo

Em estudos realizados por Lins *et al.* (2017) e Tavares *et al.* (2021), de março de 2017 e março de 2019, foram realizadas 10 campanhas de coleta de dados em 36 pontos distribuídos espacialmente ao longo do complexo (Figura 5). Em cada ponto de coleta, foram realizadas medições radiométricas para a determinação da reflectância (R_{sr}) e coletas de amostras de água para análise laboratorial de clorofila-a e Sólidos Suspensos Totais (SST).

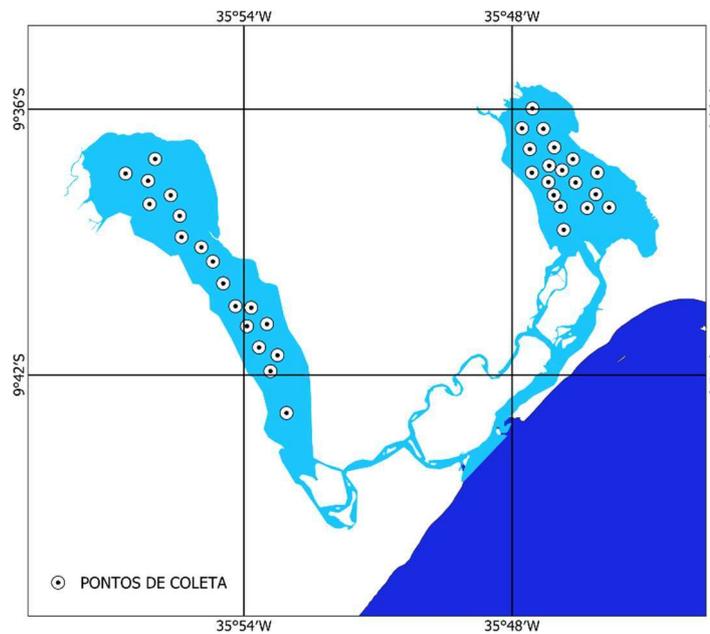
As medições radiométricas foram efetuadas utilizando Sensores TriOs RAMSES, configurados com um sensor de irradiância e dois sensores de radiância, operando numa faixa espectral de 320 a 950 nm. Esses sensores foram montados em um eixo vertical de alumínio, permitindo a coleta precisa e consistente dos dados de reflectância em todos os pontos de amostragem.

As amostras de água foram coletadas em garrafas de polietileno branco com volumes de 2 litros e armazenadas em caixas térmicas logo após a coleta. No prazo máximo de 12 horas após a coleta, as amostras foram filtradas utilizando uma membrana de fibra de vidro Whatman

GF/F com diâmetro de poros de 0,45 μm e protegidas com papel alumínio. As análises de clorofila foram realizadas com o material retido no filtro, extraído com acetona a 90%.

A metodologia detalhada para coleta e análise dos dados de clorofila-a no CELMM pode ser encontrada em Lins e *et al.* (2017) e Tavares *et al.* (2021).

Figura 5 - Pontos de coleta



Fonte: Silva (2024)

4.3 Obtenção das reflectâncias simuladas do Sentinel-3

Os dados coletados em campo forneceram valores de reflectância em cada ponto para dez campanhas de coletas em datas diferentes, com comprimentos de onda partindo de 320 nm até 950 nm, variando em média 3 nm dentro desse intervalo. Dessa forma, a fim de se obter valores de reflectância em cada ponto variando a cada nanômetro, foi realizada uma interpolação simples.

Logo, foram estimados 630 valores diferentes de comprimento de onda e consequentemente mesmo número de valores para reflectância para cada ponto aferido em campo.

Em seguida, utilizou-se a função de resposta espectral do Sentinel-3, essa função fornece os pesos para os comprimentos de onda correspondentes às 21 bandas do satélite, para

todos os comprimentos de onda a partir de 300 nm até 950 nm. Permitindo a partir dela calcular a reflectância simulada para todas as bandas do Sentinel-3 a partir da Equação 2.

$$Reflec_{sim_{ponto}} = \sum(Reflec_{campo_{ponto}} * Peso_{banda_{ponto}}) / \sum(Peso_{banda_{ponto}}) \quad (2)$$

Dessa forma, foi calculado o valor da reflectância simulada para todos os pontos das bandas do Sentinel-3.

4.4 Estimativa do Índice de Diferença Normalizada de Clorofila (NDCI)

Para o cálculo do NDCI, utilizou-se a equação desenvolvida por Mishra e Mishra (2012) que utiliza duas bandas simuladas com reflectância em 665 nm e 708 nm do sensor MERIS para determinação do índice. Para o presente estudo, buscou-se identificar as bandas do Sentinel-3 que mais se aproximavam desses comprimentos de onda. Constatou-se que as bandas OA08 e OA11, com comprimento de onda central de 665 nm e 708 nm respectivamente e largura espectral de 10 nm, correspondem exatamente a usada por Mishra e Mishra (2012).

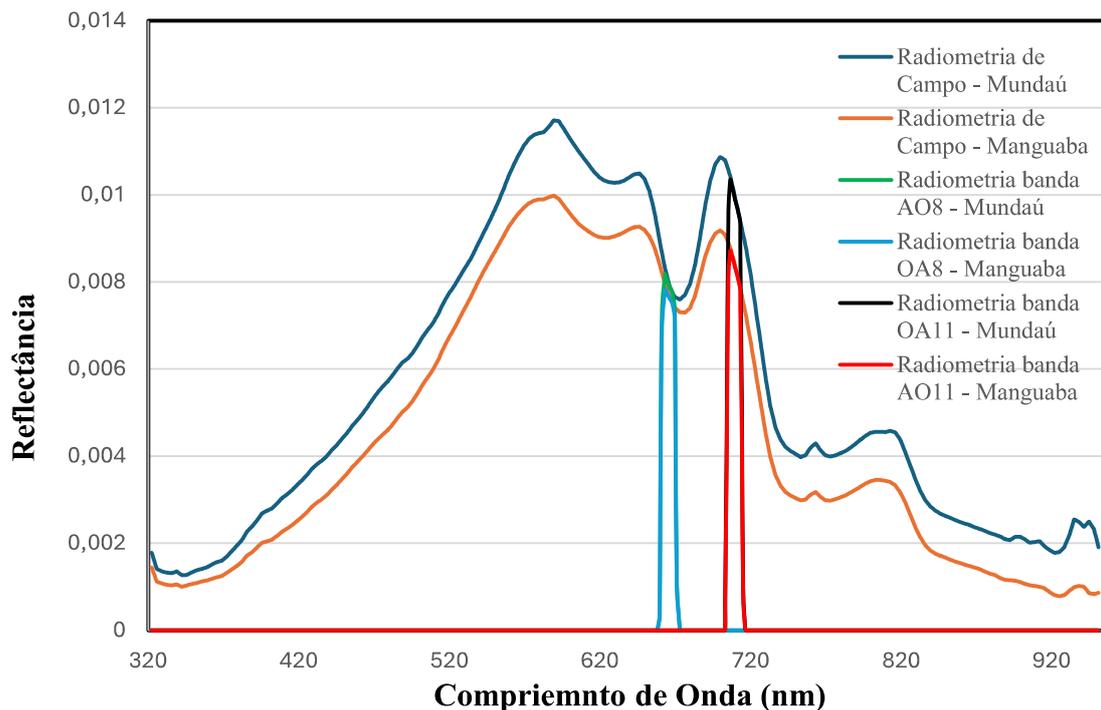
Esta abordagem permite calcular de forma precisa os valores de NDCI utilizando dados de reflectância do Sentinel-3, aproveitando a similaridade espectral das bandas correspondentes do sensor MERIS. Isso valida a aplicabilidade do modelo e proporciona uma ferramenta eficaz para o monitoramento da clorofila-a em corpos d'água com base no NDCI.

Foi somado uma (1) unidade ao valor do NDCI apenas para obtenção de uma melhora na visualização da Figura 5, assim como feito por Lobo et al. (2021). Essa alteração elimina os valores negativos do índice.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A simulação das bandas OA08 e OA11 para obtenção da reflectância correspondente ao Sentinel-3 foi realizada para todos os pontos onde a reflectância de campo foi aferida. Na Figura 6, é possível observar as curvas de reflectância em relação ao comprimento de onda de um ponto da Laguna Mundaú, referente à terceira campanha de medição realizada em 22 de maio de 2018, bem como de um ponto da Laguna Manguaba, referente à quarta campanha realizada em 23 de maio de 2018. Essas curvas estão acompanhadas das curvas de reflectância simulada das bandas OA08 e OA11 do Sentinel-3 para ambos os pontos nas respectivas campanhas. Esses pontos foram selecionados de forma arbitrária com o objetivo de demonstrar a relação entre as bandas simuladas e os valores de campo.

Figura 6 - Curva de Reflectância em relação ao comprimento de onda



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

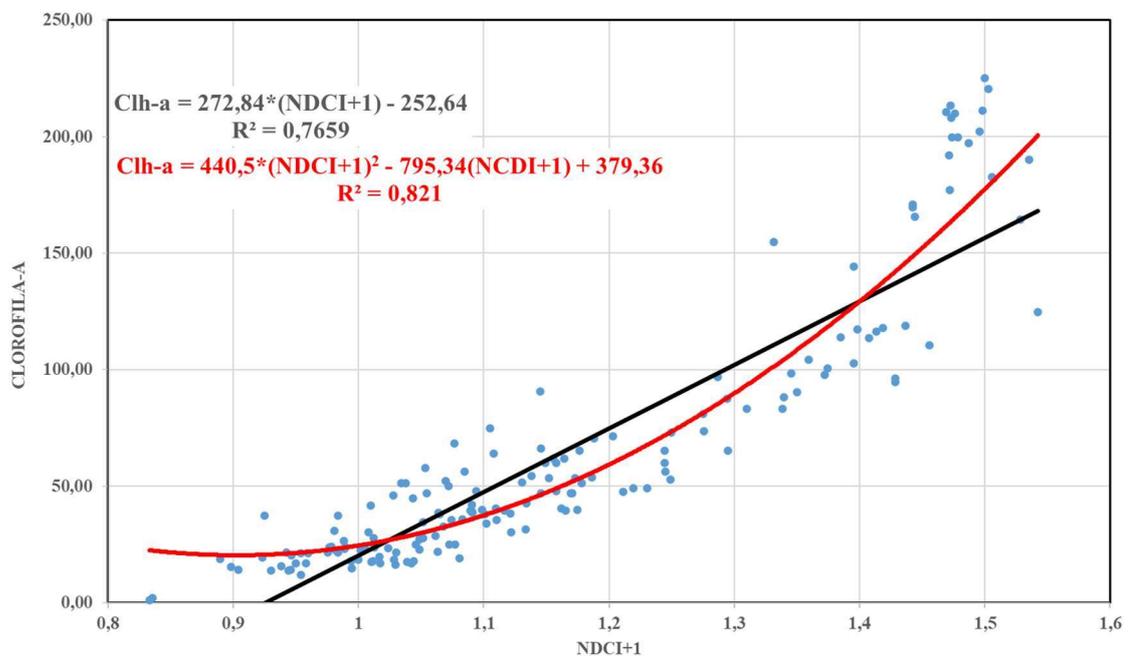
A aplicação dos valores obtidos nas bandas OA08 e OA11 do Sentinel-3 apresentou resultados consistentes e satisfatórios para o cálculo do NDCI, sem evidência de desvios ou inconsistências nos valores calculados para o CELMM. Além disso, conforme destacado na Figura 6, essas bandas demonstraram um alinhamento preciso com os níveis de reflectância

esperados. Esse desempenho é evidenciado pelos picos de reflectância nas curvas da banda OA11, cuja faixa espectral está associada às variações de clorofila-a na água, e pelos picos de absorção espectral na banda OA08, que corresponde à faixa espectral relacionada à absorção pelos pigmentos da clorofila-a, conforme descrito por Mishra e Mishra (2012).

Observa-se que as curvas correspondentes às bandas OA08 e OA11 apresentam valores de reflectância próximos a zero em grande parte da faixa espectral medida, em contrapartida, na região correspondente à sua amplitude espectral, exibe alta semelhança com os dados coletados em campo. Esse comportamento evidencia a precisão da simulação das bandas do Sentinel-3 e reforça a consistência dos valores simulados.

O uso das bandas simuladas do Sentinel-3 para o cálculo do NDCI gerou modelos promissores de estimativa de clorofila-a. Ao realizar a análise gráfica da clorofila-a calculada em campo utilizando o NDCI+1, foi possível empregar tanto o ajuste linear quanto o ajuste polinomial para fazer comparações, como ilustrado na Figura 7.

Figura 7- Ajuste de função linear e quadrática baseado no NDCI+1 para estimar clorofila-a



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Para ambos os métodos, o valor do coeficiente de determinação (r^2) indicou resultados satisfatórios. No caso do ajuste linear, obteve-se um $r^2 = 0,77$ o que é considerado satisfatório

para este tipo de estudo, demonstrando uma boa correlação entre as estimativas de clorofila-a obtidas pelo sensor de campo e os níveis reais de clorofila-a nas lagunas.

Por outro lado, o ajuste polinomial quadrático produziu resultados ainda melhores, com um $r^2=0,82$. Esse aumento no valor do coeficiente de determinação sugere que o modelo polinomial captura de forma mais eficaz as variações nos dados de clorofila-a, proporcionando uma precisão aprimorada na estimativa dos níveis de clorofila-a em campo.

Outros estudos realizados no CELMM, envolvendo a simulação de bandas de satélites, também obtiveram resultados similares para o coeficiente de determinação. Lins *et al.* (2017) encontraram valores próximos de $r^2=0,8$ tanto para o modelo de duas bandas quanto para o de três bandas. De forma semelhante, Tavares *et al.* (2021) obtiveram $r^2=0,77$ ao aplicar um algoritmo semi-analítico de razão NIR-vermelho no CELMM. Ambos os trabalhos apresentaram resultados considerados satisfatórios, reforçando que o uso de modelos empíricos baseados em propriedades ópticas de constituintes da água possui grande potencial para estimar a clorofila-a utilizando dados multiespectrais de sensores de satélite

Esses resultados indicam que a simulação de bandas do Sentinel-3 para o cálculo do NDCI é precisa, respaldada pelos bons coeficientes de determinação obtidos. A metodologia também traz vantagens significativas em comparação com outros métodos, não apenas por lidar bem com a complexidade dos ambientes aquáticos, mas também pela eficiência do satélite.

Mishra e Mishra (2012) apresentou resultados positivos na aplicação do modelo em variados tipos de água e regiões geográficas, conseguindo quantificar clorofila-a em águas continentais e estuarinas interiores, além de águas produtivas e turvas com complexidade óptica. Esses resultados destacam a robustez e as características do modelo, evidenciando sua eficácia em ambientes aquáticos complexos e reforçando sua utilidade para o monitoramento de águas ópticas

Além disso, o Sentinel-3 demonstrou ser uma ótima ferramenta, destacando-se no monitoramento ambiental e da qualidade da água, por sua resolução espectral com 21 bandas no OLCI, ideais para detectar clorofila-a e outros parâmetros. Com tempo de revisita inferior a dois dias, supera o Sentinel-2 (5 dias) e o Landsat (16 dias) em frequência de observação, garantindo dados mais atualizados e consistentes. Além disso, sua cobertura global e resolução espacial de 300 metros são especialmente vantajosas para análises de grandes corpos d'água e regiões de alta complexidade, como sistemas estuarino-lagunares, de acordo com a ESA (2024).

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste estudo, realizou-se a adaptação das bandas do Sentinel-3 para aplicação do Índice de Diferença Normalizada de Clorofila (NDCI), com resultados promissores, visto que as bandas OA08 (665 nm) e OA11 (708 nm) mostraram-se adequadas para as faixas espectrais propostas por Mishra et al. (2012) no desenvolvimento do modelo. A reflectância simulada do Sentinel-3, baseada nos dados de campo, exibiu consistência elevada em todos os pontos amostrados, corroborando a precisão do método. Além disso, os modelos de estimativa de clorofila-a, utilizando o NDCI aplicado às bandas simuladas do Sentinel-3 e comparados aos valores de campo, indicaram uma forte correlação ($r^2 \approx 80\%$) no Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM).

Esses resultados sugerem que o Sentinel-3 pode ser uma ferramenta eficiente para monitoramento e mapeamento da clorofila-a em sistemas estuarinos tropicais, oferecendo vantagens sobre outros satélites devido à sua alta frequência de revisita, cobertura global, resolução espacial de 300 metros e espectral de 21 bandas, adequada para estudos de qualidade da água. Com isso, ele permite análises espaço-temporais essenciais para o monitoramento e a gestão sustentável dos recursos hídricos.

Como sugestão para pesquisas futuras, propõe-se a calibração do modelo NDCI aplicado diretamente às reflectâncias dos dados do satélite Sentinel-3 para estimar as concentrações de clorofila-a no CELMM. Isto incluiria comparações entre os dados de reflectância radiométrica de campo, os dados de satélite, além de concentrações de clorofila-a obtidas em laboratório para o sistema. Tais comparações poderiam fornecer *insights* adicionais sobre a eficácia do satélite no acompanhamento da dinâmica trófica e da qualidade da água em ambientes estuarinos complexos.

REFERÊNCIAS

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Qualidade da água**. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/monitoramento-e-eventos-criticos/qualidade-da-agua>. Acesso em: 02 nov. 2024.

BALTZ, Donald M.; YÁÑEZ-ARANCIBIA, Alejandro. Ecosystem-based management of coastal fisheries in the Gulf of Mexico: environmental and anthropogenic impacts and essential habitat protection. In: DAY JUNIOR, John W.; YÁÑEZ-ARANCIBIA, Alejandro. **The Gulf of Mexico Ecosystem-Based Management**. College Station: Texas A&M University Press, 2012. p. 337-370.

BORGES, Henrique Dantas. **APLICAÇÃO DE ALGORITMOS SEMI-ANALÍTICOS À IMAGENS SENTINEL-2 PARA A ESTIMATIVA DE CLOROFILA-A NO LAGO PARANOÁ-DF**. 2018. 23 f. Monografia (Especialização) - Curso de Curso de Especialização em Geoprocessamento Ambiental, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

CARLSON, Robert E.. A trophic state index for lakes1. **Limnology And Oceanography**, [S.L.], v. 22, n. 2, p. 361-369, mar. 1977. Wiley. <http://dx.doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361>.

CARVALHO, Afrânio de. AS ÁGUAS INTERIORES E SUAS SERVIDOES. **Revista de Direito Administrativo**, [S.L.], v. 156, n. 1, p. 15-52, jun. 1984.

DAY JUNIOR, John W.; CRUMP, Byron C.; KEMP, W. Michael; YÁÑEZ-ARANCIBIA, Alejandro. **ESTUARINE ECOLOGY**. 2. ed. Hoboken, New Jersey: Wiley-Blackwell, 2013. 554 p.

ELACHI, Charles; VAN ZYL, Jakob. **Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing**. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. *E-book*. Disponível em: https://www.google.com.br/books/edition/Introduction_to_the_Physics_and_Techniqu/I-Wws1EMdpwC?hl=pt-BR&gbpv=1&dq=Elachi,+C+2006&printsec=frontcover. Acesso em: 12 out. 2024.

European Space Agency (ESA). **Sentinel-3**. 2024. Disponível em: <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/sentinel-3>. Acesso em: 15 out. 2024.

FAIRBRIDGE, R. W.. The Estuary: its Definition and Geodynamic Cycle. In: **Chemistry and Biogeochemistry of Estuaries**, E. Olausson & I. Cato (Eds.) p1-35, New York: Interscience Publication, John Wiley and Sons, 1980.

FLOREZANO, Tereza Gallotti. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. *E-book*. Disponível em: https://www.google.com.br/books/edition/Inicia%C3%A7%C3%A3o_em_Sensoriamento_Remoto/18GkH5X81XcC?hl=pt-BR&gbpv=1&dq=SENSORIAMENTO+REMOTO&printsec=frontcover. Acesso em: 12 out. 2024.

HEINZ, Nikolas Urrutia; CORDEIRO, Cesar A. M. M.; GIANNINI, Fernanda. USO DO SENTINEL-3 PARA A IDENTIFICAÇÃO DE PADRÕES DE PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA NO ARQUIPÉLAGO DE SÃO PEDRO E SÃO PAULO. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 20., 2023, Florianópolis. **Anais do XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. [S.L.]: Inpe, 2023. p. 1264-1267.

LIMA FILHO, Marccone Correia de Oliveira; TAVARES, Matheus Henrique; FRAGOSO JUNIOR, Carlos Ruberto; LINS, Regina Camara; VICH, Daniele Vital. ESTIMATIVA REMOTA DE MATÉRIA ORGÂNICA COLORIDA (CDOM) EM UM ESTUÁRIO TROPICAL PRODUTIVO. In: XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS, 25., 2023, Aracaju. **Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. [S.L.]: Abrhidro, 2023. p. 1-10.

LINS, Regina Camara; FRAGOSO JÚNIOR, Carlos Ruberto; CIRILO, José Almir. SIMULAÇÕES DA HIDRODINÂMICA NO COMPLEXO ESTUARINO LAGUNAR MUNDAÚ-MANGUABA - CELMM/AL. In: XX SBRH - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS, 20., 2013, Bento Gonçalves. **Anais XX SBRH - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. [S.L.]: Abrhidro, 2013. p. 1-8.

LINS, Regina Camara; MARTINEZ, Jean-Michel; MARQUES, David Motta; CIRILO, José Almir; FRAGOSO JUNIOR, Carlos Ruberto. Assessment of Chlorophyll-a Remote Sensing Algorithms in a Productive Tropical Estuarine-Lagoon System. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 9, n. 6, p. 516, 24 maio 2017. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs9060516>.

LOBO, Felipe de Lucia; RAMALHO, Edgar; SINOTTI, Juliano. **INTRODUÇÃO AO GOOGLE EARTH ENGINE**. 2020. 85 f. Curso de Engenharia Hídrica, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2020.

LORENZZETTI, João A.. **Princípios Físicos de Sensoriamento Remoto**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2015. *Ebook*. Disponível em: https://www.google.com.br/books/edition/Princ%C3%ADpios_F%C3%ADsicos_de_Sensoriamento_Re/VEniDwAAQBAJ?hl=pt-BR&gbpv=1&dq=sensoriamento+remoto&printsec=frontcover. Acesso em: 12 out. 2024.

MACIEL, Daniel Andrade; FLORES JUNIOR, Rogerio; BARBOSA, Cláudio Clemente Faria; NOVO, Marcia Leão de Moraes; MARTINS, Vitor S.. Correção atmosférica para o sensor OLCI/Sentinel-3 em águas interiores opticamente complexas. In: XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS, 24., 2021, Belo Horizonte. **Anais XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. [S.L.]: Abrhidro, 2021. p. 1-10.

MAGOSSI, Luiz Roberto; BONACELLA, Paulo Henrique. **Poluição da águas**. 2. ed. São Paulo: Moderna, 2003.

MISHRA, Sachidananda; MISHRA, Deepak R.. Normalized Difference Chlorophyll Index: A robust algorithm for the remote estimation of chlorophyll-a concentration in productive waters. In: **Remote Sensing of Environment**, n. 117, p. 394 –406, fev. 2012.

MORAES, Maria Eugênia Bruck de; LORANDI, Reinaldo (org.). **Métodos e técnicas de pesquisa em bacias hidrográficas**. Ilhéus: Editus, 2016. *E-book*. Disponível em: https://www.google.com.br/books/edition/M%C3%A9todos_e_t%C3%A9cnicas_de_pesquisa_em_bacias/FUUnDwAAQBAJ?hl=pt-BR&gbpv=1&dq=Metodos+de+sensoriamento+da+qualidade+da+%C3%A1gua&printsec=frontcover. Acesso em: 13 nov. 2024.

MORAIS, Helen Beatriz Lisboa Figueiredo de. **ANÁLISE QUANTITATIVA E QUALITATIVA DE ÁGUA PERDIDA POR VAZAMENTOS DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETA) SETOR BTN DA CIDADE DE PAULO AFONSO - BA**. 2022. 45 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Eixo das Tecnologias, Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, 2022.

NOVO, Evlyn M. L. de Moraes. **Sensoriamento Remoto Princípios e Aplicações**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2010. *E-book*. Disponível em: https://www.google.com.br/books/edition/Sensoriamento_remoto/RErDwAAQBAJ?hl=pt-BR&gbpv=1&dq=caracteriza%C3%A7%C3%A3o+das+%C3%A1guas+interiores&printsec=frontcover. Acesso em: 12 out. 2024.

PIROLI, E. L. Bacias hidrográficas: definições e representação. In: **Água e bacias hidrográficas: planejamento, gestão e manejo para enfrentamento das crises hídricas**. São Paulo: Editora UNESP, 2022, pp. 43-62. ISBN: 978-65-5714-298-1.

POTIN, P.; GASCON, F.; STROMME, A.; ZEHNER, C.; WILSON, H.; FIGA, J.; OBLIGIS, E.; LINDSTROT, R.. **Sentinel High Level Operations Plan (HLOP)**. [S.L.]: Esa, 2021. 91 p.

Projeto MapBiomias – Mapeamento da superfície de água no Brasil (Coleção 3), acessado em 18 de Setembro: https://brasil.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/4/2024/06/Fact_MapBiomias_Agua_2023_25.06.24.pdf

REYNOLDS, Colin. **Ecology Phytoplankton**. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. *E-book*. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=gDz5jGsPWZYC&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_atb#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 10 out. 2024.

SANTOS, Leticia da Silva; LINS, Regina Camara; FRAGOSO JUNIOR, Carlos Ruberto. CALIBRAÇÃO DE ALGORÍTMOS SEMI-EMPÍRICOS PARA ESTIMATIVA DE CLOROFILA-A NO SISTEMA ESTUARINO LAGUNAR MUNDAÚ MANGUABA (AL). In: XIV SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 14., 2018, Maceió. **Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. [S.L.]: Abrhidro, 2018. p. 1-10.

SILVA, Margarida Cardoso da. ESTUÁRIOS – CRITÉRIOS PARA UMA CLASSIFICAÇÃO AMBIENTAL. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 25-35, mar. 2000.

SILVA, Silmayko Gomes da; OLIVEIRA, Iranildo Campos de; LINS, Regina Camara; FRAGOSO JUNIOR, Carlos Ruberto. AVALIAÇÃO DA ESTIMATIVA DA CLOROFILA-A USANDO ALGAEMAP EM UM SISTEMA ESTUARINO-LAGUNAR TROPICAL. In: XVII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 17., 2024, João Pessoa. **Anais XVII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE**. [S.L.]: Abrhidro, 2024. p. 1-8.

SCHETTINI, Carlos A. F.. Caracterização Física do Estuário do Rio Itajaí-açu, SC. **Rbrh - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 123-142, mar. 2002.

SCHMIEGELOW, João M. Miragaia. **O PLANETA AZUL**: uma introdução às ciências marinhas. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

TAVARES, Matheus Henrique; LINS, Regina Camara; HARMEL, Tristan; FRAGOSO JUNIOR, Carlos Ruberto; MARTÍNEZ, Jean-Michel; MOTTA-MARQUES, David. 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**. [S.L.], p. 215-236. 25 jan. 2021.

TUNDISI, José Galizia; MATSUMURA-TUNDISI, Takako. **A Água**. São Carlos: Scienza, 2020. 134 p.

VIEIRA, José Guilherme Moreira Simões. **Identificação de ocorrência de florescência de algas com recurso a imagens de Sentinel-3**. 2023. 45 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologias de Informação Geográfica, Departamento de Matemática, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2023.

WETZEL, Robert G.. **Limnology**: lake and river ecosystems. 3. ed. San Diego: Academic Press, 2001. *E-book*. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=no2hk5uPUcMC&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_atb#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 10 out. 2024.