



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

Matheus Fillipe Gaia dos Santos

**Sensoriamento remoto aplicado à análise de clorofila e turbidez
na Lagoa da Conceição - SC**

Florianópolis

2026

Santos, Matheus Fillipe Gaia dos
Sensoriamento remoto aplicado à análise de clorofila e
turbidez na Lagoa da Conceição - SC / Matheus Fillipe Gaia
dos Santos ; orientador, Roberto Fabris Goerl, 2026.
100 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa
de Pós-Graduação em Geografia, Florianópolis, 2026.

Inclui referências.

1. Geografia. 2. Google Earth Engine. 3. Turbidez. 4.
Clorofila. 5. Sentinel-2. I. Goerl, Roberto Fabris. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-
Graduação em Geografia. III. Título.

Matheus Fillipe Gaia dos Santos

Sensoriamento Remoto aplicado à análise de clorofila e turbidez na Lagoa da Conceição

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 16 de dezembro de 2025, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.(a) Patrícia Kazue Uda, Dra.

Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Prof. Jarbas Bonetti Filho, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Geografia atribuído pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia.



Documento assinado digitalmente

Marcos Aurelio da Silva

Data: 18/03/2026 10:02:01-0300

CPF: ***.180.509-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Marcos Aurélio da Silva, Dr.

Coordenador do Programa de Pós-Graduação



Documento assinado digitalmente

Roberto Fabris Goerl

Data: 17/03/2026 11:59:14-0300

CPF: ***.006.639-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Roberto Fabris Goerl, Dr.

Orientador

Florianópolis, 2026.

"Seguir em frente é como tatear no escuro. A luz que brilha ao longe é frágil e incerta. Mas a luz interna, essa sim se agita loucamente. Quero sempre me sentir desse jeito".

Inoue Takehiko.

RESUMO

Este estudo analisa o uso do sensoriamento remoto orbital para monitorar a concentração de clorofila-a e a turbidez na Lagoa da Conceição, Florianópolis (SC), entre 2021 e 2024. A pesquisa foca na resposta ambiental após o rompimento de uma Lagoa de Evapoinfiltração (LEI) em janeiro de 2021, que despejou efluentes não tratados no sistema, acelerando processos de eutrofização. Utilizou-se dados *in situ* da CASAN e imagens do satélite Sentinel-2 para calcular os índices espectrais NDCI e NDTI. Os resultados revelaram que 2021 foi o ano mais crítico, com 60,58% das amostras classificadas como eutróficas. Em 2022, o índice de eutrofização subiu para 68,42%, mas o monitoramento de 2023 indicou uma recuperação significativa, com apenas 16,26% das amostras nesta categoria e quase 50% enquadradas em estados de menor produtividade biológica. A análise identificou uma anomalia sistemática nas imagens Sentinel-2 iniciada em 16 de janeiro de 2022, que reduziu a variabilidade dos dados e elevou artificialmente a média dos índices espectrais. Além disso, a profundidade da laguna mostrou-se determinante na precisão dos modelos: enquanto áreas rasas (0–2 m) apresentaram baixa correlação ($R^2=0,37$), zonas mais profundas (5–6 m) exibiram forte correlação ($R^2=0,83$), evidenciando a influência da reflectância de fundo em águas rasas. O estudo conclui que a técnica é viável para o monitoramento contínuo, apesar dos desafios instrumentais e ambientais.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto; Qualidade da Água; Clorofila-a; NDCI; Lagoa da Conceição.

ABSTRACT

This study analyzes the use of orbital remote sensing to monitor chlorophyll-a concentration and turbidity in Lagoa da Conceição, Florianópolis (SC), between 2021 and 2024. The research focuses on the environmental response following the collapse of an Evapoinfiltration Lagoon (LEI) in January 2021, which discharged untreated effluents into the system, accelerating eutrophication processes. *In situ* data from CASAN and Sentinel-2 satellite imagery were used to calculate the NDCI and NDTI spectral indices. The results revealed that 2021 was the most critical year, with 60.58% of samples classified as eutrophic. In 2022, the eutrophication rate rose to 68.42% , but monitoring in 2023 indicated a significant recovery, with only 16.26% of samples in this category and nearly 50% falling into lower biological productivity states. The analysis identified a systematic anomaly in Sentinel-2 images beginning on January 16, 2022, which reduced data variability and artificially elevated the mean of the spectral indices. Furthermore, the lagoon's depth proved to be a determining factor in model precision: while shallow areas (0–2 m) showed low correlation ($R^2=0,37$) , deeper zones (5–6 m) exhibited a strong correlation ($R^2=0,83$), highlighting the influence of bottom reflectance in shallow waters. The study concludes that the technique is viable for continuous monitoring, despite instrumental and environmental challenges.

Keywords: Remote Sensing; Water Quality; Chlorophyll-a; NDCI; Lagoa da Conceição.

AGRADECIMENTOS

Mesmo com todos os meus esforços, preciso reconhecer algo mesmo sendo um homem cético. A sorte, penso que ela possa ser definida, como variáveis que fogem ao controle do indivíduo, porém são benéficas. Tenho sorte de ter um pai, Helio Melo e uma mãe, Flavia Gaia que dão suporte aos meus sonhos e ficam contentes com a minhas conquistas.

Tenho sorte de contar com o amor incondicional de meus avós Maria Gaia e Benedito Gaia. Também tenho de conviver com os meus irmãos (que são muitos), em especial a Maria Eduarda que foi minha confidente nesses últimos anos.

Tive a sorte de encontrar em Santa Catarina os amigos do LABGRID e ser orientado pelo Roberto Fabris. O contato com o orientador me tornou um geógrafo melhor (além das conversas estimulantes sobre teoria da conspiração e aliens).

Reconheço as minhas limitações no campo das interações sociais, mas fiz o melhor que pude. Por isso, agradeço a todos que passaram em algum momento de dessa jornada.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fenômenos da radiação eletromagnética.	5
Figura 2: Efeitos da radiação em diferentes alvos.....	6
Figura 3: (A) Reflectância especular. (B)Reflectância difusora.	7
Figura 4: Tipo de transporte em sistemas aquáticos.....	13
Figura 5: Gradientes horizontais e verticais de sistemas aquáticos.	14
Figura 6: Mapa de localização da área de estudo.....	24
Figura 7: Mapa das inspeções sanitárias na Lagoa da Conceição	27
Figura 8: Relatório Disponibilizados pela CASAN.....	32
Figura 9: Mapa de distribuição dos pontos.....	33
Figura 10: Mapa das classes batimétricas.	41
Figura 11: Mapa de classificação da concentração de clorofila por ponto de amostragem em 2021.	53
Figura 12: Classificação da concentração de clorofila por ponto de amostragem em 2022.	55
Figura 13: Classificação da concentração de clorofila por ponto de amostragem em 2023.	57
Figura 14: Mapa de Classificação da mediana da concentração de clorofila entre 2021-2023.	59
Figura 15: Mapa da variação do índice NDCI em 2021.....	71
Figura 16: Mapa da variação do índice NDCI em 2022.....	72
Figura 17: Mapa da variação do índice NDCI em 2023.....	73
Figura 18: Mapa da variação do índice NDCI em 2024.....	74
Figura 19: Mapa da variação do índice NDTI em 2021.....	85
Figura 20: Mapa da variação do índice NDTI em 2022.....	86
Figura 21: Mapa da variação do índice NDTI em 2023.....	87
Figura 22: Mapa da variação do índice NDTI em 2024.....	88

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Quantidade de inadequações encontradas na Lagoa da Conceição.	25
Gráfico 2: Box-plot da concentração de clorofila por ponto de amostragem 2021-2023.	45
Gráfico 3: Box-plot da concentração de clorofila por data de amostragem 2021- 2023.	46
Gráfico 4: Evolução da concentração clorofila entre 2021-2023.	48
Gráfico 5: Classificação da concentração de clorofila por ponto de amostragem 2021-2023.	49
Gráfico 6: Box-plot do NDCI por ponto de amostragem 2021.	61
Gráfico 7: Box-plot do NDCI por ponto de amostragem 2022.	62
Gráfico 8: Box-plot do NDCI por ponto de amostragem 2023.	62
Gráfico 9: Box-plot do NDCI por ponto de amostragem 2024.	63
Gráfico 10: Box-plot do NDCI por ponto de amostragem compilado de 2020- 2024.	64
Gráfico 11: Box-plot do NDCI por data de amostragem 2020-2024.	65
Gráfico 12: Box Plot NDCI (Suface Reflectance) por data de amostragem 2020- 2024.	66
Gráfico 13: Box-plot do NDCI por data de amostragem aleatória 2021.	67
Gráfico 14: Box-plot do NDCI por data de amostragem aleatória 2022.	68
Gráfico 15: Box-plot do NDCI por data de amostragem aleatória 2023.	68
Gráfico 16: Box-plot do NDCI por data de amostragem aleatória 2024.	69
Gráfico 17: Evolução da mediana do NDCI por amostragem aleatória 2020- 2024.	70
Gráfico 18: Box-plot do NDTI por ponto de amostragem 2021.	76
Gráfico 19: Box-plot do NDTI por ponto de amostragem 2022.	77
Gráfico 20: Box-plot do NDCI por ponto de amostragem 2023.	77
Gráfico 21: Box-plot do NDTI por ponto de amostragem 2024.	78

Gráfico 22: Box-plot do NDTI por ponto de amostragem compilado de 2020-2024.	79
Gráfico 23: Box-plot do NDTI por data de amostragem 2020-2024.....	80
Gráfico 24: Box Plot NDTI (Suface Reflectance) por data de amostragem 2020-2024.	80
Gráfico 25: Box-plot do NDTI por data de amostragem aleatória 2021.....	81
Gráfico 26: Box-plot do NDTI por data de amostragem aleatória 2022.....	82
Gráfico 27: Box-plot do NDTI por data de amostragem aleatória 2023.....	82
Gráfico 28: Box-plot do NDTI por data de amostragem aleatória 2024.....	83
Gráfico 29: Evolução da mediana do NDTI por amostragem aleatória 2021-2024.	84
Gráfico 30: Dispersão da concentração clorofila e NDCI por ponto de amostragem.....	89
Gráfico 31: Dispersão da concentração clorofila e NDCI por zona batimétrica.	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Situação das Inspeções	25
Tabela 2: Contagem das imagens por meses.	34
Tabela 3: Classificação da concentração de clorofila.....	37
Tabela 4: Estatística descritiva da concentração de clorofila por data de amostragem 2021.	42
Tabela 5: Estatística descritiva da concentração de clorofila por data de amostragem 2022.	43
Tabela 6: Estatística descritiva da concentração de clorofila por data de amostragem 2023.	44
Tabela 7: Concentração de clorofila por ano 2021-2023.....	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	4
2.1	Objetivo Geral	4
2.2	Objetivo Especifico.....	4
3	REFERENCIAL TEORICO	5
3.1	Princípios do sensoriamento remoto.....	5
3.2	Princípios do sensoriamento remoto aquático	10
3.3	Clorofila-a e estimativa por Sensoriamento Remoto	16
3.4	NDCI	17
3.5	Turbidez e estimativa por Sensoriamento Remoto	19
3.6	NDTI.....	20
3.7	Revisão bibliográfica Local	21
4	MATERIAIS E METODOS.....	24
4.1	Área de estudo.....	24
4.1.1	Ocupação da Lagoa da Conceição	25
4.1.2	Vegetação.....	28
4.1.3	Clima.....	28
4.1.4	Geomorfologia	28
4.1.5	Hidrologia.....	29
4.1	Fonte de dados georreferenciados	30
4.2.1	Dados de concentração de clorofila.....	31
4.2.2	Imagens Orbitais.....	33
4.3	Índices Espectrais	35
4.4	Análise da Clorofila	36
4.5	Análise da série histórica dos índices espectrais	37
4.6	Análise espacial dos índices espectrais.....	39
4.7	Relações entre Clorofila-a <i>in situ</i> e NDCI.....	39
4.7.1	Análise batimétrica.....	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
5.1	Análise da concentração de clorofila.....	42
5.1.1	Análise da estatística descritiva	42
5.1.2	Análise gráfica da concentração de clorofila.....	44

5.1.2	Análise espacial da concentração de clorofila	51
5.2	Análise do NDCI.....	60
5.2.1	Análise temporal do NDCI	60
5.2.2	Análise espacial do NDCI	70
5.3	Análise do NDTI	75
5.3.1	Análise temporal do NDTI.....	75
5.3.2	Análise espacial do NDTI.....	84
5.4	Relação entre clorofila <i>in situ</i> e NDCI	89
5.4.1	Análise batimétrica.....	90
6	CONCLUSÃO	92
7	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA:.....	94

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas aquáticos desempenham papel fundamental para a sustentação da biodiversidade e desenvolvimento socioeconômico. Além disso, o Brasil concentra as maiores reservas do mundo de água doce, e devido a essa grande disponibilidade hídrica, pesquisas voltadas ao meio aquático são de extrema importância para a gestão desses recursos. Dentro desse cenário existe a pressão antrópica que vem poluindo os mananciais que frequentemente estão em vulnerabilidade e são sensíveis às mudanças climáticas.

Nesse contexto, o sensoriamento remoto orbital consolidou-se como uma ferramenta poderosa, permitindo o monitoramento de vastas áreas na medida que se constrói um grande acervo histórico sobre essas áreas. Um desses sensores pioneiros foi o *Costal Zone Color Scanner* – CZCS a bordo do satélite SEASAT lançado em 1978. Essa missão objetivou registrar dados sobre a temperatura da superfície dos mares, água atmosférica e topografia oceânica (Cracknell, 2018). Desde então, o monitoramento usando imagens orbitais foi estendido para o contexto de águas continentais ao nível global, feito pelo programa *Global Surface Water Explore* (<https://global-surface-water.appspot.com/>), que produz informação sobre turbidez, estado trófico e ocorrência das águas superficiais desde de 1984 até os dias atuais.

No Brasil, a disponibilidade hídrica superficial encontra-se em torno de 78.600 m³/s, em paralelo, somente a bacia amazônica corresponde a 65.617 m³/s. Essa demonstração de dados exemplifica a grande disponibilidade hídrica no país e como ela não está distribuída de maneira equitativa (ANA, 2013). Consequentemente, pesquisas que monitoram a disponibilidade e qualidade das águas dos rios e fontes superficiais auxiliam na adaptação de políticas públicas em torno dos recursos naturais.

Dentro do escopo da pesquisa, a Lagoa da Conceição é um sistema aquático costeiro que abriga um ecossistema complexo de alta biodiversidade. Contudo, essa laguna, é constantemente ameaçada por infraestrutura de saneamento deficiente em áreas que passaram por rápida urbanização. Conforme noticiado pela Companhia Catarinense de Águas e Saneamento –

CASAN (2021), o problema mais comum é a inadequação das caixas de gordura, documentado em 1788 casos.

Este cenário foi agravado em 25 de janeiro de 2021 de acordo com a notícia do G1 (2021), o rompimento de uma Lagoa de Evapoinfiltração - LEI despejou um massivo volume de efluentes não tratados para a laguna. Tal evento revelou a necessidade de implantação de ferramentas de monitoramento mais robustas, com capacidade de detecção da poluição, aliada a um posterior acompanhamento da recuperação desse ecossistema.

A CASAN alegou que a causa provável para o rompimento foi excesso de chuva, registrando 422,3 mm nas zonas próximas à Lagoa da Conceição, tal volume ultrapassou o valor de 136,6, que era esperado. Diretamente, o rompimento da LEI afetou 75 residências e dezenas de famílias (CASAN, 2025; NDMAIS, 2025).

De acordo com o Relatório de Monitoramento da Lagoa da Conceição (CASAN, 2021), a descarga da LEI estava enriquecida de nitrogênio e fósforo. Como consequência, a descarga de efluentes não tratados injetou um excesso de matéria orgânica no sistema aquático da laguna. A matéria orgânica funcionou como um catalizador do processo de eutrofização, que ocorre devido à proliferação acelerada de microalgas. Além disso, o aumento desses microrganismos diminui a oxigenação da água e limita a penetração de luz em colunas de água.

Em meio a esse contexto, o sensoriamento orbital surge como uma técnica viável para realizar tarefas análogas. A revisita e disponibilidade de dados provenientes de satélites como o Sentinel-2 e Landsat-8, permite análises contínuas temporal e espacialmente, que permite a aplicação de índices espectrais para o monitoramento de parâmetros da qualidade da água, como clorofila-a (NDCI) e turbidez (NDTI).

Entretanto, a eficácia desses índices não é algo absoluto, pois está relacionada a fatores como interação das águas com a luz, exigindo assim calibração local. Esse processo de calibração foi feito por Lobo et al (2021), na criação do ALGEAEmap, sendo uma plataforma *online* dedicada ao

monitoramento da qualidade da água dos reservatórios no estado de São Paulo, com foco no monitoramento da concentração de clorofila.

Para uma calibração acurada, é necessário recorrer aos dados bio-ópticos validados *in situ*, e visando contribuir para pesquisas em sensoriamento remoto e qualidade da água surgiu o *Bio-optical database for remote sensing of water quality in BRAZil coAstal and inland Waters* – BRAZA. A iniciativa de Marciel et al (2025), reuniram 2895 medições em mais de 128 lagos, reservatórios, rios e áreas costeiras espalhadas nas cinco macrorregiões brasileiras, em um banco de dados que reúne amostras de variáveis como clorofila-a e ficocianina (indicadores de biomassa do fitoplâncton), sedimentos suspensos totais, profundidade do Disco de Secchi turbidez.

No entanto, a presente pesquisa identificou que o estado de Santa Catarina não é contemplado pelo BRAZA, que é a principal base nacional. Diante disso, a presente pesquisa pretende fornecer dados bio-ópticos para o estado de Santa Catarina. Na medida em que faz o uso do evento de 2021, para validar a capacidade do sensoriamento remoto para investigar a robustez de índices espectrais voltados a ambientes aquáticos. Além disso, a pesquisa buscou testar índices espectrais aplicados a parâmetros de qualidade de água em um ambiente lagunar, que vem sofrendo degradação ambiental ao longo dos últimos anos. Semelhantes a índices aplicados a vegetação (e.g NDVI) os índices espectrais de qualidade de água se utilizam da álgebra de bandas para estimar parâmetros aquáticos.

A partir dos pontos levantado pela CASAN a Lagoa da Conceição demonstrou aumento da concentração de clorofila em níveis considerados Eutrófico entre 2021 (60.58 %) e 2022 (68.42 %), posteriormente a qualidade mostrou melhora considerável em 2023 (16.26 %).

Junto aos dados *in situ* de concentração de clorofila índices espectrais foram testados, tendo como alvo a correlação. Com a base em zonas batimétricas foram obtidos os seguintes resultados indo da zona da rasa para a mais profundas: R^2 0.37, R^2 0.48, R^2 0.83.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar temporalmente e espacialmente a concentração de clorofila e turbidez na Lagoa da Conceição por meio de dados de campo e índices espectrais.

2.2 Objetivo Especifico

- Analisar os dados de concentração de clorofila entre os anos 2021-2023.
- Analisar a série histórica dos valores de concentração de clorofila, NDCI e NDTI, identificando padrões sazonais e estatísticos.
- Avaliar a correlação estatística e padrões espaciais entre a concentração de clorofila medida *in situ* e o NDCI.

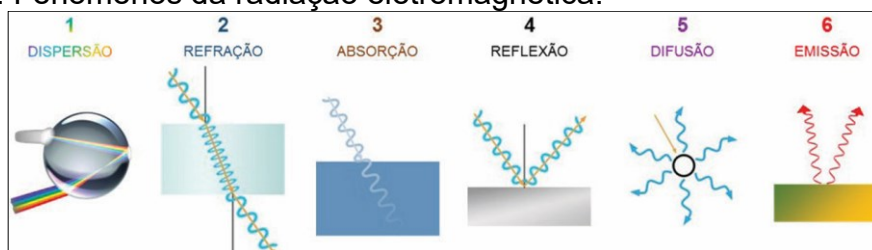
3 REFERENCIAL TEORICO

3.1 Princípios do sensoriamento remoto

O sensoriamento remoto orbital é uma técnica de obtenção de dados sobre a superfície terrestre a partir de sensores a bordo de satélites. Seu princípio fundamental baseia-se na detecção e medição da radiação eletromagnética (como luz visível e infravermelho) que é emitida ou refletida pelos alvos na superfície. Como cada alvo (vegetação, água e solo) possui propriedades físicas e químicas específicas, ele interage de maneira única com a radiação, o que permite sua identificação e caracterização por meio das imagens digitais registradas pelo sensor (Florenzano, 2008; Lira et al., 2016).

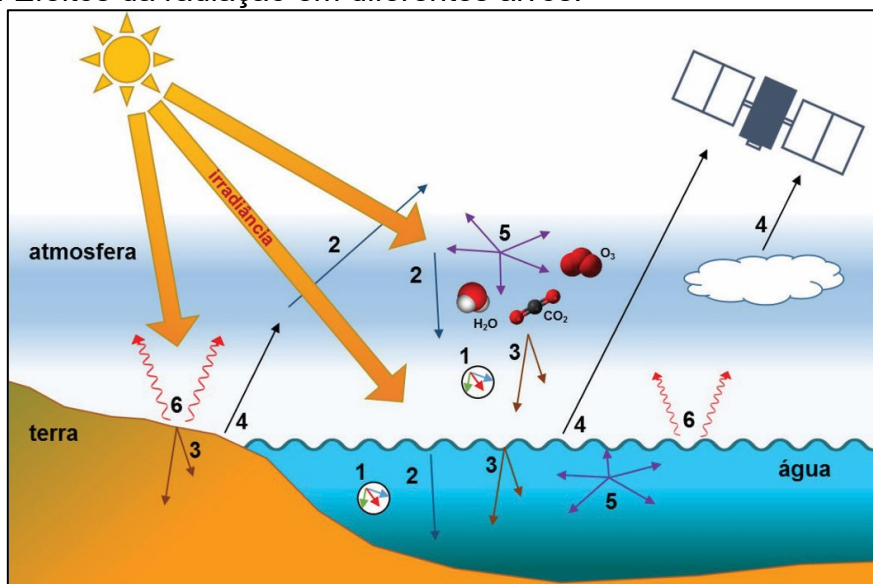
O percurso entre a superfície terrestre e o sensor orbital é a atmosfera, uma camada de gases e partículas que interage com a radiação eletromagnética. Essa interação causa fenômenos como absorção e espalhamento, que modificam a energia antes que ela chegue ao sensor. Portanto, a radiação registrada pelo satélite não representa apenas a reflectância do alvo, mas também os efeitos impostos pela atmosfera, o que torna necessária a aplicação de correções para obter dados precisos da superfície conforme as Figuras 1 e 2.

Figura 1: Fenômenos da radiação eletromagnética.



Fonte: Barbosa, Novo e Martins, (2019).

Figura 2: Efeitos da radiação em diferentes alvos.



Fonte: Barbosa, Novo e Martins, (2019).

Tendo em vista o efeito descrito acima, uma proporção considerável da energia é retida pelos gases na atmosfera. Entre eles está o gás ozônio sendo configurado com um dos principais gases responsáveis por atenuar o efeito da radiação solar na atmosfera em aproximadamente 50%. Portanto, o comportamento espectral de um alvo é definido por um arranjo de fatores que alteram a sua reflectância, ao longo do espectro eletromagnético.

E visando a idoneidade sobre a qualidade dos estudos e análise fundamentadas na técnica do sensoriamento remoto, é preciso fazer considerações quanto à reflectância. A radiância registrada pelo sensor é a radiação eletromagnética refletida pela superfície terrestre, logo, a reflectância (ρ) é o resultado da razão entre a radiância (quantidade de energia que deixa o terreno) e irradiância (quantidade de energia incidente no terreno) de acordo com a Equação 1.

Equação 1: Fórmula da Reflectância

$$\rho = \frac{\text{Radiância}}{\text{Irradiância}}$$

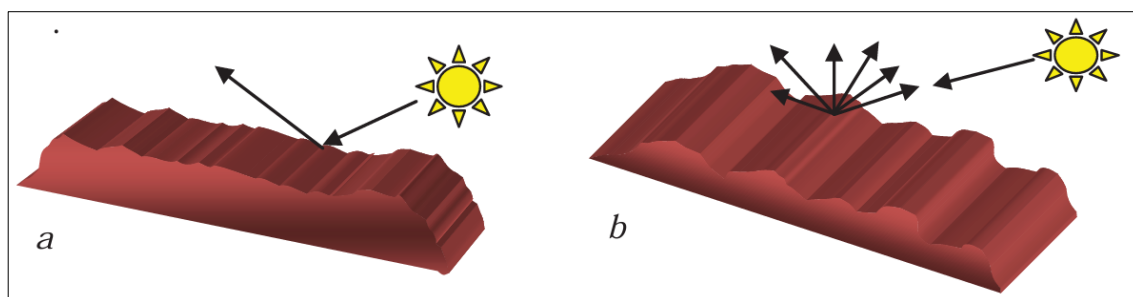
Também é necessário levar em consideração que as condições atmosféricas influenciam nos níveis de registro de processamento. O primeiro nível é conhecido como *Top of Atmosphere* – TOA (reflectância no topo da

atmosfera) inclui no conjunto de correções, as distorções causadas pelo espalhamento atmosférico. É um dado geometricamente corrigido pelo processo de ortorretificação e corrigido no topo da atmosfera.

O outro nível de processamento era o conhecido com *Bottom of Atmosphere* – BOA, porém, atualmente é conhecido como Surface Reflectance – SR (reflectância de superfície). Este nível de processamento aplica modelos de correção atmosférica sobre os dados TOA para remover ou minimizar os efeitos da atmosfera. O objetivo do produto SR é estimar a reflectância real da superfície do alvo, como se a medição tivesse sido feita no local, sem a interferência atmosférica (Queiroz et al., 2021). De modo geral, satélites como o Landsat-8, Landsat-9 e Sentinel-2 organizam a coleção de imagens nesses dois níveis de processamento.

É preciso pensar para além das condições atmosféricas como fator que interfere na análise de imagens, pois, as condições da superfície do alvo também influenciam na interpretação da área de interesse. A reflectância por vezes apresenta comportamento diferencial a depender da superfície do alvo, de acordo com a Figura 3.

Figura 3: (A) Reflectância especular. (B) Reflectância difusora.



Fonte: Meneses e Almeida, (2012).

A Figura 3 (A) representa a reflectância especular sobre uma superfície lisa, e nesta ocasião os raios solares são refletidos no sentido oposto ao ângulo de origem. A Figura 3 (B) é um outro tipo de reflectância, conhecida como difusa, ela ocorre em superfícies rugosas, quando os raios são refletidos em múltiplas direções. É necessário sinalizar que na natureza a maior parte dos alvos demonstra comportamento difuso, frente aos diferentes comprimentos de onda. No entanto, o tipo de reflectância pode ser alterado dependendo do comprimento de onda, ou seja, um solo com superfície rugosa pode apresentar

comportamento especular em cenas na faixa do micro-ondas. Logo, o usuário precisa ficar atento ao padrão de textura do terreno a ser estudado, mas também sobre o comprimento de onda da imagem.

A partir dos princípios físicos que norteiam o sensoriamento remoto, existe uma classificação quanto ao tipo de sensor usado no registro das imagens, seja ele sensor ativo ou sensor passivo. Os ativos são aqueles que possuem uma fonte própria de emissão, são sensores do tipo RADAR que de acordo com Meneses e Almeida (2012), utilizam fontes artificiais de micro-ondas que variam o comprimento de onda entre (3 – 100 cm), com o objetivo contornar condições atmosféricas como cobertura de nuvens tidas como desfavoráveis na maioria dos casos. São sensores geralmente usados para mapeamento geológico, e podem registrar imagens até no período noturno.

Os sensores passivos são equipamentos que dependem de uma fonte de energia natural externa, sendo a radiação solar. A energia do Sol atinge a superfície terrestre, interage com os alvos e a reflectância resultante dessa interação é registrada pelo sensor. Esta é a tecnologia por trás de muitas missões de observação da Terra, como a constelação de satélites Landsat, que registra imagens continuamente desde 1972 com o Landsat-1, até os dias atuais com os Landsat-8 e Landsat-9 (Cracknell, 2018).

A qualidade da informação disponibilizada pelos satélites é qualificada por uma união de fatores. Como por exemplo, as configurações de resolução espacial (10m, 20m e 60m), resolução radiométrica (8 bits, 12 bits e 16 bits) e resolução temporal (2 dias, 5 dias e 16 dias). Diante disso, os projetos de pesquisa ou técnicos precisam se ajustar à qualidade dos dados para a delimitação dos objetivos do trabalho.

Ao compreender as características únicas de cada sensor, é possível aplicar a técnica do sensoriamento remoto em áreas como: agricultura de precisão, planejamento urbano, estudos de susceptibilidade ambiental, mapeamento de desastres, monitoramento de desmatamento e monitoramento da qualidade da água. É possível perceber que o sensoriamento remoto é dotado de uma plasticidade que permite a aplicação em diversas áreas (Van Westen, 2013).

Devido a capacidade de múltiplas aplicações usando imagens de satélite, surge a aritmética de bandas que aplica operações matemáticas a partir de diferentes bandas, para obter uma nova matriz que resulta nos efeitos de suavização ou realce de determinado conjunto de alvos.

Uma das primeiras tentativas, referente a aplicação da aritmética de bandas é o *Ratio Vegetation Index* – RVI (Índice de Vegetação por Razão), que de acordo com Miller e Pearson (1972), é a divisão entre NIR (infravermelho próximo) e Red (Vermelho) como exposto na Equação 2. Tal índice foi proposto para ressaltar a vegetação, e facilitar a interpretação de com maior variação de biomassa.

Equação 2: Formula do Índice de Vegetação por Razão

$$RVI = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{Red}}$$

Fonte: Adaptado de Miller e Pearson (1972).

O uso do RVI de origem a outro índice espectral conhecido como *Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) foi proposto por Rouse *et al* (1974), faz o uso das mesmas bandas arranjadas em um cálculo normalizado conforme a Equação 3. O NDVI identifica o vigor vegetacional dentro do intervalo de ± 1 , para atribuir aos valores negativos ao menor vigor vegetal, já os valores tidos como positivos são os de maior vigor.

Equação 3: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}}$$

Fonte: Rouse *et al.*, (1974).

As bandas no NDVI operam com base na saúde da planta, quando a combinação de bandas apresenta valor alto no infravermelho próximo e baixo no vermelho, os resultados que tendem a se aproximar do +1, indicando uma planta com alta concentração de clorofila, saudável e fotossinteticamente ativa. Inversamente quando a relação entre as bandas apresenta baixo valor no infravermelho próximo e alto valor no vermelho, é o indicativo estresse na

cobertura foliar e baixa concentração de clorofila, vai apresentar resultados próximos de -1.

A facilidade para aplicação do NDVI o torna uma ferramenta fundamental em diversas áreas e escalas de análise. Em aplicações de escala local, por exemplo, Houborg e McCabe (2016) demonstraram sua utilidade ao combinar imagens de alta resolução espacial (Planet, 3-5m) com imagens Landsat-8 (30m) para monitorar paisagens agrícolas na Arábia Saudita. O modelo de regressão resultante ($R^2 = 0,97$) permitiu a detecção de alterações diárias nas culturas, auxiliando no uso racional de insumos agrícolas. Outros estudos, como o de Cavalcante, Almeida e Castelo (2020), também se valem da combinação entre Landsat e GEE para fins de monitoramento em escala regional, como no caso da savana amazônica e de florestas secundárias no estado do Pará.

O uso de bandas espectrais, no entanto, é maximizado em aplicações de larga escala e monitoramento contínuo, especialmente quando combinada com tecnologias de computação em nuvem. Um exemplo proeminente no Brasil é o projeto MapBiomas. Inspirado nos sistemas de monitoramento da Amazônia e do Cerrado, o MapBiomas utiliza o longo acervo de imagens do satélite Landsat (disponível há mais de 30 anos) e o poder de processamento massivo da plataforma Google Earth Engine. Essa combinação permitiu gerar séries históricas de uso e cobertura da terra para todos os biomas brasileiros (Amazônia, Cerrado, Caatinga, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal), alcançando uma acurácia global de 89,13% (Souza Junior et al., 2020).

3.2 Princípios do sensoriamento remoto aquático

Os sistemas aquáticos desempenham papel fundamental para sustentação da biodiversidade e desenvolvimento socioeconômico. Além disso, o Brasil concentra as maiores reservas do mundo de água doce, e devido essa grande disponibilidade hídrica, pesquisas voltadas ao meio aquático são de extrema importância para a gestão desses recursos. Dentro desse cenário de uso dos recursos hídricos, existe a pressão antrópica que vem poluindo os mananciais que frequentemente estão em vulnerabilidade e são sensíveis às mudanças climáticas.

No contexto nacional, o Laboratório de Instrumentação de Sistemas Aquáticos – LabISA do INPE opera pesquisas focadas no sensoriamento remoto aquático desde 2013. Os estudos do LabISA estão geralmente voltados ao estudo de parâmetros indicadores de qualidade da água (clorofila e matéria inorgânica em suspensão), das propriedades químicas e físicas. Por exemplo, o trabalho desenvolvido por Paulino et al (2025), apresenta um novo método para gerar bandas com 10 metros de resolução espacial ao combinar imagens do Sentinel-2 e 3. Adaptadas para a detecção do crescimento de algas e cianobactérias, a partir de modelos estatísticos como o de Regressão Linear Multivariada e *Random Forest*.

O monitoramento da água apresenta alguns desafios específicos, diferentes daqueles encontrados ao observar o solo ou a vegetação. O principal obstáculo está na forma como a radiação eletromagnética interage com a coluna de água. Quando a água tem pouca quantidade de sedimentos suspensos, ela tende a absorver mais radiação, especialmente nos comprimentos de onda do infravermelho próximo. Consequentemente, por refletir pouco a radiação, o sinal que chega ao sensor costuma ser fraco em comparação com o que ocorre com os objetos na superfície terrestre.

O sensoriamento remoto de ambientes aquáticos baseia-se na ideia de parâmetros chamados Opticamente Ativo – OA. Esses fatores são responsáveis por mudar a cor da água e interagir diretamente com a radiação eletromagnética. Exemplos de OA incluem a Clorofila-a, a Turbidez e a Matéria Orgânica Colorida Dissolvida – CDOM. Cada um deles influencia de uma forma específica a reflexão da luz na água dentro do espectro eletromagnético. (Cesar; Kampel; Stech, 2018).

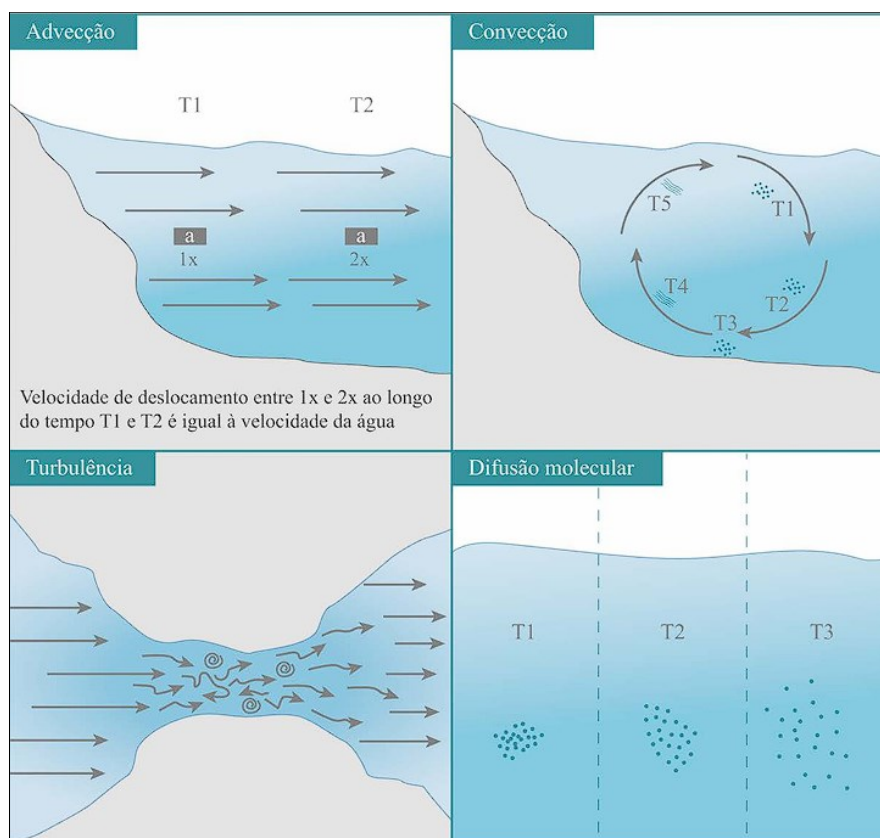
Assim como os alvos terrestres, a superfície aquática tem as suas especificidades relativas às classificações hidrodinâmicas, ou seja, o tempo que determinado volume de água leva para ser renovado, também conhecido como residência hidráulica. Por exemplo, riachos, rios e córregos são enquadrados como sistemas lóticos, pois são ambientes de água corrente que possuem tempo de residência hidráulica menor. Enquanto, sistemas lênticos são aqueles que

tempo de renovação consideravelmente maior podendo até mesmo levar anos, esse são representados por lagos, lagoas, lagunas e reservatórios (ANA, 2013).

Os processos de transporte aquático também são somados no complexo conjunto de fatores que compõem os sistemas aquáticos e sua hidrodinâmica. Compreender os processos que influenciam o transporte dos sedimentos orgânicos e inorgânicos, é importante entender o comportamento dos parâmetros OA com clorofila-a e turbidez.

A Figura 4 exemplifica os tipos de transporte, o primeiro deles é a advecção que é movimento causado por um fluxo direcional. Esse tipo é geralmente atribuído aos rios, porém, ocorre em reservatórios devido ao efeito de cisalhamento entre os ventos e a superfície da água. A convecção é caracterizada por ser o movimento vertical da água, que ocorre como consequência da diferença de densidade na coluna de água. Já a difusão, acontece como consequência do fluxo helicoidal rápido, que resulta no surgimento de redemoinhos na superfície. A difusão molecular é a representação do mecanismo transporte das moléculas, sem que necessariamente ocorra a movimentação da água, e a temperatura é um aspecto que influencia no grau de agitação das moléculas.

Figura 4: Tipo de transporte em sistemas aquáticos.



Fonte: Barbosa, Novo e Martins, (2019).

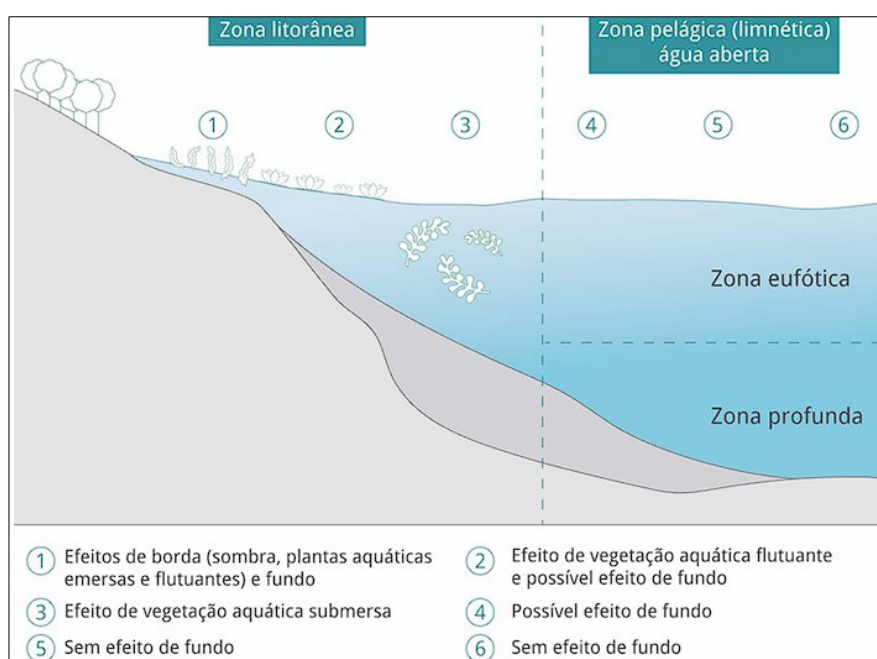
Também é necessário considerar a disposição geográfica dos corpos lânticos em relação ao seu gradiente topográfico, pois as diferenças de declividade e altimétricas compõem a configuração morfológica, que consequentemente influenciam diretamente o ordenamento das colunas de água.

A Figura 5 exemplifica como a transição topográfica altera a disposição da superfície devido às diferenças da zona litorânea para a zona pelágica. A zona litorânea é rasa, sendo uma região geralmente ocupada por plantas terrestres ou subaquáticas, ou seja, favorece o crescimento de macrófitas que são espécies encontradas completamente submersas, flutuantes ou emergentes. A zona pelágica, corresponde à parte distante da margem, sem vegetação flutuante em que a coluna de água apresenta duas tipologias: a zona

eufórita com possíveis efeitos de fundo e zona profunda onde a luz é praticamente nula (Lira et al., 2016).

É notável que o sensoriamento remoto do meio aquático, encontra condicionantes únicas que alteram a coluna de água e modificam a resposta espectral dos parâmetros opticamente ativos. Os fatores acima apresentados são sensíveis ao tipo de movimentação que acontece tanto superficial quanto zonas profundas. Além disso, áreas próximas à superfície tendem a ser mais influenciadas por sombras de objetos, vegetação e reflexo do fundo.

Figura 5: Gradientes horizontais e verticais de sistemas aquáticos.



Fonte: Barbosa, Novo e Martins, (2019).

O método tradicional para estimar a qualidade da água, consiste em coletas amostrais em campo e posterior análise laboratorial de parâmetros como turbidez, clorofila-a, pH, Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO e Demanda Química de Oxigênio – DQO e outros indicadores. Conforme Bruce e Bruce (2019), o teorema do limite central determina que a proporção média das amostras precisa convergir para uma distribuição normal. A dimensão do corpo hídrico precisa ser considerada para definir o número de amostras representativas, mirando diminuir as incertezas da análise.

Visando contornar as dificuldades encontradas em áreas de estudo de grande dimensão, o sensoriamento remoto orbital oferece o uso das imagens de satélite para estimar a qualidade da água (Fitz, 2017). Nesse sentido, o uso de imagens de satélite torna o levantamento dos dados em grandes áreas menos oneroso, isto é, viável economicamente devido a disponibilização pública e gratuita de várias coleções de imagens.

O sensoriamento remoto pode ser combinado com amostras de campo para produzir resultados mais idôneos sobre o corpo hídrico, pois as amostras in situ são usadas para formar um conjunto de validação, e amostras usando imagens de satélite configuram um conjunto de treino. Estabelecendo esses grupos amostrais é possível compreender a variabilidade estatística de uma variável. O Lago Paranoá localizado em Brasília Distrito Federal foi alvo do processo descrito acima no monitoramento do estado trófico, utilizando estações da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal – CAESB, junto da série histórica do satélite Landsat-5 para estimar estado trófico da área estudo para os anos 1984, 1994 e 2001 (Machado; Baptista, 2016).

Goufeng et al (2015) utilizaram imagens do sensor MODIS a bordo do satélite Terra para estimar a concentração do *Suspended Particulate Matter* - SPM da Lagoa Dongting, combinando a resolução temporal do Terra com imagens de maior resolução espacial do Landsat-8 para validar o conjunto de amostral pesquisa.

Com proposta semelhante ao estudo citado acima Wen et al (2022), combinaram a capacidade de imageamento do Landsat com processamento massivo da computação em nuvem para estimar o SPM para os Lagos da China, com dimensão superior a 1ha. Com o auxílio da plataforma de programação em nuvem Google Earth Engine – GEE, os autores reuniram mais de 1000 cenas dos satélites Landsat 5, 7 e 8 para estimar o total de matéria em suspensão, para os anos 2011-2020. Com resultados superiores a 0.7 de R^2 e raiz quadrada do erro médio atingindo o valor máximo de 21.4 mg/L, o que indica estabilidade dos modelos usados para estimar valores de SPM a longo prazo.

Entre as publicações de Goufeng et al (2015) e Wen et al (2022), houve o intervalo de apenas 7 anos. A comparação entre esses estudos exemplifica o

potencial das técnicas aplicadas pelo sensoriamento remoto em ambientes aquáticos, ao expandir o estudo feito em escala local para a nacional.

3.3 Clorofila-a e estimativa por Sensoriamento Remoto

Clorofila-a é um pigmento de cor esverdeada associado a fotossíntese presente no fitoplâncton, que modifica a coloração da água conforme sua concentração aumenta, sobretudo em corpos lânticos. O fitoplâncton é um termo que generaliza os microrganismos que movem passivamente na superfície aquática e desempenham papéis importantes como a realização de fotossíntese, que resulta na transformação de energia solar em dióxido de carbono e na construção de matéria orgânica, sendo a base para ciclo do carbono e sucessão ecológica primária (Novo et al., 2013).

Por ser um indicador direto da biomassa fitoplanctônica, a concentração de clorofila-a é amplamente utilizada como um parâmetro chave da qualidade da água, fortemente associada a processos de eutrofização. O enriquecimento de nutrientes no meio aquático (principalmente fósforo e nitrogênio) pode levar à proliferação excessiva desses microrganismos, resultando em degradação da qualidade da água (Ponte et al., 2020).

A estimativa da clorofila-a por sensoriamento remoto, no entanto, é complexa, especialmente em águas continentais e costeiras, classificadas como águas de Caso II. Diferentemente das águas de Caso I (oceânicas), cuja cor é dominada pelo fitoplâncton, as águas de Caso II possuem propriedades ópticas influenciadas por múltiplos componentes, como sedimentos em suspensão e matéria orgânica colorida dissolvida, que podem mascarar o sinal da clorofila-a (Duan et al., 2008).

A princípio a mensuração de clorofila envolve métodos tradicionais, que consistem na coleta in situ de amostras distribuídas no corpo hídrico de interesse. Utilizando espectrorradiômetro e estações de coleta, para posterior análise em laboratório. Como alternativa aos métodos que necessitam de vários recursos logísticos, o sensoriamento remoto surge como alternativa de mapeamento de clorofila e maneira de otimizar as análises em áreas de ampla dimensão espacial (Chen et al., 2013).

Existem diversas maneiras de aplicar o sensoriamento remoto para quantificar a clorofila. A exemplo da pesquisa aplicada no curso médio do reservatório Nova Avanhandava, estado de São Paulo, que utilizou imagens MODIS, RapidEye e espectrorradiômetro. O objetivo do trabalho foi comparar o imageamento entre as imagens de satélites com os dados de campo para construção de modelos de regressão de clorofila. O RapidEye apresentou os melhores resultados de R^2 variando entre 0,70-0,74 (Cicerelli; Galo, 2015).

Outro modo de estimar a clorofila é por meio de indicadores construídos a partir de aritméticas de bandas. A detecção de clorofila pode ser feita por meio de diferentes índices espectrais conforme aplicado no estudo do Lago Harsha, localizado nos Estados Unidos. O estudo testou a concentração de clorofila-a na forma de três índices, reunindo os resultados em uma árvore de decisão. Os índices 2BDA, 3BDA e NDCI obtiveram os respectivos resultados a partir do R^2 de 0,75, 0,73 e 0,71 (Xu et al., 2018).

Entre os diferentes métodos para detectar a clorofila existe o NDCI, que é um índice espectral específico para essa variável. A preferência pelo seu uso é elencada pelos seguintes critérios: facilidade de aplicação e interpretação aliada a consistência ao longo do tempo. O primeiro critério é algo relacionado com a facilidade de usar apenas a combinação de duas bandas para destacar o alvo de interesse, a clorofila. A interpretação delimitada entre -1 ou +1, de uma equação normalizada facilita a delimitação de grupamentos, pois, a variação da clorofila está enquadrada nos limites da equação. Partindo do limite fixo do NDCI, é facilitada a comparação entre diferentes períodos e criação de grupamentos que diferenciam a concentração clorofila (Wang et al., 2022).

3.4 NDCI

Mishara e Mishara (2012) propuseram como indicador de clorofila-a: o NDCI. Originalmente aplicado sobre zona costeira/estuarina para águas do caso II, o índice estima de modo acurado os parâmetros estritamente relacionados à concentração de clorofila, como biomassa e sucessão biológica. O NDCI varia de ± 1 , onde os valores negativos representam valores menores de clorofila-a,

sendo assim, os valores positivos representam maior ocorrência de clorofila a. Esse índice espectral foi primeiramente proposto com os intervalos de reflectância do sensor *Medium Resolution Imaging Spectrometer* – MERIS abordo da missão Envisat conforme a Equação 4.

Equação 4: Índice de Clorofila-a por Diferença Normalizada – NDCI

$$NDCI = \frac{\rho(708) - \rho(665)}{\rho(708) + \rho(665)}$$

Fonte: Mishara e Mishara, (2012).

Assim como outros alvos estudados pelo sensoriamento remoto, a clorofila-a conta uma interação específica de refletância delimitada dentro do espectro eletromagnético. Para Gitelson et al (1996), a clorofila-a apresenta variação de $\lambda = 630\text{nm}$ até 708nm , que se relaciona com fatores como a radiação solar, condições da superfície da água, outros parâmetros opticamente ativos, sólidos orgânicos e inorgânicos.

Os satélites Landsat-8, Sentinel-2 foram testados para detecção de clorofila-a usando como conjunto de validação imagens do WorldView-3, visando a criação de um algoritmo que estimou o estado trófico do Lago Chad localizado entre os países Níger e Nigéria. Com apoio de amostras de campo para formar um conjunto de validação, o NDCI junto de outros índices espectrais foram testados, os satélites Landsat-8 e Sentinel-2 mostraram uma performance do NDCI com R^2 0.75 e 0.74, junto da raiz quadrada do erro médio de 7,5% e 8,7% (Buma; Lee, 2020).

O NDCI também foi aplicado em uma série temporal usando o Sentinel 2 para determinar a concentração de clorofila-a. O Lago Chad localizado ao sul do Malawi foi monitorado entre os meses de março até outubro de 2019, conforme a sazonalidade da chuva, demarcando os meses iniciais como a estação chuvosa para estação seca perto do final do ano, também destacando o período de transição entre as estações. A concentração de clorofila-a é menor entre os meses de maio a agosto na ordem de 0 a 5 ($\mu\text{g/L}$) e aumenta consideravelmente nos meses de setembro e outubro, em diversas zonas a concentração varia entre 15 até 20 ($\mu\text{g/L}$) (Makwinja et al., 2023).

3.5 Turbidez e estimativa por Sensoriamento Remoto

A turbidez é uma importante parte que compõe o sistema aquático, que incorpora partículas orgânicas e inorgânicas em suspensão, de modo a inibir a passagem dos raios solares ao longo de uma coluna de água. Em alta concentração, as partículas em suspensão interferem na luminosidade essencial para manutenção de vida aquática, sendo um dos fatores que indicam eutrofização (Garg; Aggarwal; Chauhan, 2020).

Desse modo a turbidez é um parâmetro opticamente ativo que altera a cor do corpo hídrico, e consequentemente transformam as características espectrais do meio aquático. O desequilíbrio deste parâmetro no meio aquático acontece de muitas maneiras. O aumento de erosão devido a diminuição da cobertura vegetal é um exemplo, outro componente que contribui para instabilidade é o descarte de efluentes industriais e domésticos (Cazassa et al., 2018).

O monitoramento da turbidez usando imagens de satélite é importante para compreender a espacialidade de eventos extremos como o ocorrido na cidade de Brumadinho, no estado de Minas Gerais. O rompimento da Barragem I despejou aproximadamente 12 milhões de metros cúbicos de rejeitos no Rio Paraopeba. Para detecção desse efluentes, imagens do Sentinel-2 em conjunto com os classificadores supervisionados RF e SVM, foram utilizados visando quantificar a turbidez e avaliar individualmente a performance das bandas. As bandas azul e banda infravermelho limítrofe 1 demonstraram maior peso na classificação (Batista, 2022).

Um sistema de monitoramento precisa manter uma razão entre a frequência de imageamento e acurácia dos parâmetros medidos. Ao unir a resolução do Landsat-8 que varia entre 30 e 15 metros, com a tempo de revisita do MODIS de 2 dias houve um ganho no monitoramento da turbidez. Essas características foram combinadas na construção de um modelo implementado no Lago Dongting, na China. Dessa maneira, os dados Landsat-8 alimentam modelos de regressão que testam a acurácia das imagens do MODIS para o monitoramento do material particulado em suspensão (Guofeng et al., 2015).

3.6 NDTI

Para detectar as mudanças de turbidez o NDTI, foi proposto conforme a Equação 5. O NDTI, identifica em diferentes graus de turbidez em corpos hídricos, e assim como outros índices normalizados, as variações estão no intervalo de ± 1 , relacionando os valores negativos a água límpida, e aos valores positivos a uma maior concentração de sedimentos (Lacaux. et al, 2007).

Equação 5: Índice da Turbidez por Diferença Normalizada – NDTI

$$NDTI = \frac{\rho_{red} - \rho_{green}}{\rho_{red} + \rho_{green}}$$

Fonte: Lacaux et al, (2007).

Segundo Barbosa, Novo e Martins (2019), a turbidez é identificada no intervalo de comprimento de onda ($\lambda = 510\text{nm}$ e 620nm), em razão da alta absorção da radiação eletromagnética dos orgânicos e inorgânicos diluídos em meio aquoso. Respectivamente para o Sentinel-2 as banda 3 verde ($\lambda = 560\text{ nm}$) e banda 4 vermelho ($\lambda = 664.5\text{nm}$), para o Landsat-8 banda 3 ($\lambda = 530\text{nm}$) e banda 4 ($\lambda=640\text{nm}$).

O Lago Chilika, localizado na Índia, foi alvo de uma pesquisa que aplicou o NDTI para o qual foi proposta uma classificação com 7 diferentes categorias de turbidez. Tal diferenciação necessitou de validação junto a dados de campo, usando um espectrorradiômetro para analisar a refletância em 48 pontos amostrais ao longo do lago, feito esse procedimento a imagens foi classificada em 7 classes de turbidez (Garg et al., 2017).

A realidade cotidiana das atividades antrópicas altera indicadores de qualidade da água em diferentes intensidades, sobretudo o aumento da turbidez que está relacionado com o despejo de esgoto industrial nos mananciais. Durante o período da pandemia de COVID-19, mais precisamente entre os meses março e abril de 2020 que representam o período de lockdown, o Rio Ganga localizado na Índia foi alvo de uma análise usando o NDTI para detectar a turbidez. Houve um notável aumento de qualidade da água em termos de claridade principalmente nos trechos do rio ocupados por cidades em sua

margem. O lockdown reduziu as atividades na indústria têxtil e de fragrâncias, o que desencadeou a diminuição dos efluentes (Garg; Aggarwal; Chauhan, 2020).

3.7 Revisão bibliográfica Local

Com objetivo de ampliar a lente sobre a revisão bibliográfica, a produção acadêmica local foi considerada através da investigação dos estudos sobre a Lagoa da Conceição. Uma análise exploratória foi aplicada, com base nos temas relacionados à qualidade da água e ao rompimento da LEI ocorrido em 2021.

O portal da Biblioteca Universitária da UFSC foi usado para buscar as pesquisas referentes à área de estudo do projeto, e um total de 17 documentos foram selecionados entre o período de 1990-2022.

Os estudos de maneira geral investigam características físicas, químicas e biológicas do corpo lagunar, a distribuição espacial do uso e ocupação do solo que ocorre ao redor da lagoa, e os impactos socioambientais decorrentes do processo de urbanização. Também é notável a heterogeneidade das áreas do conhecimento que investigam a Lagoa da Conceição como os cursos de Direito, Agronomia e Aquicultura, Ciências Biológicas, Oceanografia, Geografia, Engenharia de Produção e Engenharia Sanitária e Ambiental. Por meio de textos de TCC, dissertação de mestrado, tese de doutorado e artigos publicados em revistas acadêmicas.

Foram conduzidas análises sobre as variáveis concentração de nitrato, concentração de bactérias, coliforme fecais e balneabilidade nos trabalhos de (Dias; Parizotto; Bonetti., 2014; Silva., 2013; Rodrigues., 1990), que são indicadores de qualidade da água relacionados ao esgoto sanitário despejado na Lagoa da Conceição. Outros estudos detalham a composição química e bioquímica da água na Lagoa da Conceição como os de (Silva., 2021; Portella., 2020; Martins., 2016; Pereira; Gandra; Fonseca., 2015), esses estudos são feitos a partir de análise de amostras in situ, distribuídas zonas de interesse no corpo hídrico para posterior análise laboratorial.

Os autores acima reúnem informações sobre os parâmetros de qualidade da água usando o método tradicional, que preconiza o levantamento in situ das

amostras distribuídas na Lagoa da Conceição. O uso de imagens de satélite fica restrito aos autores (Rodrigues., 1990; Silva., 2021), que utilizaram imagens do Landsat-5 e Ikonos para produção dos resultados. Em recortes de tempo restritos a um único ano, não aproveitando as possibilidades proporcionadas por uma série temporal de imagens.

O parâmetro clorofila-a foi estudo por (Horn., 2021; Martins., 2016; Martini., 2006), a distribuição dessa variável é um fator chave para determinar a espacialização do estado trófico. O estudo de (Martini., 2006) usou o sensoriamento remoto para espacialização da clorofila, por meio de uma única imagem Landsat-5 do ano de 2005. E a classificação da clorofila-a foi especializada apenas nas áreas mais profundas (superior a 1m), caracterizando essas zonas como oligotróficas ($< 2,5 - 5 \mu\text{g/L}$) e mesotrófica ($5 - 7,5 \mu\text{g/L}$). A pesquisa de Horn (2021), aplicou o índice espectral NDCI para detecção da clorofila-a para toda extensão da Lagoa da Conceição, porém utilizou como conjunto de validação apenas amostra localizadas no setor sul. Através da coleção de imagens do Sentinel-2 entres os anos 2018-2021, aliada a amostras in situ de concentração de clorofila-a distribuídas na extensão da lagoa. Os resultados demonstraram valores elevados de concentração de clorofila-a no ano de 2020, com médias que variam entre ($10,4 - 15,4 \mu\text{g/L}$).

Existem também estudos que avaliam os aspectos sociais, como as dinâmicas de ocupação da Lagoa da Conceição, percepção ambiental, e mais recentemente uma discussão jurídica sobre o rompimento da LEI. As pesquisas realizadas por (Silva., 2002; Lopes., 2007), utilizam entrevistas para produzir os dados sobre a qualidade ambiental urbana, e além disso caracterizar o perfil econômico, escolar, ocupacional e etário dos moradores nos bairros localizados nas intermediações da lagoa. O trabalho de Marquetti (2022), avaliou o rompimento da LEI sob o conceito de criminologia verde, que considera os seres não humanos (fauna e flora) como vítimas.

Existem poucos trabalhos focados em aplicar o sensoriamento remoto no contexto de qualidade da água. No cenário geral, as pesquisas na Lagoa da Conceição são conduzidas usando pontos de coleta distribuídos no corpo lagunar, para medir parâmetros físicos e químicos e biológicos. Dito isso, poucas

pesquisas fazem análises aprofundadas usando imagens satélite, somente os trabalhos de (Horn., 2021; Martini., 2006), aplicam a técnica do sensoriamento remoto para qualidade da água.

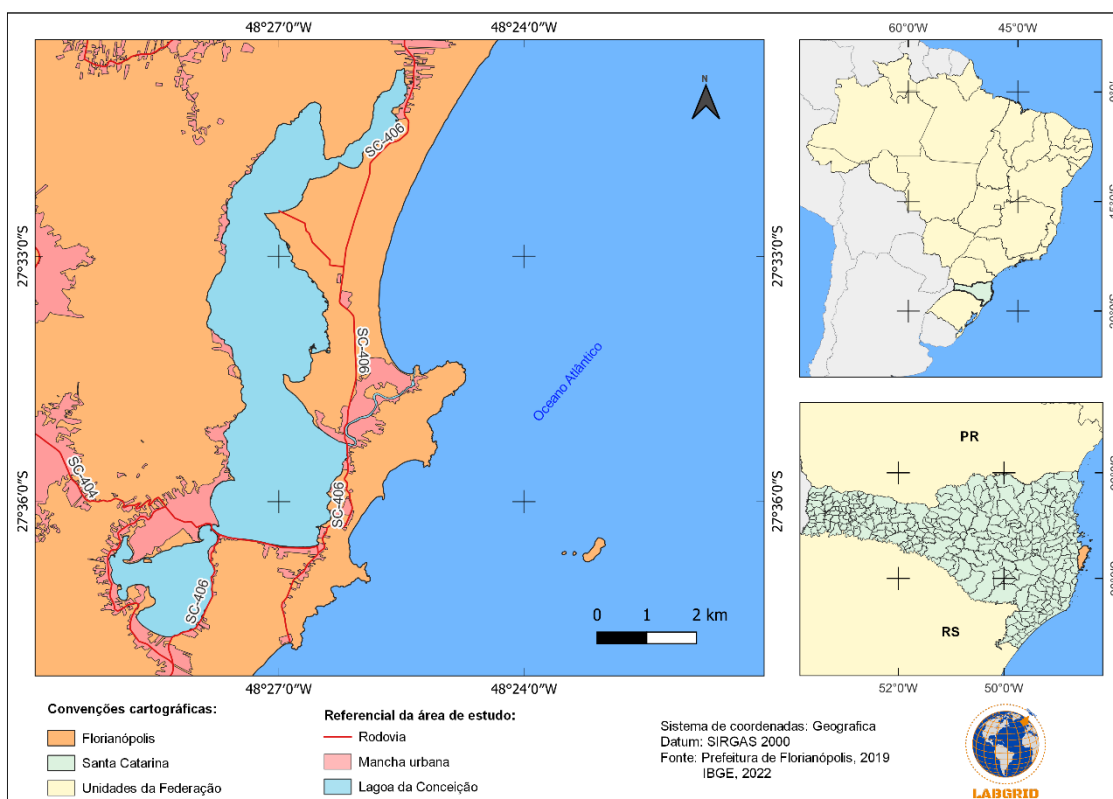
No entanto os trabalhos citados acima, possuem conjuntos validação limitados a zonas específicas da Lagoa da Conceição. Em especial a porção sul da Lagoa da Conceição para estimar a concentração de clorofila, outros parâmetros opticamente ativos como turbidez não são contemplados.

4 MATERIAIS E METODOS

4.1 Área de estudo

O presente trabalho foi desenvolvido na Lagoa da Conceição (Figura 6), localizada na ilha de Santa Catarina que pertence ao município de Florianópolis, no estado de Santa Catarina. A Lagoa da Conceição, nas mais recentes décadas tem passado por processo intenso de urbanização. Devido à pressão antrópica, alguns indicadores de qualidade da água estão sendo alterados, como clorofila-a e turbidez, principalmente em decorrência ao descarte de efluentes residenciais sem tratamento (Silva et al., 2017; Martini et al., 2006).

Figura 6: Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Autor, (2025).

4.1.1 Ocupação da Lagoa da Conceição

Quatro distintas zonas de aglomeração urbana se destacam no entorno da laguna. A região norte, englobando o bairro Rio Vermelho, o setor centro-leste, localizado nas proximidades do canal da Barra da Lagoa, a área sul onde se encontra o Porto da Lagoa, e o centro-oeste que abriga o Centrinho da Lagoa, a principal zona urbana.

A problemática ambiental foi aprofundada pela falta de rede coletora de esgoto em diversos bairros, principalmente os bairros Rio vermelho e Porto da Lagoa. De acordo com o Programa Floripa se liga na Rede – PMF (2017), o setor da Lagoa da Conceição esta assistido parcialmente de rede coletora de esgoto conforme mostrado na Tabela 1.

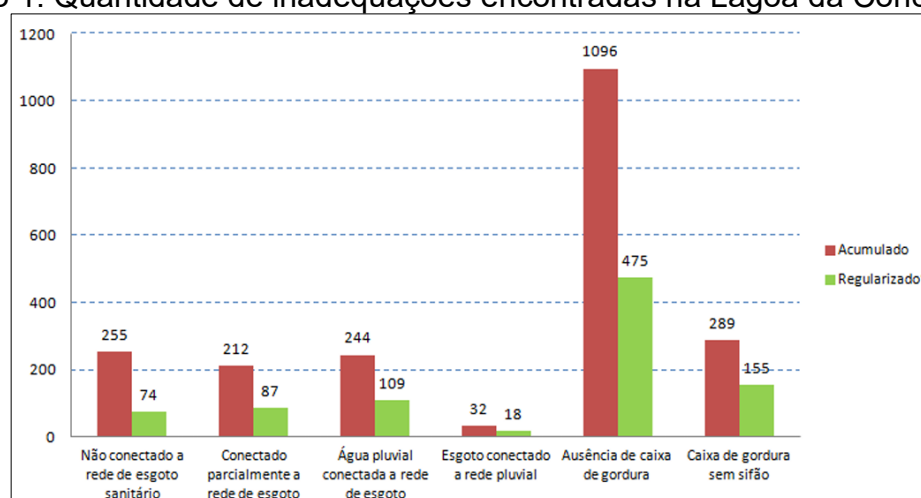
Tabela 1: Situação das Inspeções

Localidade	Ligações Adequadas	Ligações Inadequadas	Total
Lagoa da Conceição	1474 63,30%	854 36,70%	2328 100%

Fonte: adaptado de PMF, (2017).

O Relatório parcial também especifica a situação da rede coletora conforme o Gráfico 1 e Figura 7, as condições referentes a caixa de gordura revelam que 1096 domicílios, estão da lagoa estão sem caixa de gordura. Também é preciso destacar, as condições dos domicílios não conectados à rede de esgoto e daqueles que estão parcialmente conectados, com respectivamente 255 e 212 acumulados.

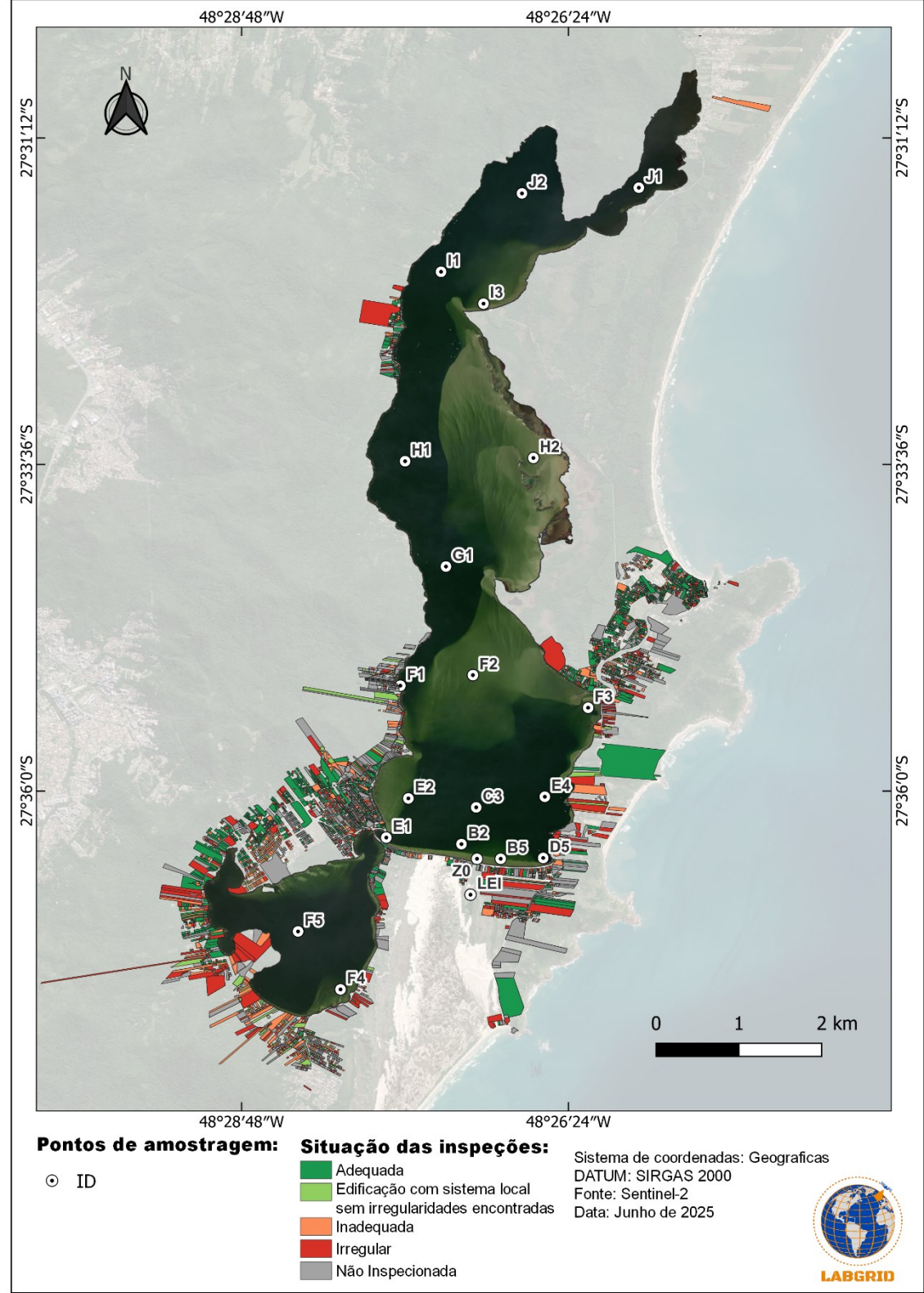
Gráfico 1: Quantidade de inadequações encontradas na Lagoa da Conceição.



Fonte: PMF, (2017).

Sob uma perspectiva das informações mais recentes, a Figura 7 espacializa as inspeções sanitárias por lote, qualificando a situação em 4 classes. Sendo necessário a classe dos lotes tidos como inadequados e irregulares, os do primeiro tipo estão instalados de maneira que não atendem à necessidade de uso, ou são insuficientes para o tratamento. O segundo, considera irregulares lotes que estão descumprindo as leis ou normas técnicas, seja em casos de despejo ilegal de águas sem tratamento, ou imóveis com ausência de sistema de tratamento sanitário.

Figura 7: Mapa das inspeções sanitárias na Lagoa da Conceição



Fonte: PMF, (2021).

4.1.2 Vegetação

A ilha de Santa Catarina possui dois tipos de vegetação. A vegetação de restinga com fitofisionomia rasteira herbácea sem material lenhoso, rasteira herbácea subarborescente com pouco material lenhoso e em menor proporção a restinga arbórea de médio e grande porte. O outro tipo é a floresta ombrófila densa, conhecida como Mata Atlântica e tende a ocupar a encosta dos morros. (Gomes et al., 2022)

A região da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição contém áreas de vegetação litorânea e Mata Atlântica. A Mata Atlântica, em algumas partes da bacia hidrográfica encontra-se no estágio de vegetação secundária no sopé dos morros. As intermediações da Lagoa da Conceição são constituídas de Área de Preservação Permanente – APP, definidas pelo plano diretor que contém majoritariamente Mata Atlântica (DIAS, 2007).

4.1.3 Clima

A Ilha de Santa Catarina é marcada por um clima temperado, controlado pelas massas Polar Marítima e Tropical Marítima. A temperatura média anual é de 20,4 graus e a umidade relativa do ar é de 80%. Conforme a classificação de Köppen, o clima é mesotérmico úmido de zona intermediária subtropical (Silva, 2002).

Na ilha não há estação seca ou chuvosa, pois, as precipitações são distribuídas ao longo das estações do ano. A precipitação anual média é de 1527,26mm, os meses mais chuvosos apresentaram valores de 181,40mm e 549,70mm, já os valores mínimos oscilaram entre 3,90mm e 70,10mm (Porto Filho 1993).

4.1.4 Geomorfologia

A geomorfologia da Ilha de Santa Catarina é formada por maciços rochosos interligados por áreas planas, em que os maciços fazem parte do

contexto de soerguimento da Serra do Mar. As áreas tidas como planas, são representadas pelas dunas, cordões arenosos, lagoas costeiras e zonas de mangue (Filho; Felix; Camargo, 2020).

A Lagoa da Conceição é cercada por dois domínios geomorfológicos estruturais. O primeiro é o deles é referente aos depósitos sedimentares do quaternário, onde a porção leste da lagoa é ocupada pelas planícies marinhas modeladas por processos eólicos, referente a praia de Moçambique. Outra parte desses depósitos eólicos, corresponde as dunas localizadas na porção sul da Lagoa da conceição. O Centrinho da Lagoa está localizado na interface de transição entres as unidades geomorfológicas da Serra Catarinense e as planícies coluvio-aluviais. O segundo domínio, é o domínio das Rochas Granitoides que formam as Serras do Leste Catarinense com o padrão de topos aguçados. Nessa porção leste da lagoa, as drenagens marcam dissecação forte do relevo (IBGE, 2004).

4.1.5 Corpo Lagunar

A Lagoa da Conceição é classificada como uma laguna estrangulada, ligada ao mar através do Canal da Lagoa, assim caracterizando um sistema estuário. Com área que corresponde a 19,2 Km² com largura variável entre 200 até 2500 metros. A transição entre os ambientes terrestre, lagunar, fluvial e marinho tornam toda interface da área de estudo complexa e sensível as condições antrópicas devido a ocupação urbana (Krunig: Noernberg 2005). Nesse sentido, aproximadamente 53% do volume de água da Lagoa da Conceição encontra-se em profundidades inferiores a 2 metros de profundidade (Porto Filho, 1993).

O canal da Barra da Lagoa possui 2,8 Km de comprimento, no decorrer dos anos a morfologia do canal foi modificada por drenagens aplicada durante décadas. Resultando, em um fluxo constante de água que modificou o comportamento do canal. Em virtude disso, o canal funcional como um filtro natural da maré, que ajuda a reduzir a força da maré astronômica, enquanto isso

as variações meteorológicas passam a exercer maior influência no nível da água. (Odreski, 2012).

A principal fonte de água doce da laguna, tem como origem o rio João Gualberto, localizado no extremo norte da Lagoa da Conceição. Quando ocorre um evento chuvoso, aproximadamente 24% da contribuição hidrológica é descarregada na laguna (Bier, 2013).

4.1 Fonte de dados georreferenciados

A pesquisa utilizou um conjunto de dados geoespaciais, incluindo dados vetoriais e tabulados, para realizar às análises espaciais. Os dados referentes à concentração de clorofila-a na Lagoa da Conceição foram obtidos a partir de relatórios da Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN). Essas informações foram tabuladas e, posteriormente, georreferenciadas, associando as concentrações de clorofila-a ao local das respectivas estações de coleta.

Os demais dados vetoriais foram adquiridos de diferentes fontes. Do GeoPortal da Prefeitura de Florianópolis, foram extraídos os polígonos correspondentes ao limite da Lagoa da Conceição e à mancha urbana do município. A base cartográfica utilizada para a elaboração dos mapas foi obtida do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE.

Para adquirir os dados matriciais, foi escolhida a plataforma de computação em nuvem Google Earth Engine – GEE. O GEE permite o processamento de imagens em escala planetária de forma gratuita, por meio de sua arquitetura de comunicação servidor-cliente, a plataforma possibilita o acesso ao acervo de imagens do satélite Sentinel-2 (Gorelick et al., 2017), que foram utilizadas neste estudo.

4.2.1 Dados de concentração de clorofila

Os dados de clorofila-a foram retirados de relatórios da Companhia Catarinense de Águas e Saneamento – CASAN, conforme a Figura 8 emitidos de fevereiro de 2021 até novembro de 2023, disponíveis no site (<https://www.casan.com.br/menu-conteudo/index/url/analises-das-aguas#0>).

No entanto, é necessário dispor alguns adendos sobre a completude dos registros. Alguns anos contam com lacunas nos registros, isto é, meses em que não houve coleta. Além disso, nem todas as coletas de superfície incluem a concentração de clorofila-a nos relatórios, e mesmo nos meses em que essa variável está presente, alguns pontos distribuídos ao longo da área de estudo não foram amostrados.

É necessário ressaltar que as amostras de concentração precisaram ser filtradas, pois foram disponibilizadas em dois formatos, de amostras de superfície com 0,5 m de profundidade e amostras de fundo. Devido às limitações intrínsecas do sensoriamento remoto orbital, de registrar a reflectância da água em gradientes profundos, somente os pontos da superfície foram utilizados conforme a Figura 8. Após a seleção, obteve-se um conjunto final de 23 pontos de amostragem de superfície. Com as seguintes condições, 21 desses pontos possuem coordenadas e os outros 2 não possuem localização, porém contam com amplo registro de concentração de clorofila. Os valores de concentração de clorofila-a estão expressos em ($\mu\text{g/L}$), totalizando 459 amostras distribuídas em 3 anos: 104 em 2021, 152 em 2022 e 203 em 2023.

Figura 8: Relatório Disponibilizados pela CASAN.


MERIEUX
 NutriSciences

RESUMO DOS RESULTADOS DA AMOSTRA N° 259326/2021-0

Processo Comercial N° 8401/2021-5

DADOS REFERENTES AO CLIENTE

Empresa solicitante:	COMP CATARINENSE DE AGUAS E SANEAMENTO CASAN
Endereço:	Rua RUA EMILIO BLUM, 83 - PREDIO - CENTRO - Florianópolis - SC - CEP: 88020010
Nome do Solicitante:	Patrice Juliana Barzan

DADOS REFERENTES A AMOSTRA

Identificação do item de ensaio:	10995895		
Identificação do Cliente:	Água salobra -13 Superfície		
Amostra Rotulada como:	Água Salobra		
Coletor:	Tiago Luis Baura - Bioagri - Curitiba		
Data da Amostragem :	29/07/2021 10:10:00		
Data da entrada no laboratório:	30/07/2021 08:20:00	Data de Elaboração do RRA:	13/08/2021

RESULTADOS PARA A AMOSTRA

Parâmetros	Unidade	Diluição	LQ/ Faixa	Resultados analíticos	Data do Início do Ensaio	F1	F2
Temperatura	°C	---	01 a 50	16,5	29/07/2021 10:10	---	---
pH (a 25°C)	---	---	2 a 13	8,25	29/07/2021 10:10	---	---
Oxigênio Dissolvido	mg/L	---	0,1	7,8	29/07/2021 10:10	---	---
Nitrogênio Ammoniacal	mg/L	---	0,1	< 0,1	07/08/2021 15:24	---	---
Nitrogênio Total	mg/L	1	0,5	< 0,5	05/08/2021 01:24	---	---
Nitrato (como NO3)	mg/L	2	0,8	< 0,8	03/08/2021 17:00	---	---
Nitrato (como NO2)	mg/L	---	0,033	< 0,033	30/07/2021 16:30	---	---
Fosforo Total	mg/L	2	0,02	0,03	03/08/2021 12:45	---	---
Condutividade	µS/cm	---	1	45400	29/07/2021 10:10	---	---
Clorofila A	µg/L	1	1	10,3	30/07/2021 13:58	---	---
Carbono Orgânico Total	mg/L	5	2,5	7,0	04/08/2021 18:20	---	---
Escherichia coli	NMP/100mL	10	10	41	30/07/2021 09:00	---	---
Enterococcus (NMP)	NMP/100mL	1	1	19	30/07/2021 09:00	---	---
Salinidade	‰	---	0,1	29,5	29/07/2021 10:10	---	---
Polifosfato	mg/L	1	0,010	0,01	04/08/2021 11:47	---	---
Fosfato (como P)	mg/L	1	0,01	< 0,01	31/07/2021 09:00	---	---
Surfactantes (como LAS)	mg/L	1	0,2	< 0,2	30/07/2021 15:00	---	---

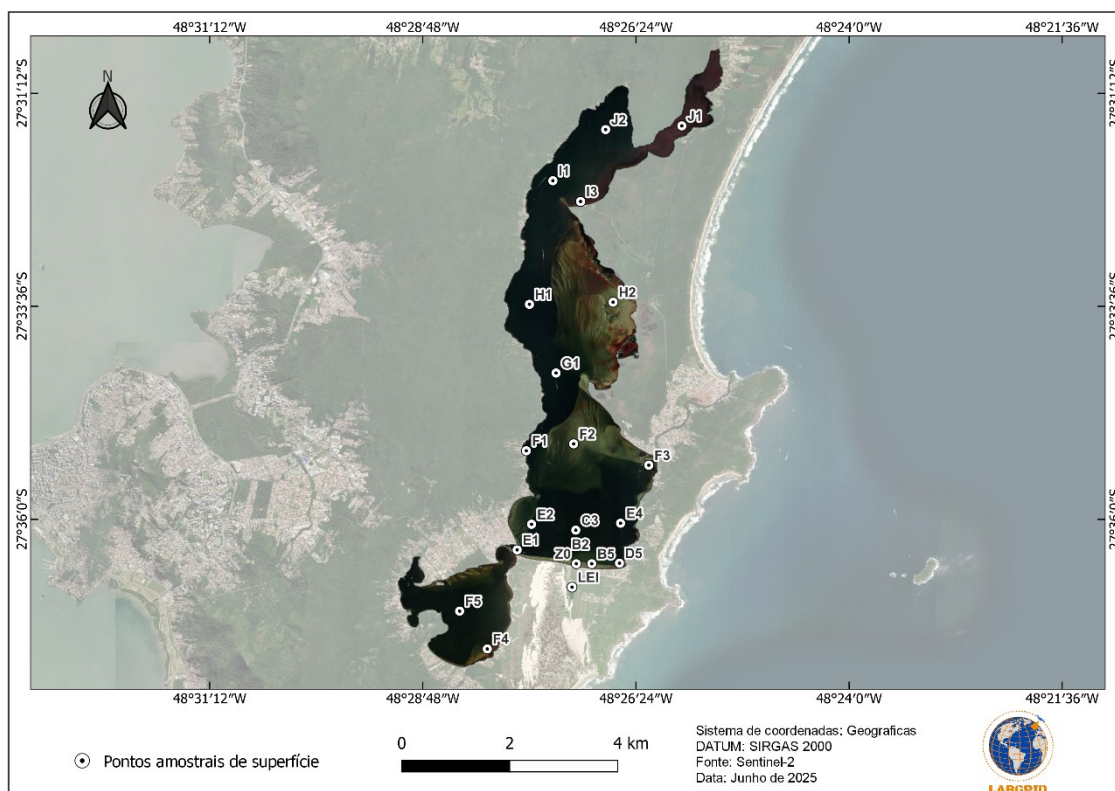
Flag 1 (F1): Análises marcadas com "X" na coluna Flag 1 indicam análise realizada fora do holding time do parâmetro, podendo possuir desvios que podem comprometer os resultados, devendo ser avaliados com esta ressalva.

Flag 2 (F2): Análises marcadas com "X" na coluna Flag 2 indicam análise realizada com a amostra sendo recebida de forma inadequada, tanto em conteúdo, frasco ou temperatura, tendo sido autorizada pelo interessado. Desta forma os resultados podem possuir desvios que podem comprometer os resultados, devendo ser avaliados com esta ressalva.

As seguintes análises foram realizadas no local da Amostragem : Condutividade, Oxigênio Dissolvido, pH (a 25°C), Temperatura, Salinidade

Fonte: CASAN, (2021).

Figura 9: Mapa de distribuição dos pontos.



Fonte: Autor, (2025).

4.2.2 Imagens Orbitais

O satélite escolhido para as análises da pesquisa foi o Sentinel-2 (A e B) sensor *MultSpectral Instrument* – MSI, administrado pela *European Space Agency* – ESA. O Sentinel-2A foi lançado em 2015, e o Sentinel-2B, em 2017. A missão Sentinel-2 utiliza satélites idênticos com o objetivo de aumentar a resolução temporal das imagens, ou seja, diminuir o tempo de revisita entre as cenas que é de aproximadamente 5 dias (ESA, 2015).

As imagens usadas na pesquisa pertencem ao nível de processamento 1C TOA, que inclui correção geométrica de ortorretificação e correção no topo da atmosfera. O Nível 2A SR foi também compõe a análise dos índices espectrais com correção atmosférica específica para o topo da superfície. Tal nível foi escolhido para compara o registro espectral dos dois níveis de processamento. Outro critério chave para a seleção é a diminuição da influência atmosférica, em razão disso foram filtradas cenas com menos de 15% de

cobertura de nuvens, para então selecionar e incorporar na coleção de imagens, aquelas que permitiram a visualização completa da Lagoa da Conceição sem nuvens sobre o corpo hídrico. Entre os anos de 2020 e 2024, conforme a Tabela 2 foram selecionadas um total de 102 imagens.

Tabela 2: Contagem das imagens por meses.

Ano	Meses												N° Imagens
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	
2020												1	1
2021		1	1	3	1	2	6	1			1		16
2022	1	4	1	2	3	2	3	1	5	2	4	1	29
2023	2	3	3	2	6	6	3	4	2		4	2	37
2024	2	1	3	1	2	3	2	2		2	1		19

Fonte: Autor, (2025).

O Sentinel-2 (A e B) possui resolução espectral de 13 bandas, que cobrem o espectro do visível, do infravermelho próximo e o infravermelho de ondas curtas, junto com uma faixa de imageamento de 290Km. Outra característica pertinente do satélite é a resolução espacial, atribuído 10m as bandas do visível e a banda 8 do infravermelho próximo, a resolução de 20m engloba os outros canais do infravermelho próximo, o restante das bandas do infravermelho de onda curta e a banda do azul-profundo foram atribuídas a resolução de 60m. Todas as bandas possuem a resolução radiométrica de 12 bits.

Das características listadas acima, algumas são particularmente relevantes para a realização da pesquisa. A primeira delas é a resolução espacial: para os canais do espectro visível e do infravermelho próximo a resolução espacial é 10m, enquanto que para o vermelho limítrofe é 20m. Uma vez, que as bandas do vermelho limítrofe (banda 5), vermelho (banda 4) e verde (banda 3) são usadas nos índices espectrais NDTI e NDCI. Adicionalmente, a alta resolução temporal de aproximadamente 5 dias possibilita o monitoramento frequente da Lagoa da Conceição, aspecto fundamental para avaliar a dinâmica temporal da turbidez e da concentração de clorofila-a.

4.3 Índices Espectrais

O *Normalized Difference Chlorophyll Index* – NDCI, estima estritamente a concentração de clorofila, na forma de diferença normalizada variando entre ± 1 . Em que valores negativos indicam baixa concentração de clorofila e consequentemente valores positivos indicam alta concentração (Mishara; Mishara., 2012). O NDCI utiliza as seguintes bandas devidamente adaptadas para o Sentinel-2, conforme a Equação 6: a banda 4 do vermelho ($\lambda = 664,5$ nm) e banda 5 vermelho limítrofe 1 ($\lambda = 703,9$ nm). Essa adaptação das bandas para o Sentinel-2 foi baseada na formulação de Xu et al. (2018).

No entanto, é preciso sinalizar um procedimento adicional na aplicação do NDCI sob as coleções de imagens do Sentinel-2. Devido à diferença de resolução espacial entre a banda 4 (10 metros) e banda 5 (20 metros), a primeira banda precisou ser reamostrada para 20 metros utilizando a transformação interpolação cúbica. As bandas que fazem parte do NDTI não precisaram desse procedimento, pois ambas possuem a mesma resolução espacial.

Equação 6: Índice de Clorofila-a por Diferença Normalizada – NDCI.

$$NDCI = \frac{\rho_{red\ edge-} - \rho_{red}}{\rho_{red\ edge+} + \rho_{red}} \quad (1)$$

Fonte: Xu et al, (2018).

O *Normalized Difference Turbidity Index* – NDTI, foi proposto para detectar as alterações no parâmetro físico da turbidez nos corpos hídricos, e assim como o índice anterior mede alterações na forma de diferença normalizada, restritas ao intervalo de ± 1 . Valores negativos geralmente indicam água com baixa turbidez (mais límpida), enquanto valores positivos sugerem águas com maior concentração de sedimentos em suspensão, o que resulta em maior turbidez (Lacaux et al., 2007). Para o uso do índice com cenas do Sentinel-2, foram requeridas as bandas conforme a Equação 7, as bandas 3 verde ($\lambda = 560$ nm) e banda 4 vermelho ($\lambda = 664,5$ nm) (Garg; Aggarwal; Chauhan., 2020).

Equação 7: Índice da Turbidez por Diferença Normalizada – NDTI

$$NDTI = \frac{\rho_{red} - \rho_{green}}{\rho_{red} + \rho_{green}} \quad (2)$$

Fonte: Garg, Aggarwal e Chauhan, (2020).

4.4 Análise da Clorofila

A análise de dados de clorofila consistiu em selecionar os 23 pontos de superfície, para a criação de gráficos e da estatística descritiva. A análise foi realizada no *software* Statistica (versão 8), que reuniu métricas de tendência central (média, mediana e moda) e tendência de dispersão (desvio padrão, mínimo e máximo). A estatística descritiva sumarizou os dados, o que possibilitou compreender a variabilidade do conjunto de dados referente à concentração de clorofila entre os anos 2021-2023.

A concentração de clorofila também foi analisada usando gráficos do tipo box-plot e colunas verticais empilhadas, que foram úteis para a interpretação espacial e temporal da clorofila na Lagoa da Conceição. A elaboração destes gráficos foi realizada na plataforma Google Colab, um ambiente baseado em Jupyter Notebook e hospedado na nuvem, utilizando a linguagem de programação Python (versão 3.10).

Visando avaliar a disposição espacial da concentração de clorofila juntamente com a classificação de estados trófico uma série de mapas foram feitos. Os mapas mostram a distribuição a cada mês conforme disponibilizado pela CASAN. A cobertura temporal foi a seguinte: para o ano de 2021, de julho a dezembro; para 2022, de janeiro a agosto (exceto o mês de julho); e para 2023, de janeiro a novembro (exceto o mês de março).

A classificação ocorreu conforme as divisões da Tabela 3, os limiares foram delimitados pela CETESB (2013). Essa classificação é aplicada para ambientes lênticos como reservatórios, lagos e lagunas. Tais classes também foram adaptadas para enquadrar do NDCI de acordo com Lobo et al (2021), visando relacionar concentração de clorofila com NDCI, em um próximo tópico, o método para a correlação dessas duas variáveis será detalhado.

Tabela 3: Classificação da concentração de clorofila

Estado Trófico	Concentração de Clorofila (µg/L)	NDCI
Ultraoligotrófico	<1,17	<-0,2
Oligotrófico	1,17 — 3,24	-0,20 — -0,17
Mesotrófico	3,24 — 11,03	-0,17 — -0,10
Eutrófico	11,03 — 30,55	-0,10 — 0,0
Supereutrófico	30,55 — 69,05	0,0 — 0,12
Hipereutrófico	69,05>	0,12>

Fonte: Adaptado de Lobo et al (2021) e CETESB (2013).

A análise integrada das medições de clorofila-a *in situ*, por meio de tabelas, gráficos e mapas, permitiu registrar e caracterizar as condições da Lagoa da Conceição quanto ao seu estado trófico durante o período estudado.

4.5 Análise da série histórica dos índices espectrais

A análise temporal abrange as variáveis NDTI e NDCI entre os anos de 2021 a 2024 usando como base os pontos amostrais de superfície disponibilizados pela CASAN e pontos amostrais aleatórios distribuídos por toda a extensão da Lagoa da Conceição e a coleção de imagens do Sentinel-2. Posto isso, ambos os tipos coordenadas de foram usadas para extrair os valores de NDCI e NDTI.

Para viabilizar essa análise, foram estruturados um total de 8 *scripts* no GEE relativos a cada ano a cada índice, que extraíram os valores de NDCI e NDTI, juntamente com a data associada a cada cena do Sentinel-2. A divisão dos scripts ficou da seguinte forma, 4 para os pontos da CASAN e 4 para pontos aleatórios construídos no Qgis. Feito esses procedimentos, cada *script* resultou em uma planilha no formato CSV, para que os gráficos fossem criados no Google Colab.

Sobre os pontos aleatórios é preciso fazer um adendo. Foram distribuídos 4000 pontos sobre toda a extensão da Lagoa da Conceição, a proporção de

pontos segue conforme a Equação 7. Essa equação teve como parâmetros o tamanho da população de 200000 (pixels), grau de confiança de 99% e margem de erro de 2%.

Equação 7: Formula para determinar o tamanho das amostras para populações finitas.

$$Tamanho\ da\ amostra = \frac{\frac{z^2 * p(1-p)}{e^2}}{1 + \left(\frac{z^2 * p(1-p)}{e^2 N}\right)} \quad (3)$$

Fonte: Autor (2025)

onde N é o tamanho da população, e significa a margem de erro, z é o score associado ao nível de confiança e p é a proporção estimada da característica da população.

É necessário destacar que os dados referentes à concentração de clorofila passaram por um procedimento diferente, pois foram extraídos conforme já exposto dos relatórios publicados pela CASAN. Além disso, esse conjunto possui intervalo de tempo diferente, ficando limitado entre os anos de 2021, 2022 e 2023. Portanto, esse conjunto de dados foi usado nessas condições para a construção dos gráficos no Google Colab.

Havendo exposto os critérios acima para o tratamento específico de cada uma das variáveis NDTI, NDCI e clorofila, o próximo passo foi analisar por meio de gráficos do tipo box-plot para essas três variáveis. Essa técnica foi escolhida para a análise e visualização da dinâmica temporal e da distribuição dos valores dessas três variáveis. Foram gerados dois conjuntos principais de *box plots* no Google Colab.

O primeiro conjunto de gráficos representa os valores agregados por datas. Os valores de todos os pontos de amostragem foram agrupados para cada data de aquisição da imagem no caso do NDTI e NDCI ou data de coleta para a clorofila-a *in situ*. Dessa forma, cada *box plot* representa a variabilidade espacial dos valores observados na Lagoa da Conceição em uma data específica, ao longo do período analisado para cada variável.

O segundo conjunto de gráficos representa os valores agregados por ponto de amostragem. Neste segundo conjunto, os valores da série temporal

foram agrupados individualmente para cada um dos 23 pontos de amostragem. Assim, cada *box plot* ilustra a variabilidade temporal de NDTI, NDCI ou clorofila-a *in situ* em um local específico da laguna, ao longo do período correspondente a cada conjunto de dados.

4.6 Análise espacial dos índices espectrais

Visando compreender a distribuição da clorofila e da turbidez a partir de variáveis *proxy*, essa etapa da pesquisa projetou os índices NDCI e NDTI em séries de mapas ao longo dos anos (2021 - 2024). Para melhor compreender a mudanças espaciais relativas a cada ano, os mapas foram estruturados de acordo com as estações do ano (verão, outono, inverno e primavera).

Com base no exposto acima, foram selecionas cenas para cada estação do ano, levando em conta a diferença de aproximadamente 3 meses entre cada imagem de satélite e com a menor cobertura possível de nuvens sobre a Lagoa da Conceição. Foram produzidos ao todo produzidos 8 mapas, 4 mapas para representar a variações espaciotemporal do NDCI e 4 para o NDTI.

4.7 Relações entre Clorofila-a *in situ* e NDCI

Com o objetivo de investigar a sincronia temporal e a correlação estatística entre a concentração de clorofila-a *in situ* e os valores do NDCI, foram elaborados gráficos de correlação.

Para analisar possíveis correlações entre dados de clorofila *in situ* e o NDCI, foram selecionadas as imagens que coincidem com as datas de amostragem. Assim, foram selecionadas as imagens que possuam diferença de 24 horas, tendo como referência a data do levantamento, ou seja, podem ser selecionadas imagens registradas 24 antes da coleta de campo ou 24 depois.

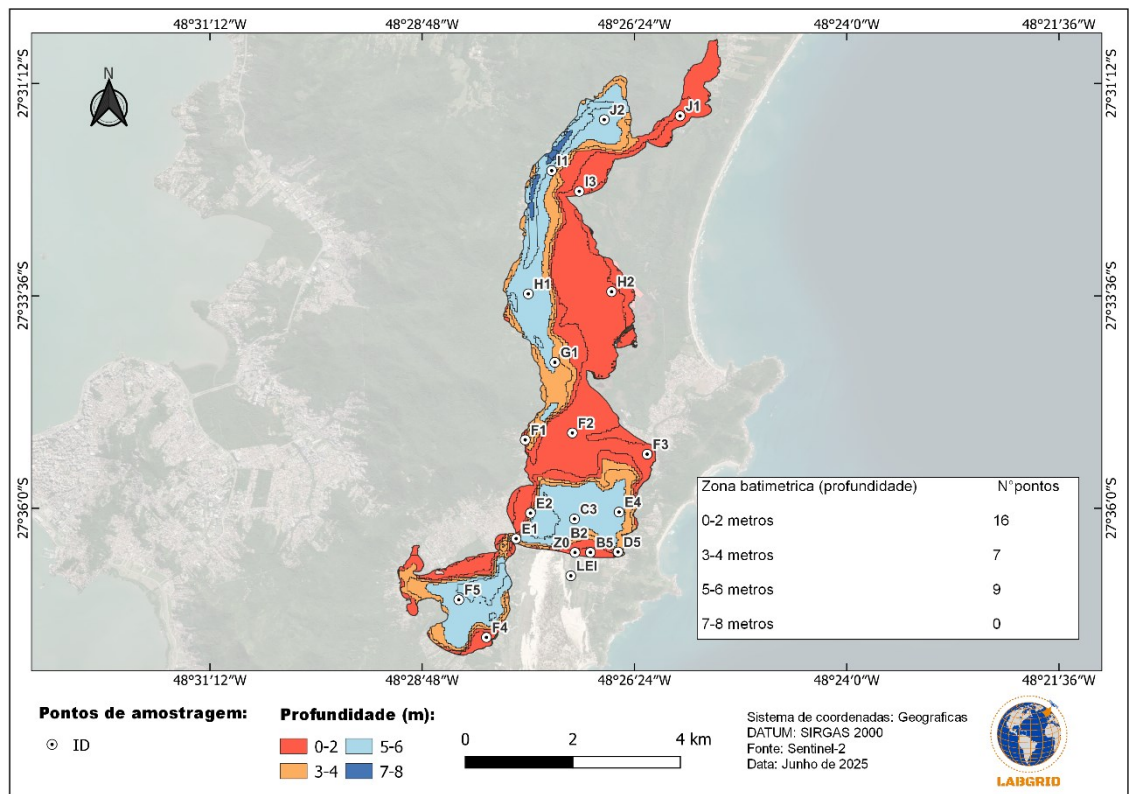
A correlação apontada nos gráficos de dispersão consiste na correlação do tipo exponencial acompanhada de um coeficiente de determinação R^2 . Tal configuração está de acordo com o estipulado por Mishara e Mishara (2012), que criaram o índice espectral e notaram que a correlação não linear é aquela representa a variabilidade da concentração de clorofila.

4.7.1 Análise batimétrica

Visando compreender a formação dos grupamentos e possíveis fatores que influenciam e alteram os valores de concentração de clorofila e NDCI, a base batimétrica da Lagoa da Conceição foi utilizada conforme a Figura 10. A fonte vetorial da batimetria foi disponibilizada pela prefeitura de Florianópolis através do GeoPortal, com cotas que variam entre 0 até 8 metros de profundidade.

As zonas batimétricas foram divididas em quatro diferentes zonas, demarcadas a cada 2 metros de profundidade. O uso da batimetria buscou entender como a topografia subaquática influencia a concentração de clorofila e o seu *proxy* NDCI, e na espacialidade dessas variáveis.

Figura 10: Mapa das classes batimétricas.



Fonte: Autor, (2025).

Tendo em vista a divisão das zonas batimétricas, a Figura 10 também informa a quantidade de pontos de amostragem distribuídos sob as cotas de profundidade. É preciso sinalizar um adendo a respeito da zona batimétrica com intervalo entre 7-8 metros de profundidade, visto que tais áreas não possuem pontos adjacentes, portanto, não foram produzidos resultados para representar essa porção da Lagoa da Conceição.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise da concentração de clorofila

5.1.1 Análise da estatística descritiva

Os dados de estatística descritiva estão organizados conforme o ano, ou seja, cada data reúne todos os pontos disponíveis para aquele dia em específico. O ano de 2021 de acordo com a Tabela 4, possuem métricas de tendência central (média e mediana) que variam aproximadamente entre 10($\mu\text{g/L}$) e 20($\mu\text{g/L}$) na maioria dos meses, exceto o mês novembro, que apresenta valores consideravelmente baixos, próximos de 3 ($\mu\text{g/L}$).

No que se refere à amplitude dos dados (mínimo e máximo) e dispersão dos dados (desvio padrão), destaca-se o mês de dezembro de 2021 como o maior valor máximo de 40 ($\mu\text{g/L}$), sendo esse o mês com maior variação. Essa variação afetou o desvio padrão, que resultou no maior desvio padrão da Tabela 4, de 8,6($\mu\text{g/L}$), indicando maior heterogeneidade nesse mês.

É preciso destacar o dia 7 de agosto de 2021, possui apenas uma única amostra, sendo assim não é possível analisar métricas centrais e de dispersão para essa data.

Tabela 4: Estatística descritiva da concentração de clorofila por data de amostragem 2021.

	Nº valido	Média	Mediana	Moda	Frequência da moda	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
29/07/2021	16	10,79	10,40			6,33	18,00	2,89
07/08/2021	1	12,21	12,21	12,21	1,00	12,21	12,21	2,66
19/08/2021	18	22,81	13,60			8,33	17,30	2,66
16/09/2021	18	15,46	14,80	11,10	2,00	4,16	26,70	5,31
22/10/2021	20	12,07	13,00	13,00	3,00	3,90	21,00	5,22
29/11/2021	20	3,45	2,15			0,90	8,70	2,47
20/12/2021	18	16,22	14,50	15,00	4,00	5,40	40,00	8,62

Fonte: Autor, (2025).

O ano de 2022, Tabela 5, apresentou aumento se comparado com o ano de 2021, nas métricas de tendência. Por exemplo, mês de março teve como moda o valor de 30($\mu\text{g/L}$) considerado eutrófico, os meses de fevereiro, março, abril maio também se enquadram nessa classificação. O aumento da concentração também foi reproduzido aos valores máximos, com o pico de 50 ($\mu\text{g/L}$) para o mês de maio.

Tabela 5: Estatística descritiva da concentração de clorofila por data de amostragem 2022.

	N° valido	Média	Mediana	Moda	Frequência da moda	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
29/01/2022	21	12,58	11,00	11,00	3,00	2,30	38,00	8,32
18/02/2022	20	14,50	15,50	16,00	7,00	9,50	22,00	3,76
17/03/2022	21	22,95	23,00	30,00	4,00	12,00	33,00	7,05
14/04/2022	22	16,67	17,00	18,00	4,00	8,80	25,00	4,37
17/05/2022	22	18,09	16,50	14,00	4,00	12,00	50,00	7,86
24/06/2022	22	4,93	4,40	2,70	2,00	1,60	14,00	3,11
23/08/2022	21	11,81	9,50	25,00	3,00	5,90	25,00	5,93

Fonte: Autor, (2025).

De modo geral, o ano de 2022 teve maior heterogeneidade entre a amostra de clorofila, isso é observado no aumento dos valores de desvio padrão. Outro fato observado, foi a queda abrupta da concentração de clorofila, o pico de 50($\mu\text{g/L}$) do mês de maio sucedeu uma queda abrupta no mês de junho com média de 4,93($\mu\text{g/L}$).

O ano de 2023 é aquele com maior número amostral ao mesmo passo também é aquele com mais campanhas de amostragem no decorrer do ano. Logo, o padrão apresentado em 2023 tenderá a ser mais consistente quando comparado com os anos anteriores.

De modo geral, o ano de 2023 (Tabela 6) contém os menores valores de concentração de clorofila, tendo em vista que a data com os maiores valores de tendência central (média e mediana) demonstraram concentração de entre 7,94 ($\mu\text{g/L}$) e 5,34 ($\mu\text{g/L}$) no mês de agosto. Sendo notável uma considerável queda quando comparado com o ano anterior, que apresentou média de 11,03 ($\mu\text{g/L}$), no mesmo período do ano. Outro dado relevante que expressa tal queda é a moda junto da frequência da moda, pois os valores que mais se repetiram foram de 0,01 ($\mu\text{g/L}$) e 0,53 ($\mu\text{g/L}$), no total de 17 vezes.

Tabela 6: Estatística descritiva da concentração de clorofila por data de amostragem 2023.

	N° valido	Média	Mediana	Moda	Frequência da moda	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
17/01/2023	21	0,93	0,27	0,01	10,00	0,01	8,81	2,02
14/02/2023	22	1,48	0,80	0,53	7,00	0,01	13,88	2,82
12/04/2023	23	4,87	4,27	4,27	3,00	0,01	21,19	4,02
17/05/2023	20	5,91	4,54	4,54	3,00	0,25	17,36	4,33
21/06/2023	13	6,19	5,34			2,14	13,35	3,31
25/07/2023	21	5,65	4,32			1,62	23,43	4,61
15/08/2023	22	5,74	5,21			0,27	20,29	4,75
12/09/2023	21	7,94	5,34			0,27	41,49	9,05
30/10/2023	23	4,39	2,94	2,14	3,00	1,34	22,70	4,46
29/11/2023	21	1,28	1,07			0,20	6,87	1,32

Fonte: Autor, (2025).

A estatística descritiva de 2023 revela diminuição notável de concentração de clorofila em comparação com os anos de 2021 e 2022. Tal diminuição revela melhoria de qualidade da água em 2023 para a Lagoa da Conceição a partir deste parâmetro

5.1.2 Análise gráfica da concentração de clorofila

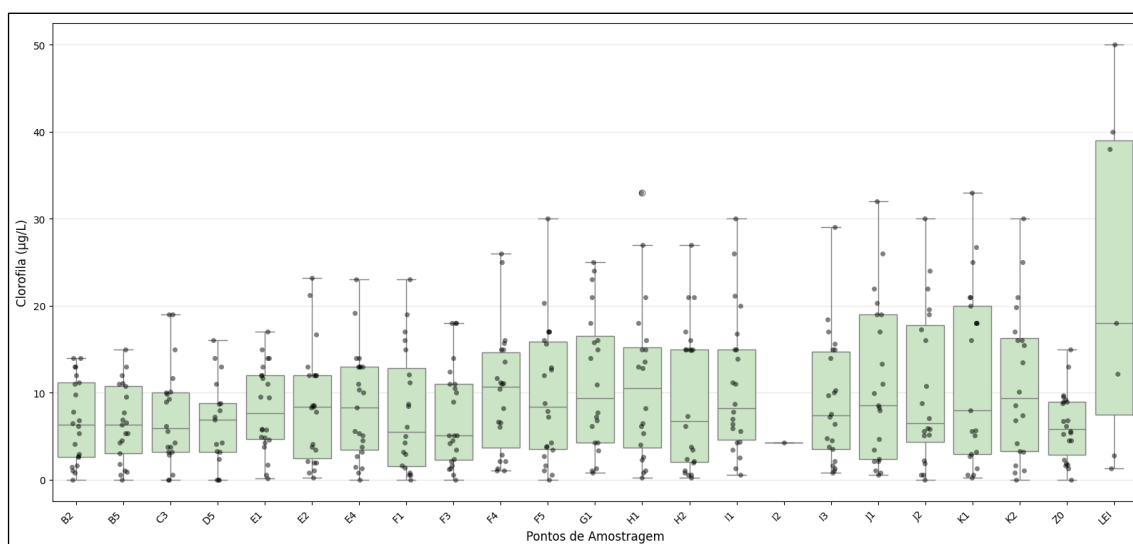
A partir dos relatórios disponibilizados pela CASAN entre os anos de 2021 até 2023, a concentração de clorofila superficial foi compilada de acordo com a sua sigla identificadora – ID, a data referente ao dia da amostragem, coordenada do ponto de amostragem e valor concentração na unidade de medida ($\mu\text{g/L}$).

O Gráfico 2 apresenta a concentração de clorofila organizada por ponto entre os anos 2021-2023. É possível observar o encurtamento do intervalo interquartil entre os pontos de amostragem B2, B5, C3, D5, E1 e Z0 com medianas indicando concentração próximo ao valor de 5 ($\mu\text{g/L}$), com assimetria negativa devido à proximidade entre o 1º e 2º quartil, exceto para o ponto D5 que indica assimetria positiva e Z0 que aponta dispersão simétrica de valores. Ademais, é preciso destacar que esses pontos são aqueles com menor variabilidade de concentração de clorofila e tendem a apresentar valores inferiores a 5 ($\mu\text{g/L}$).

Nota-se também que pela resolução CETESB(2013), que valores de 11,03 ($\mu\text{g/L}$) indicam eutrofização. Dessa maneira, a maioria dos mantém tendencia central proxima de 5 ($\mu\text{g/L}$) ao longo dos anos, sendo essa barreira é

ultrapassada por amostra classificadas como eutróficas. No entanto, é preciso destacar os pontos H1 e LEI, apresentaram valores acima 11,03 ($\mu\text{g/L}$), sendo localizado na porção oeste da lagunas e a LEI representa a lagoa para tratamento de água.

Gráfico 2: Box-plot da concentração de clorofila por ponto de amostragem 2021-2023.



Fonte: Autor, (2025).

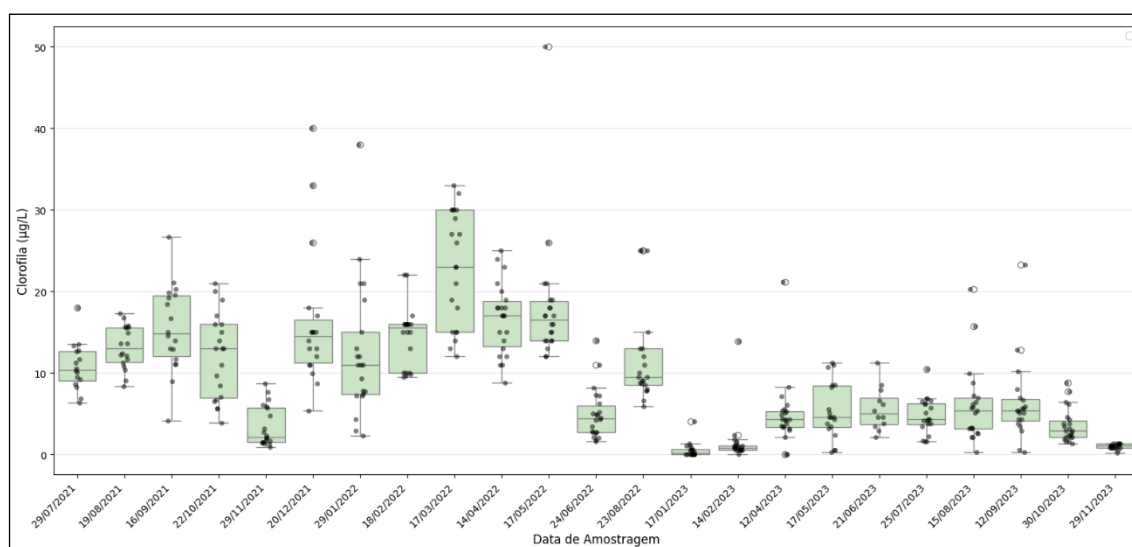
Ainda no escopo do Gráfico 2, a variabilidade apresenta valores maiores expressados no aumento do intervalo interquartil dos pontos (E2, F1, F3, F4, F5, G1, H1, H2, I1, I3, J1, J2, K1 e K2). Outra característica notada é o aumento do 3º quartil superior que por vezes ultrapassa o valor de 10 ($\mu\text{g/L}$), podendo chegar até 20 ($\mu\text{g/L}$) nestes mesmos pontos. Entretanto, é preciso destacar o comportamento de dois pontos, primeiramente o ponto I2 que não apresenta variação de intervalo, pois conta com somente um valor amostral. Outro ponto notável é o relacionado a Lagoa de Evapoinfiltração– LEI, é aquele com maior caixa e dispõe dos principais valores acima de 30 ($\mu\text{g/L}$). Além disso, o 2º quartil tende a apresentar valores próximos de 20 ($\mu\text{g/L}$), configurando a maior mediana de toda a série.

O conjunto de Box-plot do Gráfico 3, apresenta os valores de concentração de clorofila conforme a data de amostragem entre os anos de 2021 e 2023, sendo assim, cada caixa compila todos os pontos de amostragem em

apenas um mês. O ano de 2021 exibe crescente mediana até o mês de setembro para posterior diminuição de tendência central até o mês de novembro com mediana abaixo de 5 ($\mu\text{g/L}$). Além disso, entre os intervalos do 3º quartil e *whisker* superior dos meses de outubro e dezembro, valores superiores a 20 ($\mu\text{g/L}$) sinalizam amostras com estado trófico elevado.

O ano de 2022 é aquele que mostra maior heterogeneidade entre as variabilidades apresentadas em cada box-plot mensal, como a que ocorre entre os meses de maio, junho e agosto, que demonstram queda abrupta entre maio e junho e posteriormente aumento notável para agosto. No entanto, é possível observar tendências na maioria dos meses. A proximidade entre o 2º e 3º quartil indicam assimetria negativa com amostras de clorofila significativamente altas atingindo valores superiores a 30 ($\mu\text{g/L}$), esse padrão ocorre nos meses de janeiro até junho.

Gráfico 3: Box-plot da concentração de clorofila por data de amostragem 2021-2023.



Fonte: Autor, (2025).

O único mês que não acompanha essa tendência é o mês de agosto, que apresenta o efeito de dispersão inverso chamado de assimetria positiva, com a tendência concentrada na porção inferior da mediana.

O ano de 2023 expõe claramente um encurtamento do intervalo interquartil quando comparado com os anos anteriores. Do mesmo modo, esse

ano apresentou os menores valores de concentração de clorofila, com valores estáveis de mediana entre os meses de abril e outubro próximos de 5 ($\mu\text{g/L}$). Já os meses de janeiro, fevereiro e novembro são característicos por apresentar tendência central próximo do 0, referente à concentração de clorofila.

Podem ser considerados eutrofizados em 2021, os meses de julho, agosto, setembro e outubro. Esses são os meses mais próximos data de rompimento da lei que possuem registro. Em seguida 2022, a laguna apresenta aumento da concentração clorofila no início do ano, no intervalo dos meses de janeiro até maio, sendo 5 meses com valores classificados acima de 11,03 ($\mu\text{g/L}$). Totalizando, 9 de um conjunto de 23 meses indicam que Lagoa da Conceição esteve eutrofizada.

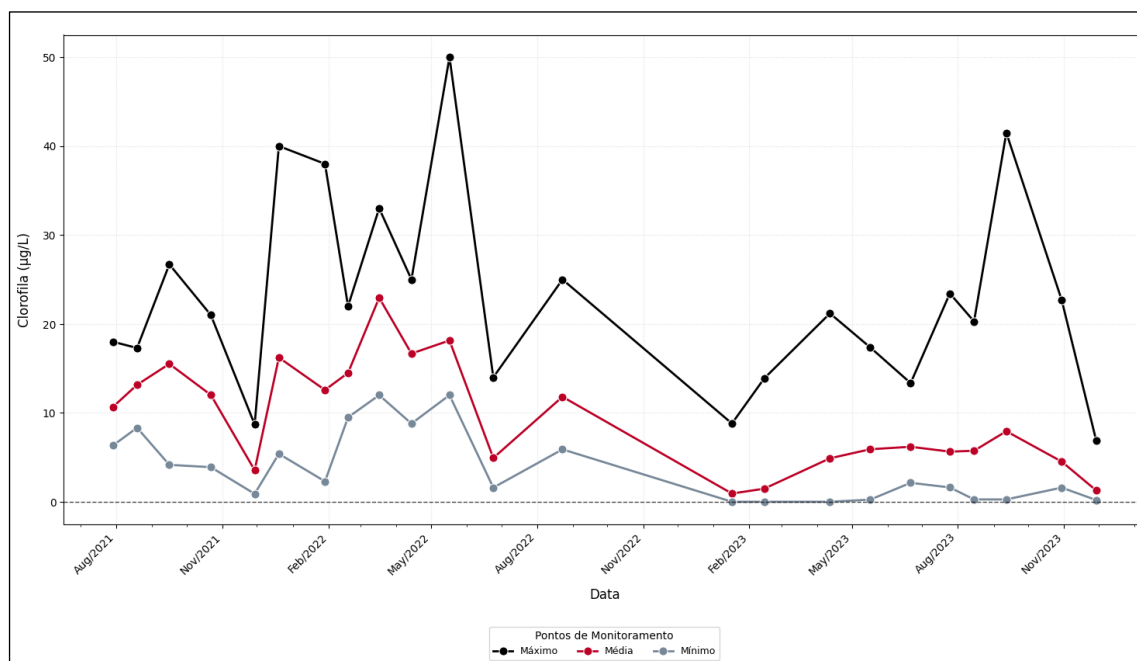
Contudo, diferente dos dois primeiros anos do conjunto de dados, o ano de 2023 esteve distante do limiar eutrofico. O ano em questão foi enquadrado como oligotrófico nos meses de janeiro, fevereiro e novembro, enquanto para os meses de abril até outubro a Lagoa da Conceição teve perfil mesotrófico. Sendo assim, o ano de 2023 exibem uma melhor substancial em termos de qualidade da água.

A alteração ao longo do tempo também é visualizada no Gráfico 4, com a adição desse tipo de gráfico, permite-se compreender a periodicidade das amostras e tendências de amplitude na forma das linhas de máximo e mínimo, juntamente com a tendência central representada pela linha da média.

O ano de 2021 revela aumento da concentração de clorofila até setembro para cair gradualmente até o mês de novembro. Esse ano revela médias acima de 10 ($\mu\text{g/L}$), exceto para novembro que apresenta concentração abaixo de 5 ($\mu\text{g/L}$).

Em 2022, é possível observar maior amplitude de valores, isto é, a diferença entre mínimo e máximo apresentou maior abrangência. Os picos de máximo são geralmente atribuídos à estação de coleta da LEI, que resulta em valores acima de 20 ($\mu\text{g/L}$), podendo alcançar até 50 ($\mu\text{g/L}$) sendo o caso do mês de maio. Os valores médios demonstram heterogeneidade, ou seja, variações drásticas entre os meses com valores próximos de 20 ($\mu\text{g/L}$) até em torno de 5 ($\mu\text{g/L}$).

Gráfico 4: Evolução da concentração clorofila entre 2021-2023.



Fonte: Autor, (2025).

A transição para o ano de 2023 possui uma lacuna de amostras, pois o ano de 2022 conta com amostras até o mês de agosto, enquanto as amostras de 2023 iniciam em janeiro. Sendo assim, a transição de clorofila entre esses anos é inexistente.

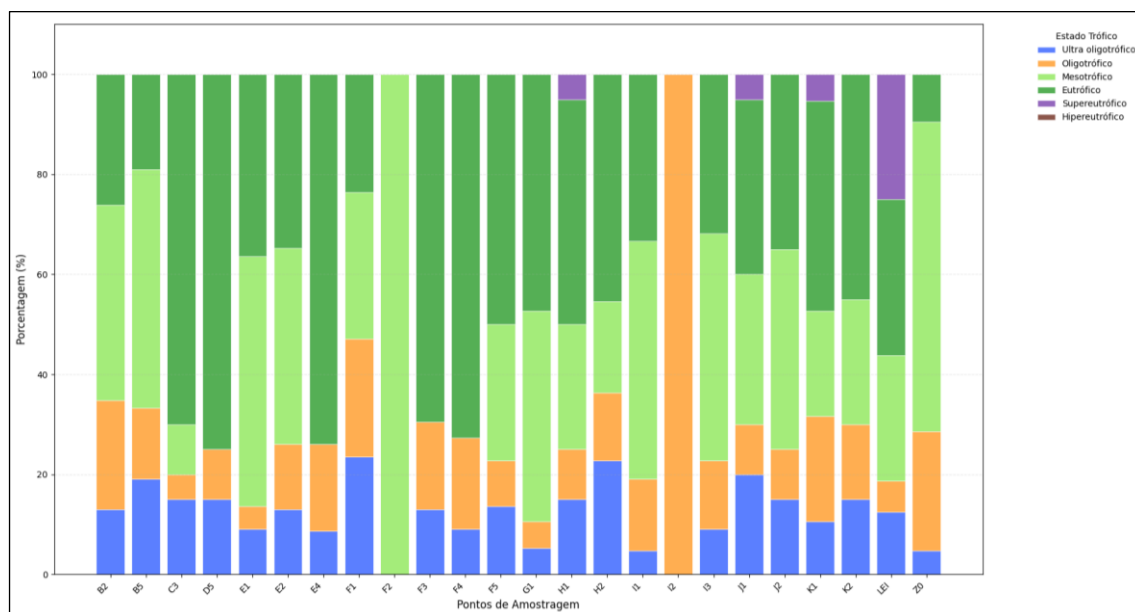
É notável que o ano de 2023 foi aquele com os menores valores de concentração, conforme mostrado nas linhas de média e mínimo desse ano. De janeiro a fevereiro a média esteve abaixo de 5 ($\mu\text{g/L}$) de abril até setembro, houve o aumento do valor médio, alcançando um valor próximo de 10 ($\mu\text{g/L}$), para posterior queda entre os meses de outubro e novembro.

De modo geral, o Gráfico 4 evidencia, o aumento da média aumento até março de 2022 e posterior queda da concentração em 2023. A tendência geral da linha que representa os valores mínimos acompanha as médias mensais, no entanto, o mesmo efeito não é observado na linha que representa os valores máximos de 2023, que mostram subidas e quedas bruscas, sinalizando heterogeneidade para esses valores de clorofila.

O Gráfico 5 demonstra a classificação da concentração de clorofila conforme o índice de estado trófico definido pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB (2013), para cada ponto de amostragem entre

2021 e 2023. A classificação de estado trófico permite compreender o grau de atividade biológica nas diferentes estações de coleta, para definir quais pontos podem ser tidos como alarmantes ou não em termos de indicadores de qualidade da água.

Gráfico 5: Classificação da concentração de clorofila por ponto de amostragem 2021-2023.



Fonte: Autor, (2025).

Primeiramente, foram destacadas as amostras classificadas como pouco eutróficas, que pertencem majoritariamente a classes como ultra oligotrófico, oligotrófico e mesotrófico. Por exemplo, os pontos B2, B5, I3, E1, E2, F1, I3 e Z0 contam com proporção dessas três classes quando somadas acima de 60%, sendo assim, são pontos amostrais que durante a maior parte do seu histórico demonstraram concentração de clorofila inferior a 11,03 ($\mu\text{g/L}$). Dentro desse grupo, ainda existem pontos que se destacam como o Z0 com 90%, B5 com 80% e F1 com 76%, essas são amostras com o menor grau de estado trófico.

Em seguida, foram selecionadas as amostras que majoritariamente fazem parte da classe eutrófica, são pontos em que essa proporção fica próxima ou ultrapassa 50%. Nesse sentido, o grupo de pontos é formado por C3, D5, E4, F3, F4, F5 e G1, que demonstram concentração de clorofila acima de 11,03

(µg/L) até 30,25 (µg/L), com destaque para os pontos C3, D5, E4 e F4 que possuem percentagem superior a 70%.

O próximo grupo enquadra especificamente os pontos H1, J1, K1 e LEI que foram classificados como supereutrófico em algum momento do seu histórico. Os pontos H1, J1 e K1 possuem aproximadamente 5% de amostras tidas como supereutróficas, já a situação da LEI revela que 25% das amostras são enquadradas nessa classe. Associada a essa classe, foi observado que os pontos com amostras supereutróficas também contam com percentagem considerável referente à classe eutrófica. Quando somadas, essas duas classes contam com números superiores a 40%.

É necessário fazer adendo a respeito dos pontos F2 e I2, pois possuem apenas uma única amostra em seu histórico, dessa forma não possuem comportamento geral para ser analisado.

Visando complementar a análise do Gráfico 5, a Tabela 7 dispõe de maneira tabulada as informações sobre concentração de clorofila em números absolutos e relativos. No entanto, é necessário fazer uma observação sobre as amostras anuais. O número de amostras entre cada ano é desigual, sendo o ano de 2021 aquele com maior número de amostras, seguindo um aumento gradual amostras até 2023. Portanto, os comparativos com números relativos precisam considerar a proporção de amostras de concentração de clorofila.

Tabela 7: Concentração de clorofila por ano 2021-2023.

	2021	(%)	2022	(%)	2023	(%)
Ultra oligotrófico	2	1,92	3	1,97	59	29,06
Oligotrófico	10	9,62	11	7,24	42	20,69
Mesotrófico	27	25,96	30	19,74	68	33,50
Eutrófico	63	60,58	104	68,42	33	16,26
Supereutrófico	2	1,92	4	2,63	1	0,49
Hipereutrófico	0	0	0	0	0	0,00
Total absoluto	104		152		203	
Total relativo		100		100		100

Fonte: Autor, (2025).

Em um primeiro momento, destaca-se os números classificados como eutrófico que entre os anos de 2021 e 2022, apresentam as respectivas percentagens de 60.58% e 68.42%, sinalizando um aumento do primeiro para o segundo ano. Todavia, o ano de 2023 mostra uma queda tanto em termos absolutos quanto relativos, apresentando que apenas 16.26% dos valores amostrados foram classificados como eutróficos.

De modo geral, houve a diminuição da concentração de clorofila em 2023 e aumento de valores em classes que representam menor concentração. Por exemplo, em 2023, as classes ultra oligotrófico e oligotrófico apresentam os seguintes valores 29.06% e 20.69%. Quando comparado com os números de 2021 e 2022, esse incremento fica claro, pois, durante esses anos ambas as classes contavam com menos de 10% de representatividade. Ainda no ano de 2023, também é possível notar o incremento na classe dos valores mesotróficos com 33,50%, sendo esse o número mais expressivo do ano. Diante do exposto, é notável que a qualidade da água melhorou de acordo com o indicador concentração de clorofila em 2023.

5.1.2 Análise espacial da concentração de clorofila

Com o propósito de analisar a distribuição espacial dos pontos de amostragem, foram elaborados mapas anuais que exibem a representação desses pontos sob a Lagoa da Conceição. Cada mapa apresenta o comportamento da concentração de clorofila conforme os meses que tiveram coleta de amostras, e visando acompanhar essa evolução, cada ponto foi classificado conforme a diretriz da CETESB (2025).

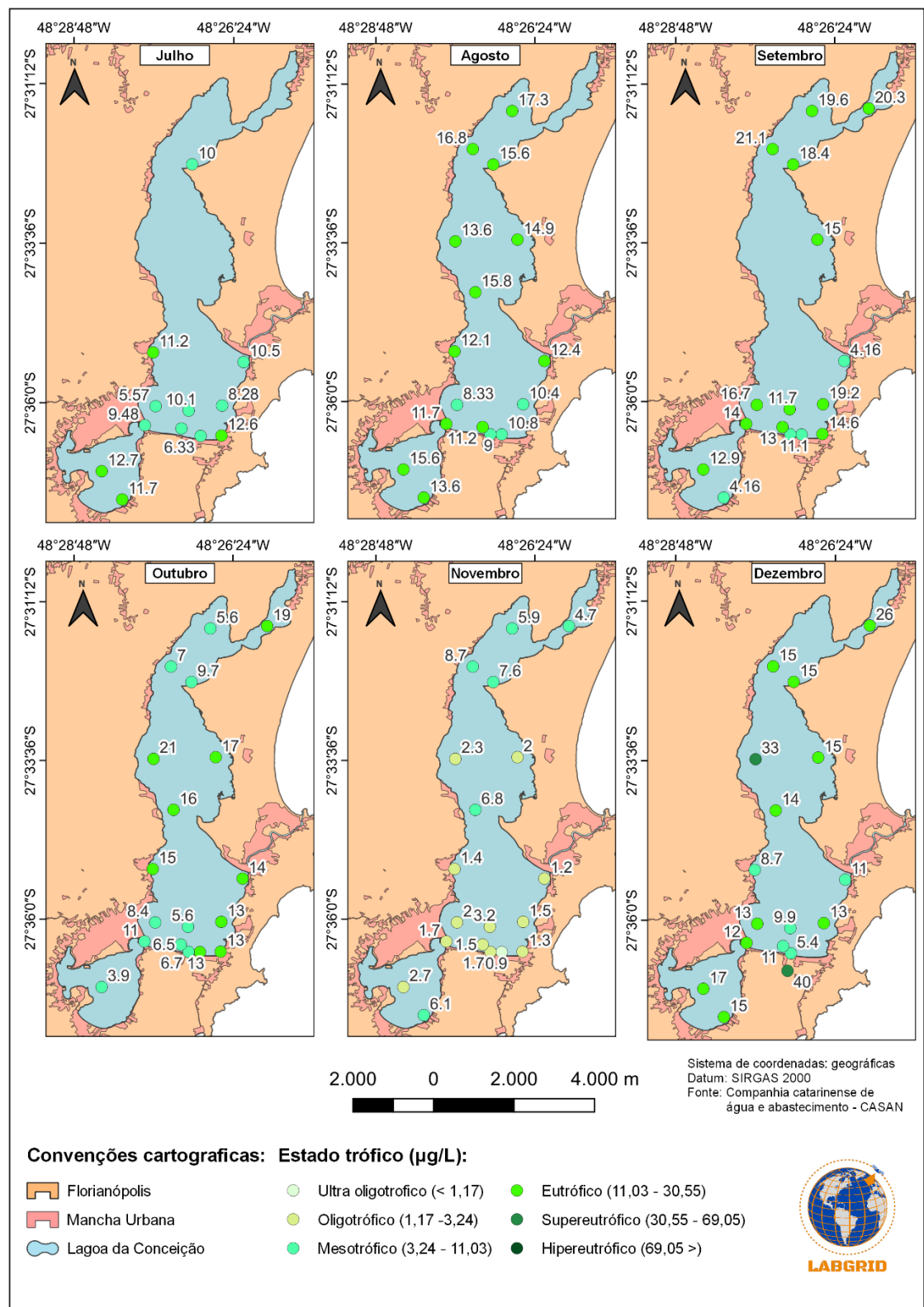
A Figura 11 dispõe de seis meses do ano de 2021. Esse mapa marca o início das amostragens feitas pela CASAN na Lagoa da Conceição. A partir das amostras de julho, é possível notar um aumento progressivo da concentração de clorofila em alguns pontos até outubro, para uma posterior queda, em novembro, e novo aumento em dezembro. O panorama da distribuição geográfica das amostras permitiu observar que na porção central laguna, próximo ao Centrinho e da Avenida das Rendeiras, foi verificada a variação entre mesotrófico e

eutrófico, com o predomínio da classe. Esse padrão apenas não se repetiu durante o mês de novembro.

A porção sul da laguna é dotada de somente 2 pontos e tais amostras recorrentemente evidenciaram concentração de clorofila do tipo eutrófica em pelo menos um dos pontos, esse comportamento se repete nos meses de julho, agosto, setembro, outubro e dezembro. A área norte da laguna adjacente ao bairro Rio Vermelho frequentemente possui amostras que pertencem às classes do mesotrófico e eutrófico, podendo alcançar até 26 ($\mu\text{g/L}$), conforme mostrado na amostra mais ao norte em dezembro.

Em suma, o ano de 2021 contém a maior parte das amostras eutróficas, principalmente nos meses de agosto, setembro e dezembro. As amostras classificadas como eutróficas eventualmente alternaram para mesotróficas, esse padrão tende a ser para todos os meses, exceto no mês de novembro que mostrou uma queda drástica em todos os pontos.

Figura 11: Mapa de classificação da concentração de clorofila por ponto de amostragem em 2021.



Fonte: Autor, (2025).

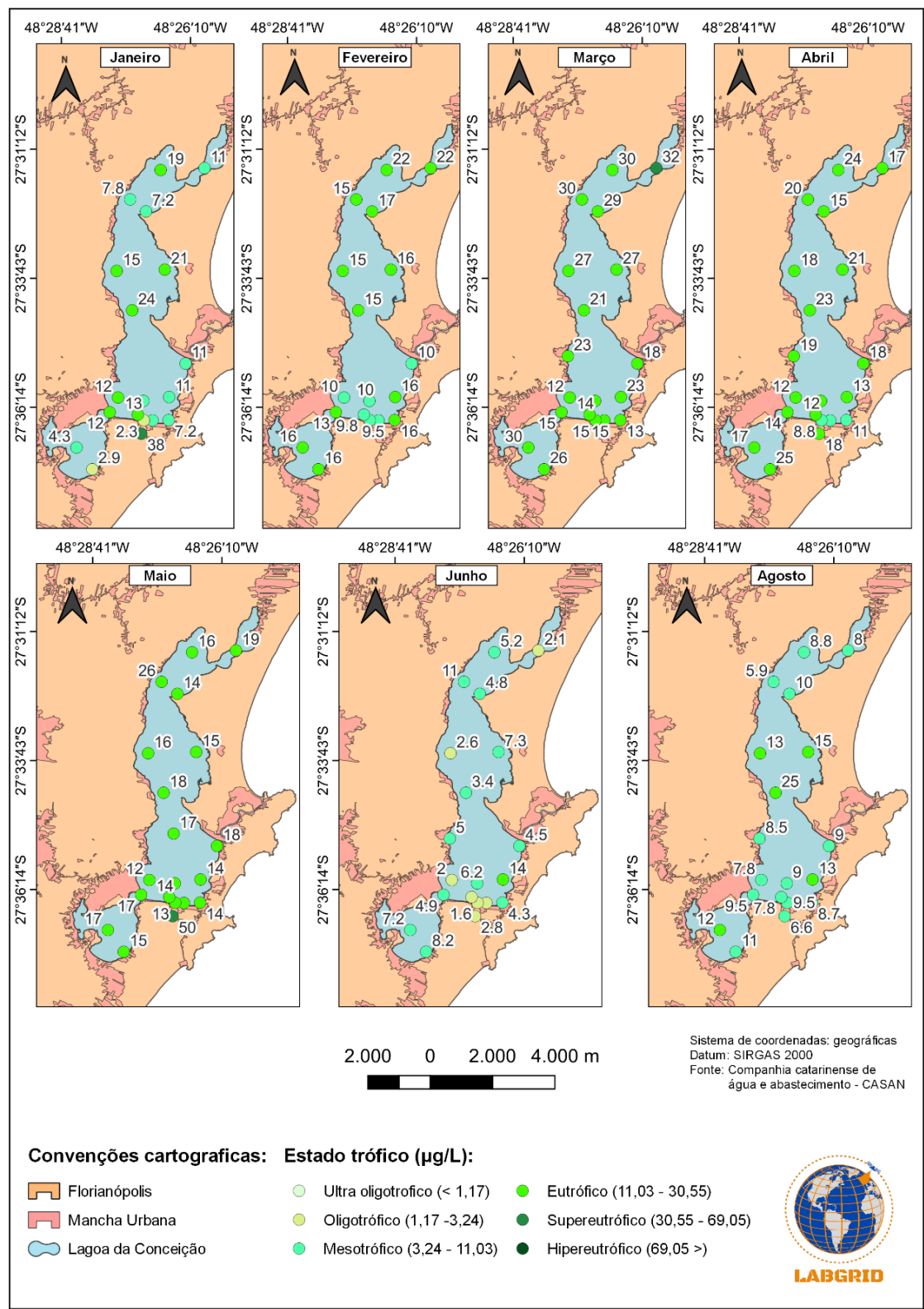
Em 2022 houve coleta em sete meses. Neste ano, é perceptível o aumento dos pontos de amostragem, quando comparado com a Figura 12 anterior, mas também o aumento de amostra no considerado eutrófico. Tal informação é corroborada pela Tabela 7, ao ponto de alcançar 68,42% em 2022, o que indica predomínio de amostras eutrofizadas.

Os dois primeiros meses de 2022 alternam entre amostras do tipo mesotrófico, eutrófico e em alguns casos, até oligotrófico como observado em áreas próximas ao Centrinho da Lagoa e no Sul da Lagoa. Posteriormente, os meses março, abril e maio mostram predominância de amostras eutrofizadas, principalmente nos meses março e maio, que não possuem amostras com concentração inferior a 11,03 ($\mu\text{g/L}$). Também é preciso destacar que esses dois meses são os únicos que possuem amostras do tipo supertróficas com concentração superior a 33,55 ($\mu\text{g/L}$). Essas amostras estão localizadas no extremo norte da laguna, próximo ao bairro Rio Vermelho e na LEI que fica nas proximidades da Avenida das Rendeiras.

Já os meses de junho e agosto exibem queda na concentração de clorofila quando comparados com meses anteriores, chegando a alcançar valores mínimos como 1.6 ($\mu\text{g/L}$) associados ao oligotrófico. Os valores com menor concentração tendem a estar agrupados próximo da Avenida das Rendeiras, como evidenciado em junho. Mês que agosto seja enquadrado como um mês com amostra predominantemente mesotrófica, é possível observar um aumento se comparado com o mês anterior, o ponto Z0 que mostrou concentração de 1.6 ($\mu\text{g/L}$) agora exibe 9.5 ($\mu\text{g/L}$).

Existem múltiplos fatores que interferem na concentração de clorofila, como proximidade dos assentamentos urbanos, presença de macrófitas emergentes ou submersas, precipitação e profundidade. De acordo com as observações feitas usando a Figura 10, que classifica as curvas batimétricas da Lagoa Conceição, foi notado que pontos localizados em áreas tidas como rasas ou pouco profundas tendem a apresentar concentração de clorofila maior. E pontos profundos, ou seja, com menor coluna de água, tendem a mostrar valores menores de clorofila.

Figura 12: Classificação da concentração de clorofila por ponto de amostragem em 2022.



Fonte: Autor, (2025).

No entanto, existem exceções, como o ponto que representa a Lagoa de Evapoinfiltração — LEI da CASAN, sendo um sistema que recebe esgoto para tratamento. Consequentemente, devido à alta presença de matéria orgânica em suspensão na água, tende a promover uma alta concentração de clorofila, como no caso dos meses de janeiro, e maior que a classificação alcançou nível supereutrófico.

O mapa da Figura 13, de 2023 é aquele com maior cobertura de amostragem, totalizando 10 meses de levantamento *in situ*. Consequentemente é possível identificar nitidamente as mudanças graduais da concentração de clorofila nesse ano. Em um primeiro momento, ficam evidentes as mudanças quanto à classificação da clorofila devido ao predomínio dos estados tróficos: ultra oligotrófico, oligotrófico e mesotrófico. Essa mudança é corroborada pela Tabela 7, que respectivamente atribui a cada estado os valores de 29.06%, 20.39% e 33.50%, quando somados chegam a 82.95%.

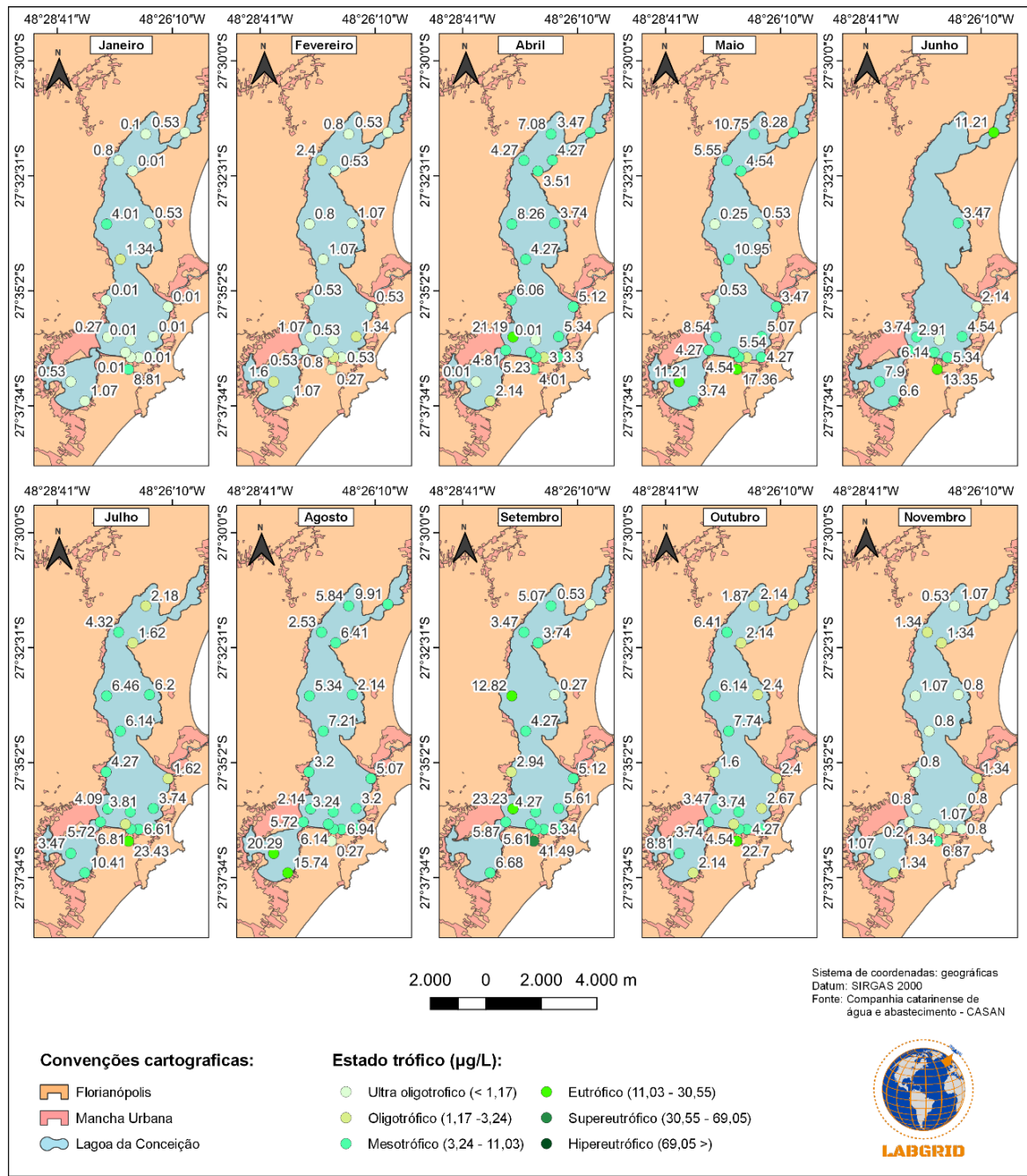
Portanto, no ano de 2023 há o predomínio de classes que indicam concentração em patamares saudáveis para a vida aquática. Ademais, a partir de uma observação detalhada, é possível notar a semelhança entre alguns meses, tal como os meses de janeiro e fevereiro, que marcam o início do ano com números inferiores a 1,17 ($\mu\text{g/L}$). Os próximos meses têm como particularidade o aumento da concentração de clorofila, são eles os meses de abril até setembro, pois exibem com frequência amostras oligotróficas e esporadicamente amostras eutróficas localizadas no Sul da laguna, no extremo norte próximo à foz do rio João Gualberto e LEI.

Já os dois últimos meses revelam queda nos valores de concentração de clorofila, por exemplo, o mês de outubro representa a transição para concentração inferior a 3,24 ($\mu\text{g/L}$), com parte das amostras classificadas como mesotróficas e outra como oligotrófica. Logo, o mês de novembro mostra de maneira significativa essa mudança, em que amostras mesotróficas foram transformadas em oligotróficas, e a outra parte anteriormente oligotrófica foi modificada para ultra oligotrófica.

Em poucos casos foram registrados pontos com o estado trófico eutrófico, com somente 16,26% de ocorrência em 2023. Em raros casos houve o registro

de ponto supereutrófico, com apenas um caso no mês de setembro contendo a amostra da LEI de 41,49 ($\mu\text{g/L}$).

Figura 13: Classificação da concentração de clorofila por ponto de amostragem em 2023.



Fonte: Autor, (2025).

Mirando compreender o comportamento habitual da concentração de clorofila em cada ano, juntamente com recortes batimétricos, a Figura 12 foi construída. O método usado para filtrar e selecionar o comportamento habitual

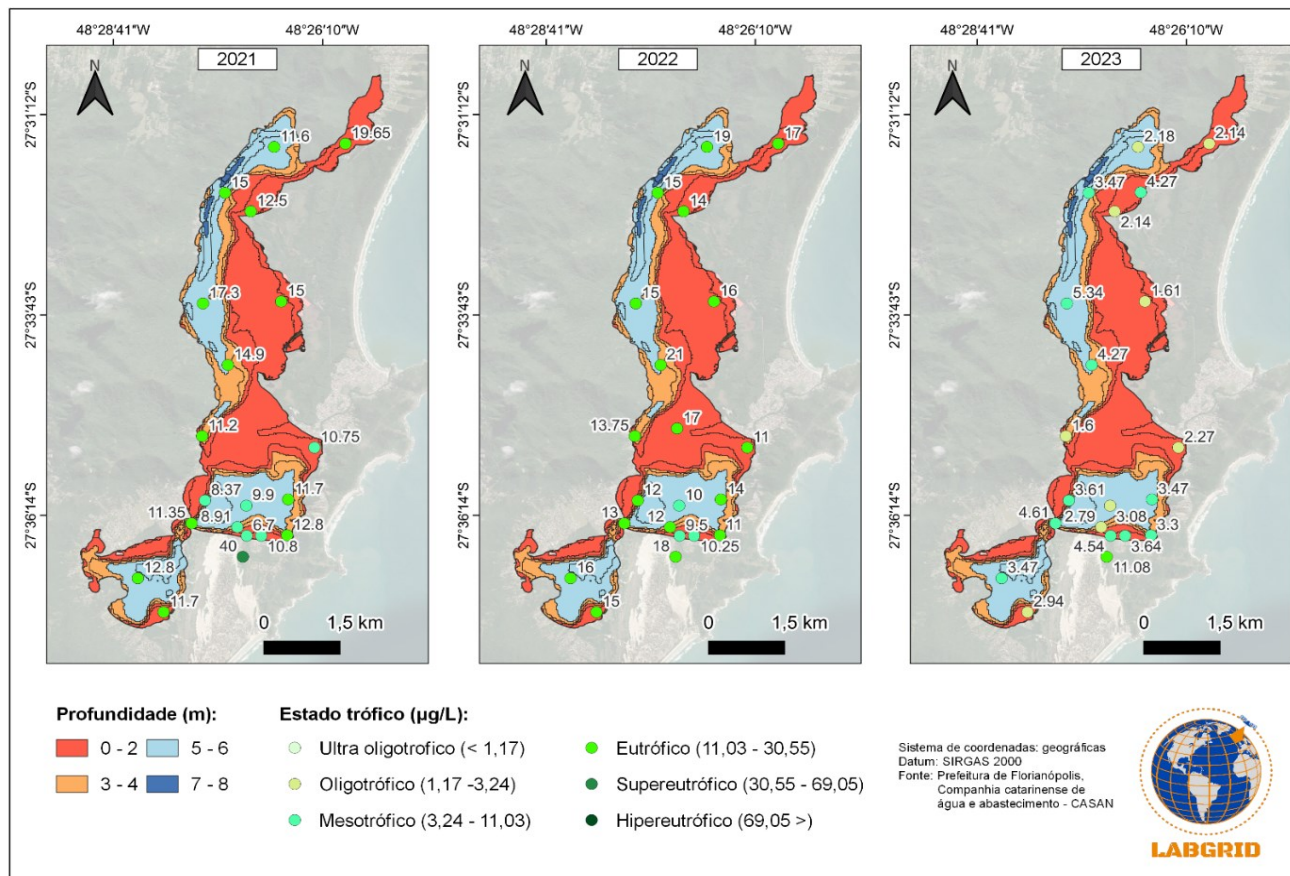
foi a mediana, aplicada em todos os pontos de amostragem de 2021 até 2023. A opção pela mediana como métrica de tendência central deve-se ao fato de que a mediana é uma propriedade robusta não influenciada por valores extremos.

A Figura 14 mostra, de modo geral, o comportamento da concentração de clorofila em cada ano. O ano de 2021 tem como predomínio o estado eutrófico, com alguns casos classificados como mesotrófico. Ao comparar os recortes de profundidade, pontos localizados em profundidades menores tendem a exibir concentração de clorofila maior, no entanto, a profundidade não é um fator determinístico que influencia a concentração de clorofila, pois existem fatores como precipitação, dutos irregulares que despejam esgoto, florescimento de macrófitas e direção dos ventos. Ainda em 2021, os pontos enquadrados como mesotróficos estão localizados próximo ao Centrinho da Lagoa e Avenida das Rendeiras. Outro padrão notado é que a porção leste demonstrou maiores valores de concentração de clorofila na maioria dos casos.

No ano de 2022, pontos classificados como eutróficos foram mais frequentes se comparado com o ano anterior, e quanto àqueles que já eram eutróficos no ano de 2021, em 2022 aumentaram a concentração de clorofila na maioria dos casos. De maneira geral, em 2022 houve o aumento da concentração de clorofila, com uma maior proporção de pontos eutróficos. No caso das amostras localizadas próximo do Centrinho da Lagoa e da Avenida das Rendeiras, mostraram aumento no valor de clorofila, e em algumas até mesmo a mudança de classificação de mesotrófico para eutrófico. Em contraste com os anos anteriores, o ano de 2023 mostra melhora em termos de qualidade da água devido à diminuição da concentração de clorofila. Anteriormente, pontos classificados como eutróficos em 2023 passaram a ser classificados como mesotróficos e oligotróficos.

Até mesmo os pontos localizados em profundidade menores sofreram diminuição, como no caso do ponto J1 localizado ao norte, próximo à foz do rio João Gualberto e ao bairro São João do Rio Vermelho. Também ocorreu diminuição no agrupamento de pontos próximos ao Centrinho da Lagoa para o estado trófico mesotrófico.

Figura 14: Mapa de Classificação da mediana da concentração de clorofila entre 2021-2023.



Fonte: Autor, (2025).

5.2 Análise do NDCI

5.2.1 Análise temporal do NDCI

Visando analisar graficamente as variações do NDCI construídos a partir das coleções de imagens do Sentinel-2 entre os anos de 2021 até 2024, os resultados foram reunidos em gráficos Box-plot e gráficos de linhas feitos na plataforma Google Colabs

Em primeiro lugar, as 21 coordenadas disponibilizadas pela CASAN foram transportadas para o Google Earth Engine e usadas para extrair o valor do NDCI. Para viabilizar a coleta de valores, foram criados 4 *scripts*. No que se refere aos valores extraídos a partir das 4000 amostras aleatórias, foram criados outros 4 *scripts* para extração do NDCI.

O primeiro conjunto de gráficos a ser discutido são aqueles construídos a partir das coordenadas da CASAN. O Gráfico 6 exibe a distribuição do NDCI em 2021. De modo geral, a tendência central dos dados indicada pela mediana atinge valores de NDCI abaixo de 0,1 e acima de -0,1. Ainda sobre esse gráfico, é evidente a concentração de pontos no intervalo de -0,1 até -0,5 que correspondem aos seguintes sítios de amostragem (B2, C3, D5, E1, E2, E4, F5, G1, H1, I1, J2). Também cabe adicionar que esses são pontos localizados em profundidades entre 3 até 6 metros.

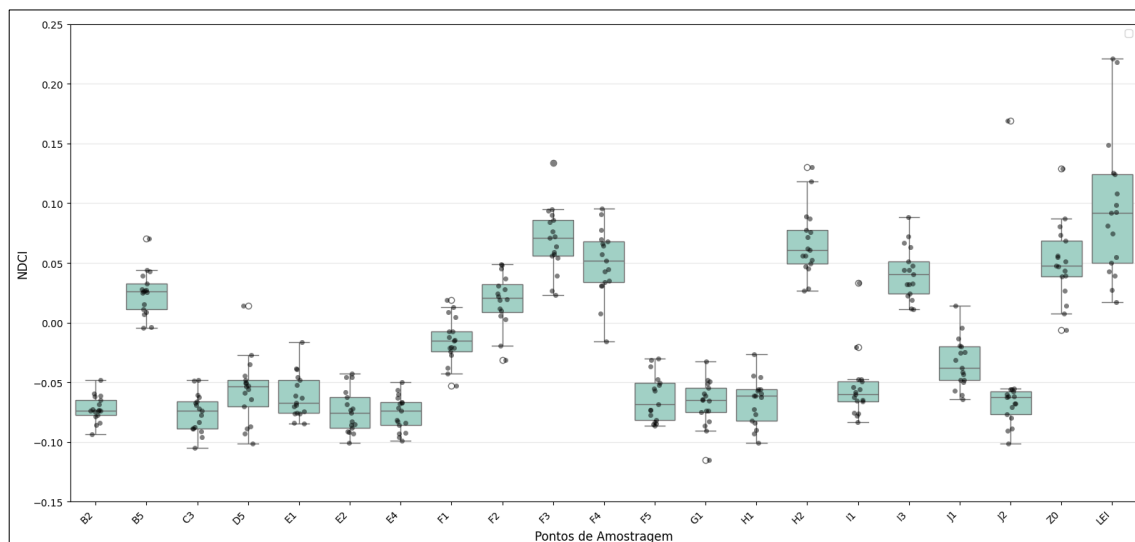
O segundo grupo de pontos de 2021 (B5, F1, F3, F4, H2, I3, Z0, LEI), encontra-se em intervalo próximo de 0 até 0,1 de NDCI. Esse grupo de coordenadas, tende a estar localizado em zonas batimétricas com até 2 metros de profundidade, sendo essas as porções rasas da Lagoa da Conceição.

Em suma, o ano de 2021 conforme o Gráfico 6, apresentou a maior variabilidade de intervalo interquartil. Além disso, esse foi o ano que atingiu os principais valores de NDCI, ultrapassando em casos o valor 0,1 e, no caso da LEI chegando até acima de 0,2. Devido aos fatores descritos acima, o ano de 2021 teve destaque quando comparado com os próximos anos que demonstram constante homogeneidade.

Os anos de 2022, 2023 e 2024, representados pelos Gráfico 7, 8 e 9 contém diversas características semelhantes. A primeira é que a partir de 2022 houve um achatamento generalizado no intervalo interquartil de todos os pontos, ou seja, a variabilidade se tornou mais concentrada nesses anos. Porém, a formação dos grupos de acordo com os intervalos de NDCI foi mantida, por exemplo, entre 0.5 e 0 foram enquadrados os pontos de amostragem (B2, C3, D5, E1, E2, E4, F5, G1, H1, I1, J2).

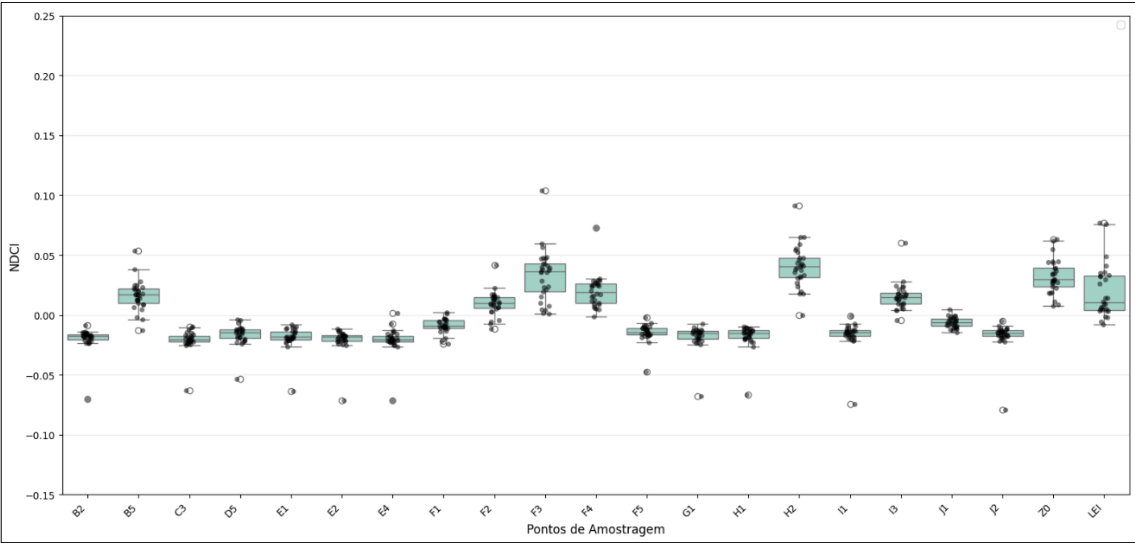
Sob um critério de classificação conforme estipulado por Lobo et al (2021), valores de NDCI dentro intervalo -0,10 até 0 são tidos como eutróficos. Desse modo, todos de 2021 correspondem a esta classificação.

Gráfico 6: Box-plot do NDCI por ponto de amostragem 2021.



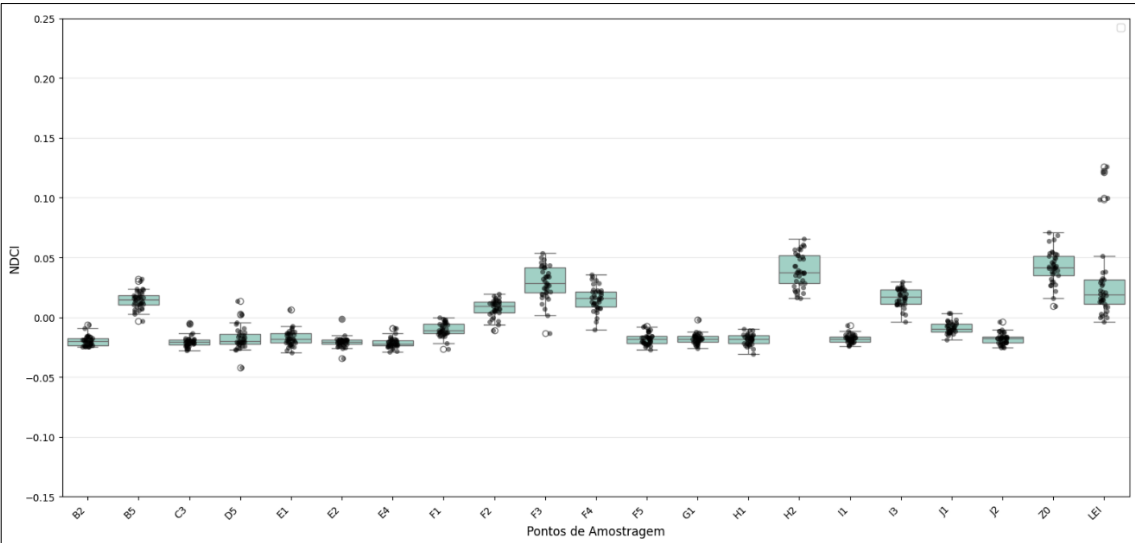
Fonte: Autor, (2025).

Gráfico 7: Box-plot do NDCI por ponto de amostragem 2022.



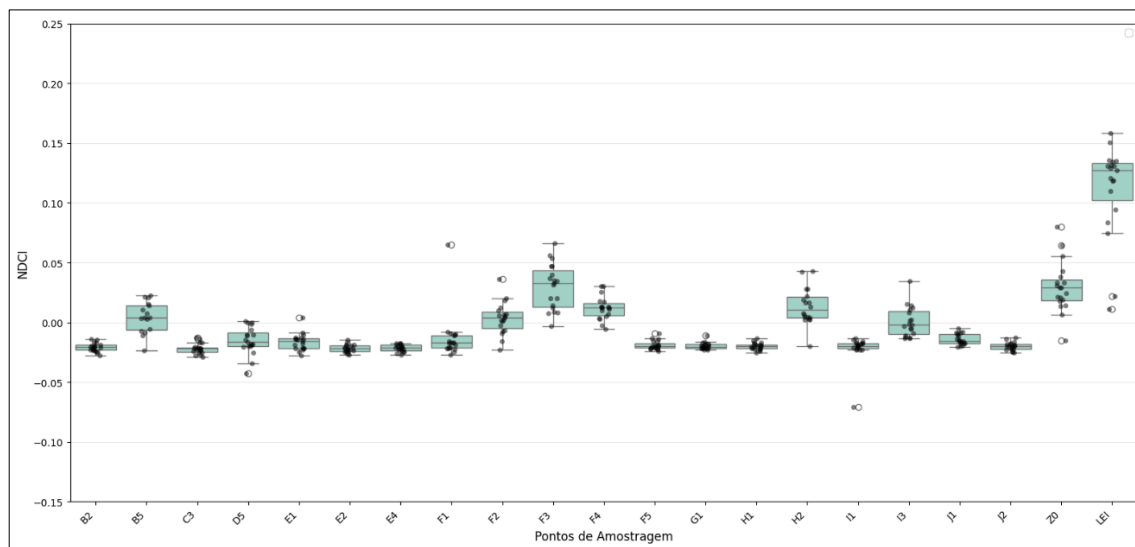
Fonte: Autor, (2025).

Gráfico 8: Box-plot do NDCI por ponto de amostragem 2023.



Fonte: Autor, (2025).

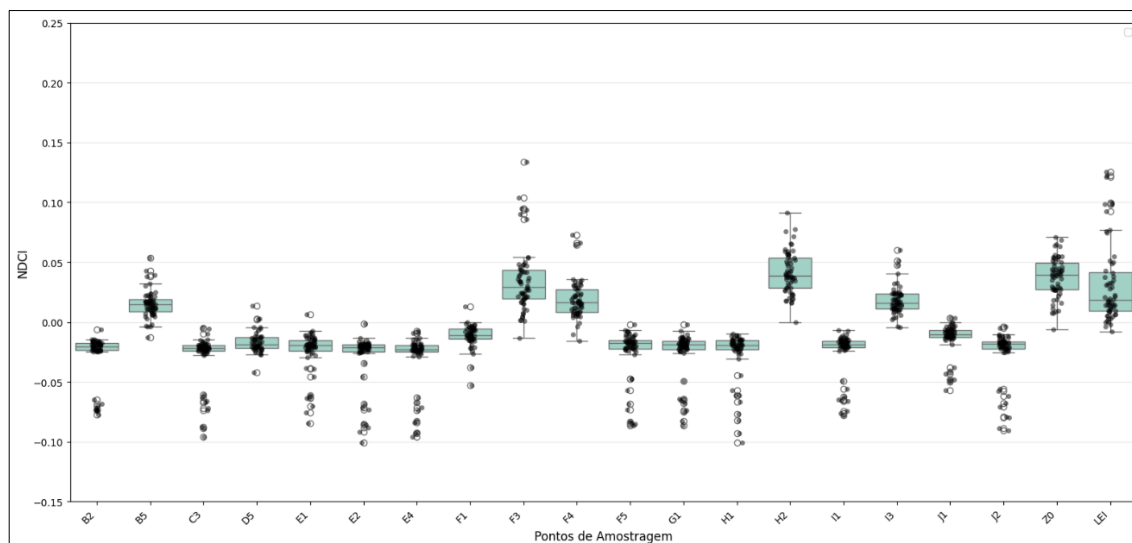
Gráfico 9: Box-plot do NDCI por ponto de amostragem 2024.



Fonte: Autor, (2025).

O Gráfico 10 exibe todos os pontos de amostragem compilados entre os anos de 2021 até 2024. Sendo assim, foi possível perceber que a forma geral foi mantida, isto é, que o grupo que contém pontos em zonas rasas como no caso da amostra (B5, F1, F3, F4, H2, I3, Z0, LEI) e o grupo de pontos localizados em zonas tidas como profundas (B2, C3, D5, E1, E2, E4, F5, G1, H1, I1, J2), foram mantidos nesse gráfico.

Gráfico 10: Box-plot do NDCI por ponto de amostragem compilado de 2020-2024.



Fonte: Autor, (2025).

No entanto, convém observar que o ano de 2021 também tende a acompanhar esse padrão de maneira alternativa, na forma de valores *outliers*. Ao observar as tendências centrais (medianas) e os intervalos interquartis de 2021, foi possível perceber que eles foram transportados *outliers* dos gráficos, seja para valores acima do *whisker* superior ou abaixo do *whisker* inferior. Esse fato reforça a hipótese de que o ano de 2021 foi atípico na sua variabilidade, e que os anos posteriores concentraram os valores de NDCI de acordo com o encolhimento das caixas.

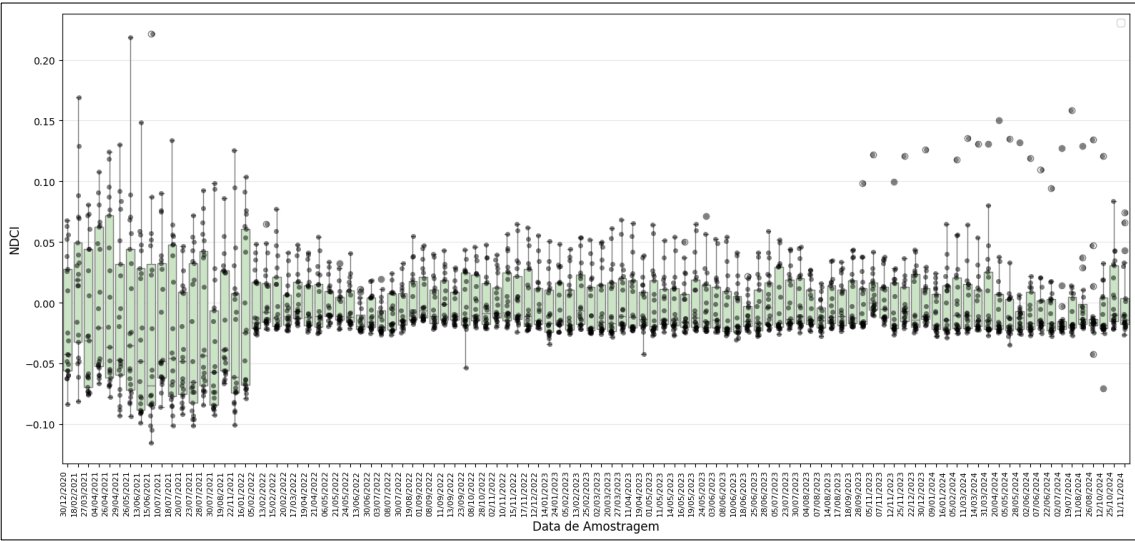
Também cabe destacar, que além do padrão de aumento e diminuição entre os pontos ser mantido em todos os anos. A classificação eutrófica também foi algo mantido com passar dos anos, e seguiu sendo mantida com aumento tendência central (media e mediana). No entanto, tal afirmativa somente pode ser corroborada, por uma análise de correlação a partir das amostras in situ.

Visando compreender a variabilidade do NDCI ao longo do tempo, motivou a projeção da série de *box-plots* no próximo gráfico. O Gráfico 11 abaixo, reúne o box-plot dos valores do NDCI no formato por data amostra, isso significa que cada caixa reúne todos os pontos da CASAN referentes a uma única data. Fica evidente que o ano de 2021, até a data de 16 de janeiro de 2022, mantém um padrão de grande amplitude nos intervalos interquartis. Porém, o restante do

ano de 2022 até 11 de novembro de 2024 demonstrou um encurtamento repentino das caixas. Ao comparar com os gráficos organizados por pontos de amostragem acima, com o Gráfico 10 por data de amostragem, o padrão de encurtamento das caixas a partir de 2022 se repete nos dois casos.

No caso do Gráfico 11, o primeiro quartil até 16 de janeiro de 2022, alcançava valores entre -0,1 até -0,05. Depois dessa data até 11 de novembro de 2024, o primeiro quartil alcançou um platô próximo ao 0 de NDCI. No entanto, surge a suspeita de que o número e a distribuição de amostras CASAN não sejam suficientes para representar a distribuição de NDCI da Lagoa da Conceição, ou que exista uma condição sistemática nas imagens a partir de 2022. Consequentemente, com o objetivo de verificar a idoneidade de uma dessas hipóteses, o próximo conjunto de gráficos foi criado.

Gráfico 11: Box-plot do NDCI por data de amostragem 2020-2024.



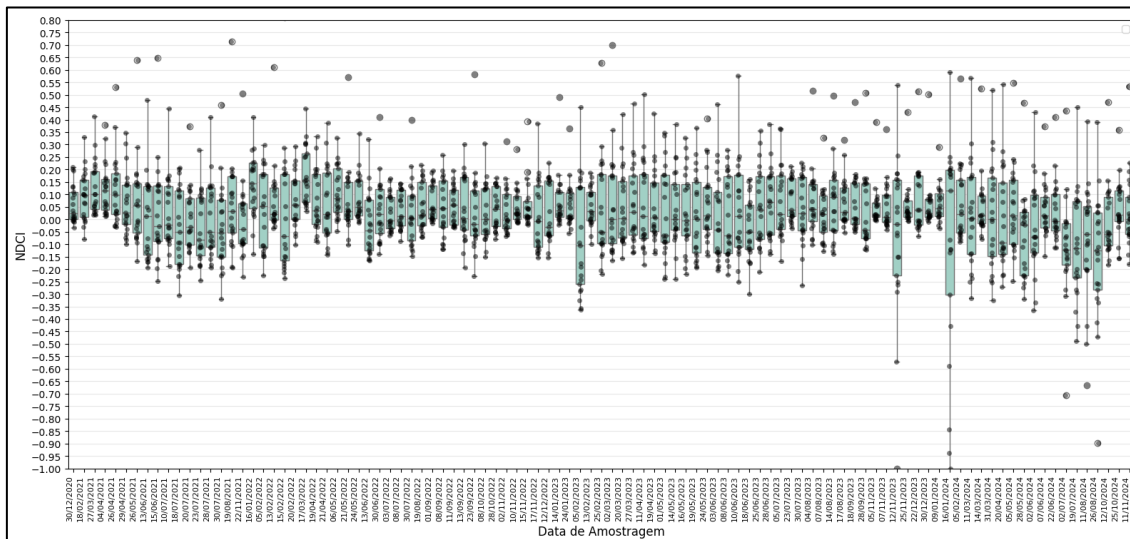
Fonte: Autor, (2025).

O gráfico 12 foi construído com amostras advindas do nível SR e apresenta um comportamento diferente do exibido no gráfico anterior. No início, a variabilidade foi reduzida nos primeiros meses de 2021 e assim seguiu até 12 de novembro de 2023, mostrando aumento a partir dessa data em algumas cenas.

De modo geral, o achatamento do intervalo interquartil desapareceu do conjunto de dados *Surface Reflectance*, indicando que tal comportamento compõe apenas o NDCI com imagens do nível TOA. No entanto, é destacar

algumas semelhanças: o intervalo de variação de mediana entre 0.05 ou -0.05 permaneceu na maioria das datas.

Gráfico 12: Box Plot NDCI (Suface Reflectance) por data de amostragem 2020-2024.



Fonte: Autor, (2025).

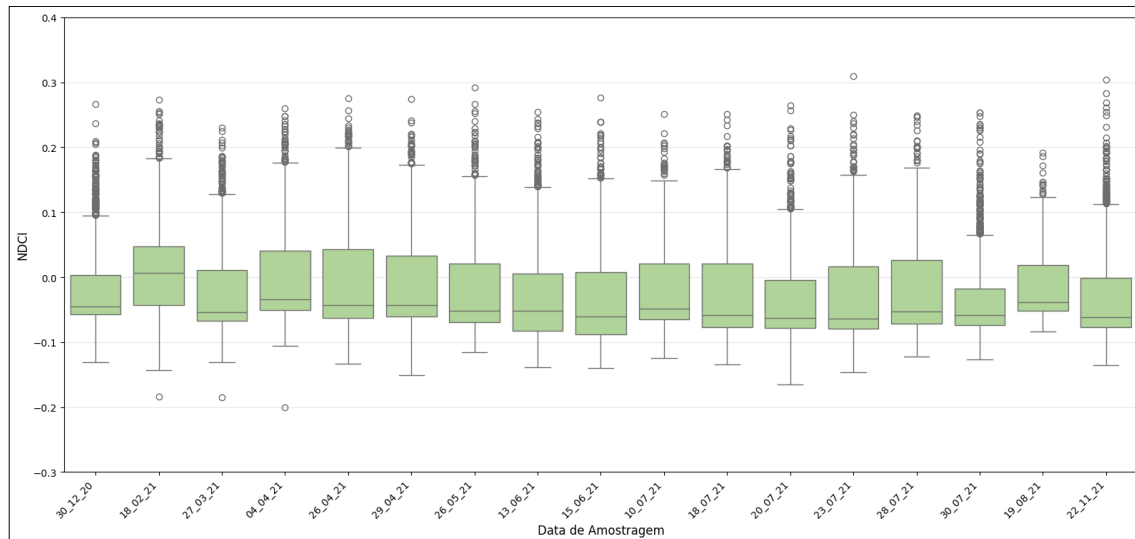
Para prosseguir com a análise, antes é necessário trazer informações complementares. A primeira delas é que o número de amostras foi definido de acordo com a Equação 7, que define o número de amostras em uma população finita. A outra informação é que, nesse contexto, a estatística amostral foi escolhida como uma forma de superar a limitação computacional, pois os *softwares* e plataformas como *Google Earth Engine*, Excel e *Google Colabs* demonstraram complicações para processar arquivos com mais de 4000 amostras por imagem.

A próxima série de gráficos consiste na apresentação da distribuição do NDCI, por meio de 4000 pontos sob Lagoa da Conceição. Essas 4000 coordenadas foram distribuídas com o propósito de reduzir o viés de seleção das amostras e testar se o fenômeno de concentração dos valores de NDCI está relacionado com a localização dos pontos da CASAN ou se é exclusivamente relacionado às imagens.

O Gráfico 13 exhibe os valores do NDCI em 2021 com tendência central próximo de 0, variando entre $-0,1$ e $0,1$ com assimetria positiva na maioria dos casos devido à proximidade do 1º e 2º quartil. Esse comportamento indica a

concentração de valores menores que 0 para esse ano. Outro padrão é que os *whiskers* superiores são os mais alongados, isso acontece em razão dos *outliers* que alcançam valores entre 0.2 e em alguns casos 0.3.

Gráfico 13: Box-plot do NDCI por data de amostragem aleatória 2021.

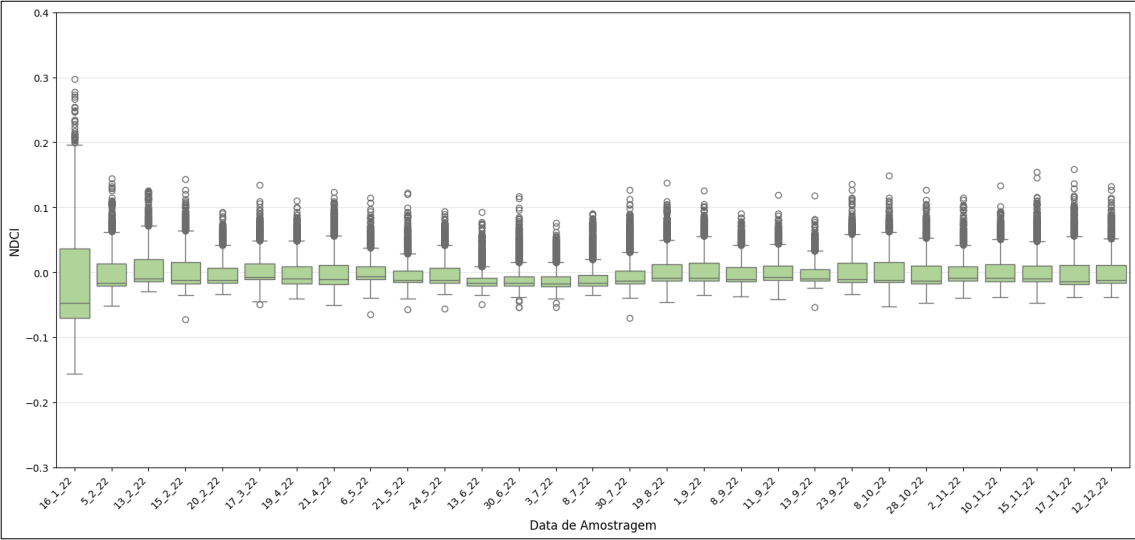


Fonte: Autor, (2025).

Por outro lado, o Gráfico 14 de 2022 mostra comportamento diferente, torna-se notável que, depois da data 16 de janeiro de 2022, houve um encurtamento generalizado dos intervalos interquartis. Esse mesmo efeito de redução da variabilidade, que se reflete no encolhimento das caixas, foi notado nos anos de 2023 e 2024 conforme os Gráficos 15 e 16.

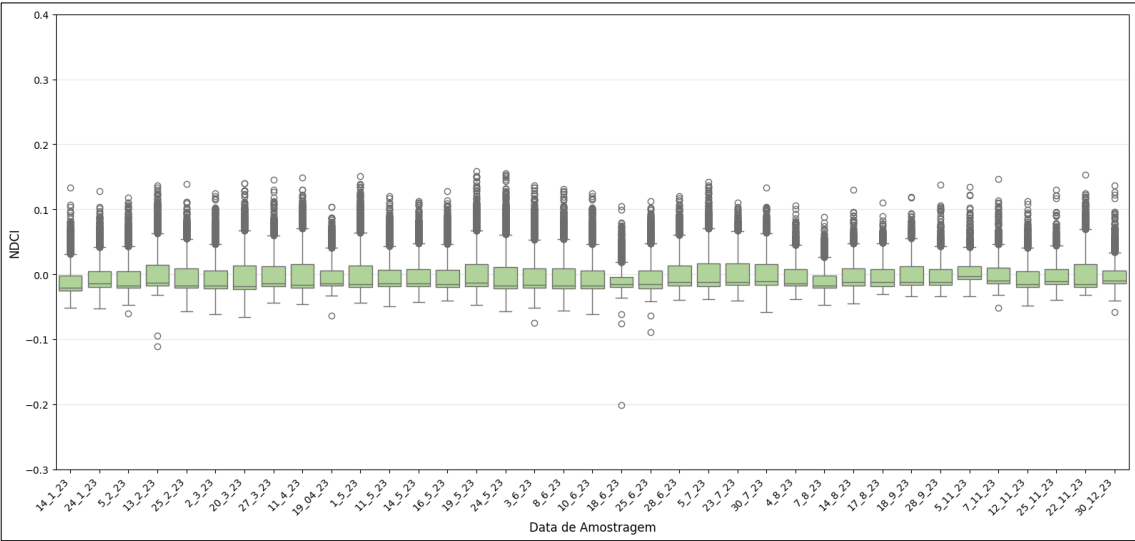
Isso comprova a hipótese de que são imagens a partir do ano de 2022, estão apresentando um deslocamento para valores próximos de 0. Tal tendência tornou-se clara por causa da elevação das medianas e dos valores do 1º quartil. Sendo assim, existe uma causa sistemática que altera os valores do NDCI em todas essas imagens até 2024.

Gráfico 14: Box-plot do NDCI por data de amostragem aleatória 2022.



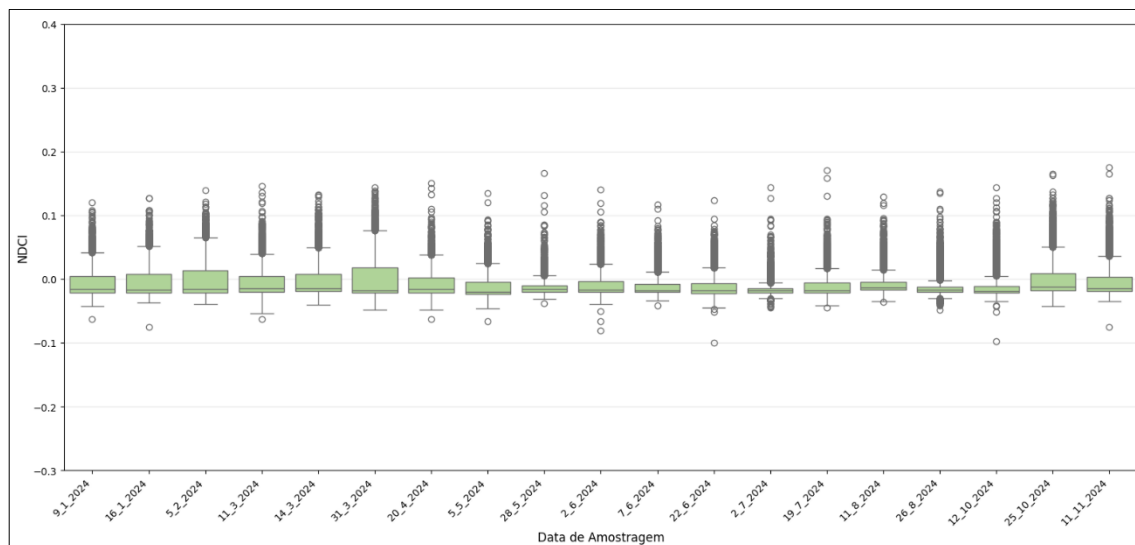
Fonte: Autor, (2025).

Gráfico 15: Box-plot do NDCI por data de amostragem aleatória 2023.



Fonte: Autor, (2025).

Gráfico 16: Box-plot do NDCI por data de amostragem aleatória 2024.

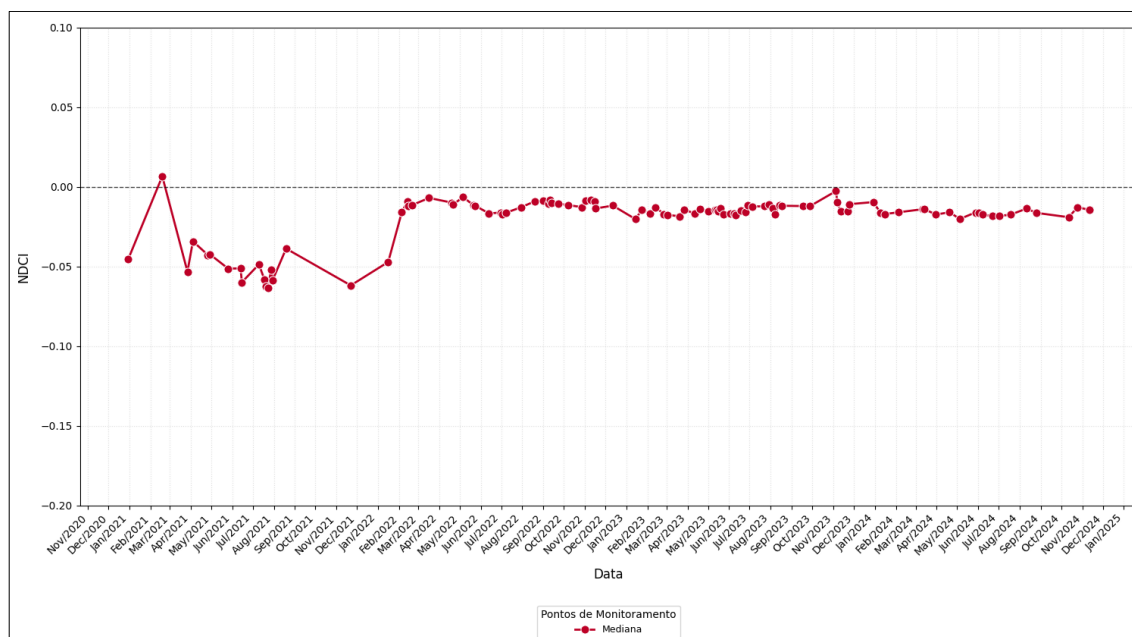


Fonte: Autor, (2025).

Essa alteração na tendência central fica mais visível no Gráfico 17, que exibe apenas a variação da mediana projetada no tempo. O padrão de instabilidade é visível até a data de 16 de janeiro de 2021, depois é seguido de um aumento nos valores de mediana com ligeiras variações, demonstrando estabilidade frequente até 2024.

Não foi encontrada a causa dessa alteração sistemática junto às informações disponibilizadas pela ESA, seja no manual do usuário ESA (2017), ou nos *pathc* de atualização da missão disponíveis no site *SentiWiki Home* (<https://sentiwiki.copernicus.eu/web/document-library#Library-S2-Documents>). Até a presente atualização, a causa dessa alteração é desconhecida.

Gráfico 17: Evolução da mediana do NDCI por amostragem aleatória 2020-2024.



Fonte: Autor, (2025).

5.2.2 Análise espacial do NDCI

Objetivando analisar espacialmente as variações do NDCI a partir de imagens do Sentinel-2 entre os anos 2021 até 2024, cada mapa reuniu 4 cenas em diferentes meses do ano para representar a variação do índice espectral referente à estação do ano.

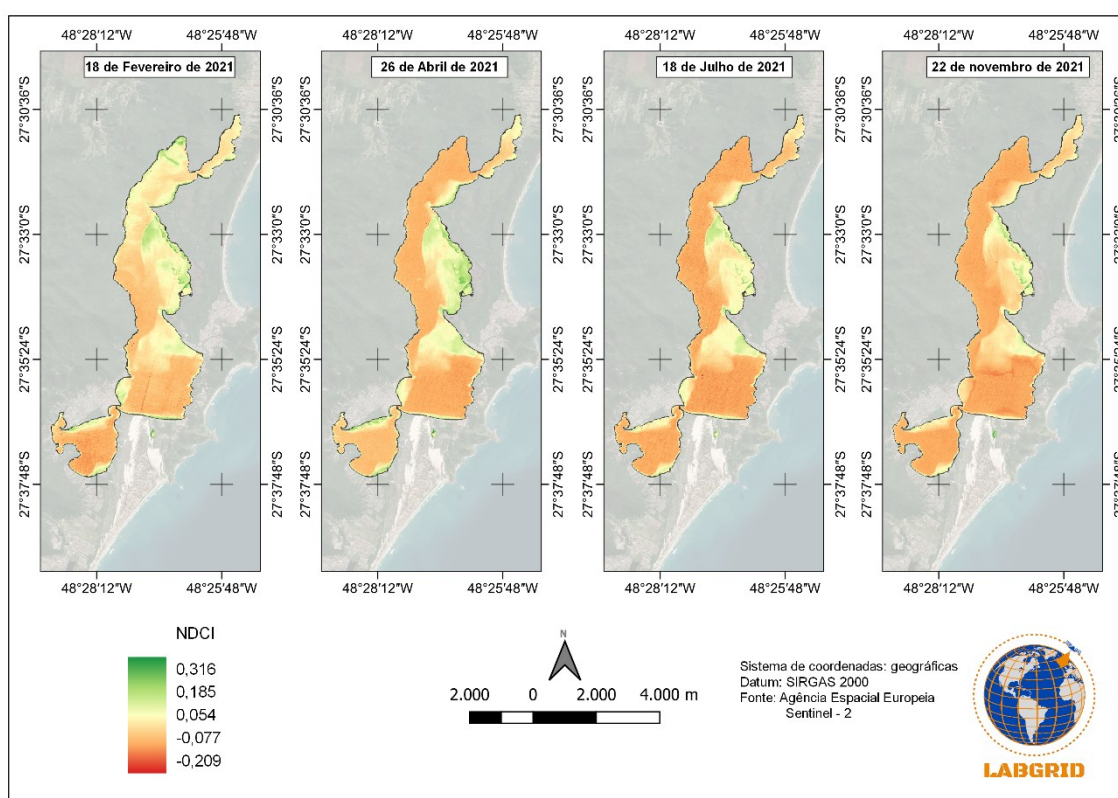
A princípio as imagens do satélite Sentinel-2 foram obtidas na plataforma GEE, e passaram pelo processo de aplicação do índice espectral para posteriormente serem usadas no *software* Qgis para construção dos mapas.

A Figura 15 apresenta a série de imagens de satélite do ano de 2021, ela exibe a variação espacial do NDCI, a começar pela data de 18 de fevereiro de 2021, que representa o verão deste ano. Tal data mostrou maior espacialização de valores altos de NDCI variando de 0,054 até 0,316, representados pelos tons de verde. Também é válido ressaltar que a referida data de 18 de fevereiro de 2021 é a data mais próxima do evento de rompimento da Lagoa de Evapotranspiração ocorrido em 25 de janeiro de 2021, indicando que o aumento do NDCI na laguna está relacionado com o evento de janeiro.

As posteriores estações do ano, representadas pelas datas 26 de abril, 18 de julho e 22 de novembro exibem diminuição gradual das manchas em verde, que indicam valores elevados de índice. Sendo assim, as imagens de satélite posteriores ao rompimento da LEI indicam que os valores NDCI diminuem à medida que a data da cena se distancia da data do evento.

De modo geral, o ano de 2021 mostrou focos de NDCI localizados na porção leste da laguna e na zona das Rendeiras, as margens leste e oeste também tendem a exibir maiores valores do NDCI. Esse padrão espacial de concentração do NDCI também será notado nos próximos anos.

Figura 15: Mapa da variação do índice NDCI em 2021.



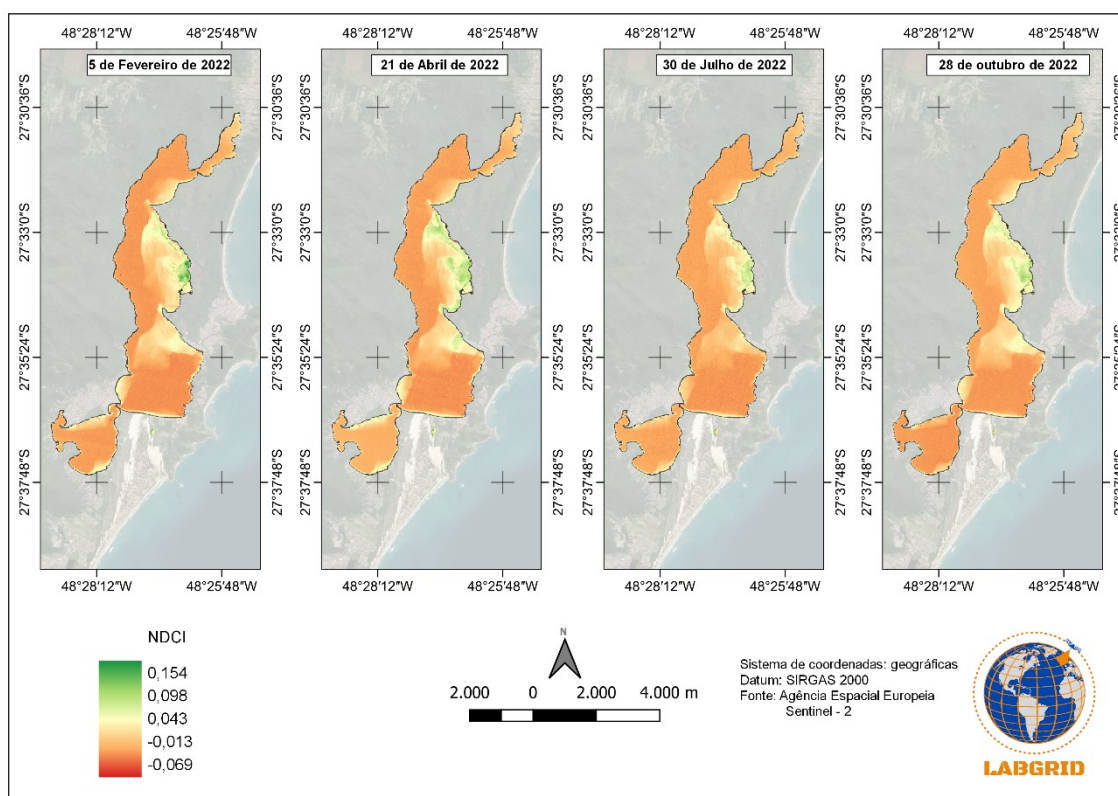
Fonte: Autor, (2025).

O ano de 2022, representado pela Figura 16, mostra as variações do NDCI ao longo da Lagoa da Conceição em datas próximas às cenas do ano anterior. No entanto, é necessário ressaltar as diferenças entre os anos. Primeiramente, é notável a diminuição do intervalo máximo. O ano de 2021 alcançou valores de NDCI próximos de 0.31 enquanto em 2022 esse valor alcançou 0.15. Esse comportamento foi inverso aos pontos amostrais da

CASAN, onde houve uma deterioração da qualidade da água indicada pela clorofila nos anos de 2022.

Assim como no ano anterior, foi mantida como zona de maior acumulação de clorofila a zona leste da Lagoa da Conceição, com tons de verde próximo das margens. Sendo necessário sinalizar que essa zona da laguna também se destaca por conter as menores cotas batimétricas, e que tal fator pode influenciar na acumulação de clorofila e consequentemente no aumento do NDCI.

Figura 16: Mapa da variação do índice NDCI em 2022.

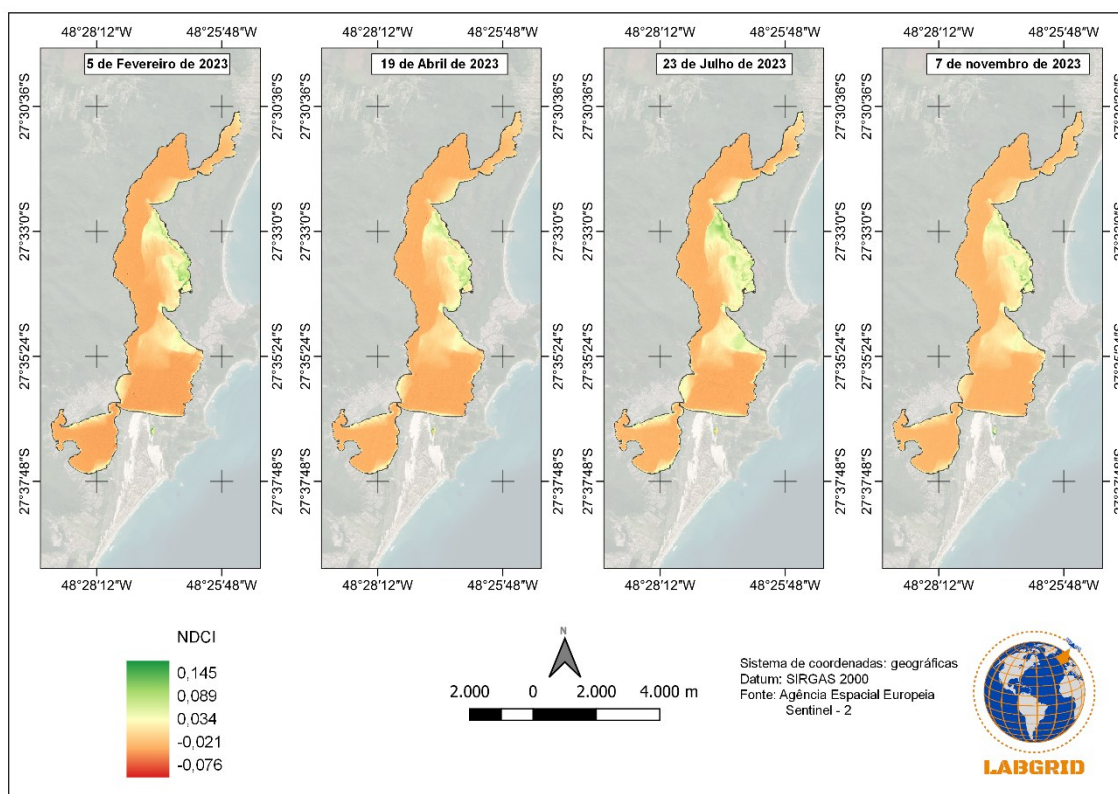


Fonte: Autor, (2025).

O NDCI de 2023 representado pela Figura 17, segue o padrão estabelecido pelo ano de 2022 de diminuição do pico de NDCI. Em 2023, o valor máximo de NDCI alcançou 0.15 que representa tons em verde, concentrados na zona leste Lagoa da Conceição.

No entanto, a transição do NDCI apresentou um padrão diferente observado na Figura 15. Conforme a data inicial 5 de fevereiro de 2023, é notável que os valores abaixo de 0,034 predominam na imagem, a data que sucede apresenta um leve aumento. Tal aumento gradativo segue até 23 de julho de 2023, porém, na data posterior 7 novembro de 2023, houve alteração na espacialidade dos valores de NDCI.

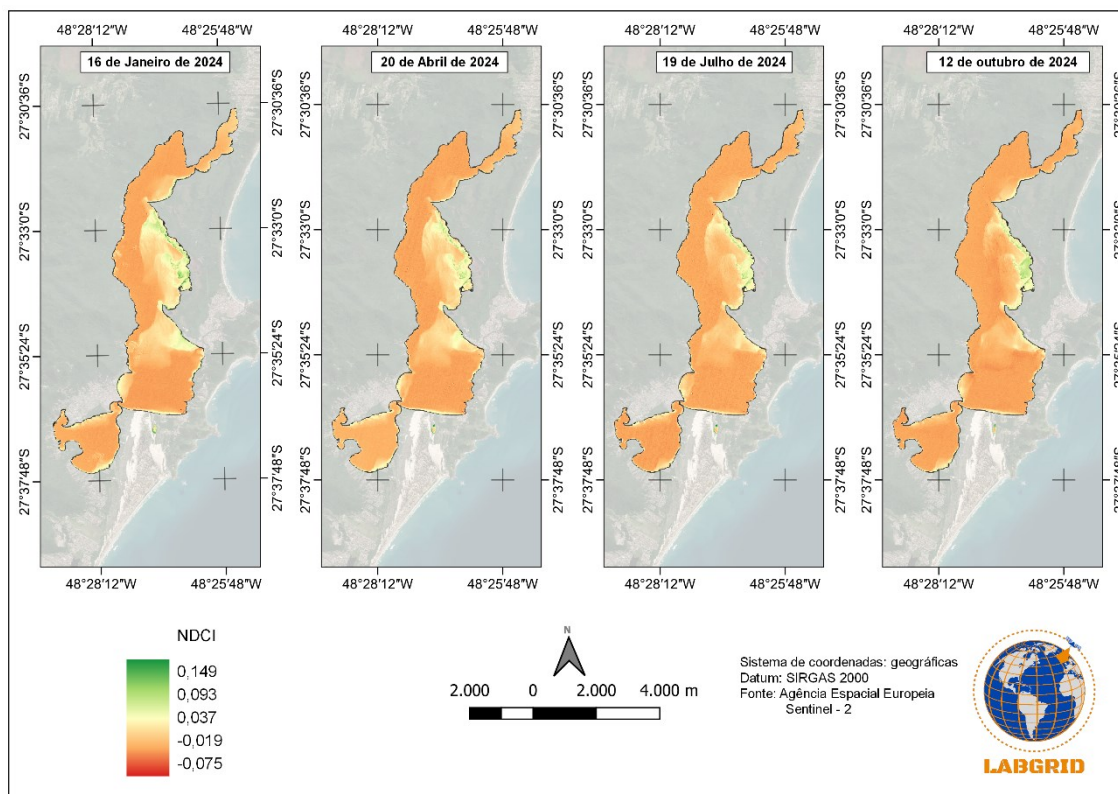
Figura 17: Mapa da variação do índice NDCI em 2023.



Fonte: Autor, (2025).

O ano de 2024 exibe na Figura 18 o padrão com maiores valores de NDCI na data inicial 16 de janeiro de 2024, conforme notado nas plumas localizadas ao leste esses valores variam entre 0,037 até 0,14. Posteriormente, a pluma de NDCI seguiu sendo diminuída ao longo das estações com o predomínio de valores próximos de -0.019.

Figura 18: Mapa da variação do índice NDCI em 2024.



Fonte: Autor, (2025).

Em suma, os mapas dos anos 2021, 2022, 2023 e 2024 apresentam a transição da espacialidade do NDCI ao longo das estações. Sendo necessário destacar o ano de 2021, como aquele com os maiores valores de NDCI de toda a série de mapas. Além disso, cabe ressaltar que 2021 apresenta as maiores plumas NDCI, mesmo nos meses que sucedem a data 18 de fevereiro de 2021.

Os anos seguintes 2022, 2023 e 2024 contem intervalos próximos de NDCI, não apresentando variações notáveis em termos de amplitude, porém, é perceptível as alterações ao longo dos meses. Os meses representativos do verão (janeiro ou fevereiro) tendem a mostrar valores mais elevados do ano e exibir as maiores plumas de NDCI concentradas ao leste da laguna.

O restante das estações é marcada pela diminuição gradual do NDCI até o aumento no verão do próximo ano. Apesar da diminuição, a zonas de acumulação de clorofila foram mantidas nesses meses, a zona mais proeminente ficou localizada ao leste da laguna. Contudo, zonas de valores

intermediários que variam entre 0,037 e 0,043, como porções sul nas Rendeiras, partes próximas à Avenida das Rendeiras e ao Centrinho Lagoa.

5.3 Análise do NDTI

5.3.1 Análise temporal do NDTI

A partir da plataforma Google Colabs foram construídos para análise das variações de NDTI, aplicado sob imagens Sentinel-2 entre os anos 2020-2024. Inicialmente, foram feitos 4 gráficos com as coordenadas da CASAN, os dados que alimentam essa representação foram extraídos no GEE com base em 4 *scripts*, um para cada ano. Também foram feitos 4 *scripts* para representar as 4000 amostras aleatórias com procedimento semelhante no GEE.

O Gráfico 18, é o primeiro gráfico do conjunto de dados extraídos das coordenadas da CASAN. Esse gráfico mostra a distribuição do índice espectral NDTI em 2021, de maneira que a tendência central indicada pela mediana varia entre -0,25 até -0,20, com alguns fogem a esse comportamento, como os pontos (F3, H2, I3 e Z0) alcançando valores próximos de -0,15. Sendo válido destacar o ponto F3, localizado próximo à entrada do Canal da Barra da Lagoa, devido à proeminência no valor de NDTI com intervalo interquartil que concentra valores entre -0,15 até -0,10, ou seja, é um indicativo de que a turbidez aumenta à medida que converge no canal que conecta a laguna com o mar.

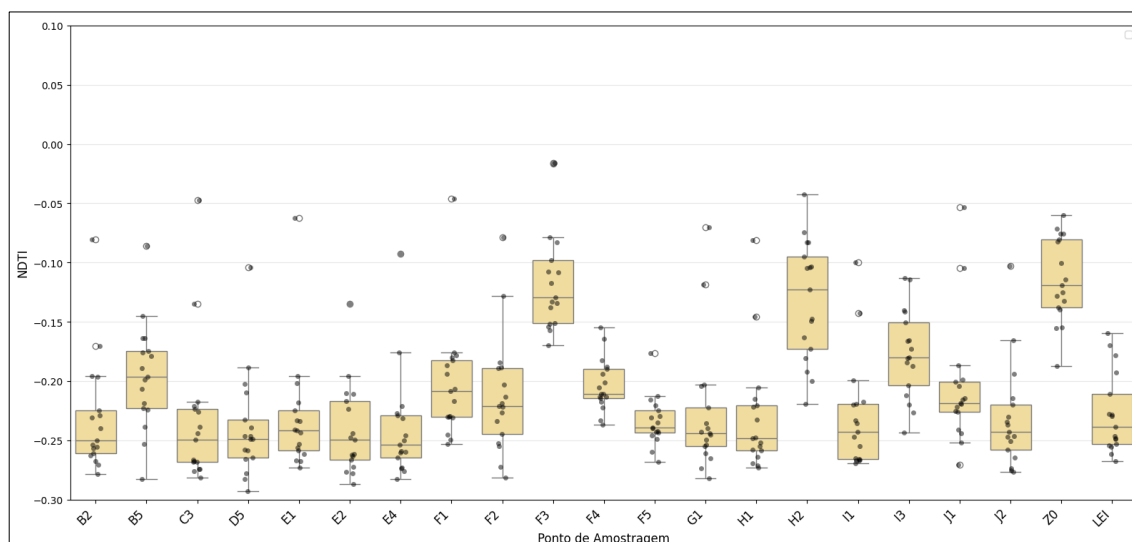
Também é válido destacar que semelhante ao comportamento analisado da concentração de clorofila e NDCI referente a cotas de menor profundidade, também foi observado para o NDTI. O conjunto de pontos (B5, F1, F2, F3, H2, I3, J1, Z0), estão localizados em zonas batimétricas que variam entre 0-2 metros de profundidade, são aqueles que apresentam medianas próximas de -0,20 e deslocamento do intervalo interquartil deslocado em relação aos demais.

Porém, diferente das outras variáveis, o ponto LEI não demonstrou valores elevados, esse comportamento indica excepcionalidade, pois, esse ponto revelou elevados valores de concentração de clorofila com mediana de 40,0 (µg/L) em 2021 e NDCI alcançando medições próximos de 0,1.

O outro grupo conforme o Gráfico 18, acumula as coordenadas localizadas em áreas com maior profundidade. Esse grupo é formado pelas estações de amostragem (B2, C3, D5, E1, E2, E4, F5, G1, H1, I2, J2, LEI), localizadas em zonas batimétricas que variam entre 3 até 6 metros de profundidade e corresponde a variações de NDTI próximas de -0,25.

Assim como visto na análise dos gráficos sobre o NDCI, o ano de 2021 foi aquele que mostrou maior variabilidade interquartil. Durante esse ano, houve amostras que alcançaram um pico próximo de -0,05, em contraste com os valores mínimos que se aproximam de -0,30. Devido a essa amplitude, o ano de 2021 teve destaque quando comparado com os anos a seguir.

Gráfico 18: Box-plot do NDTI por ponto de amostragem 2021.

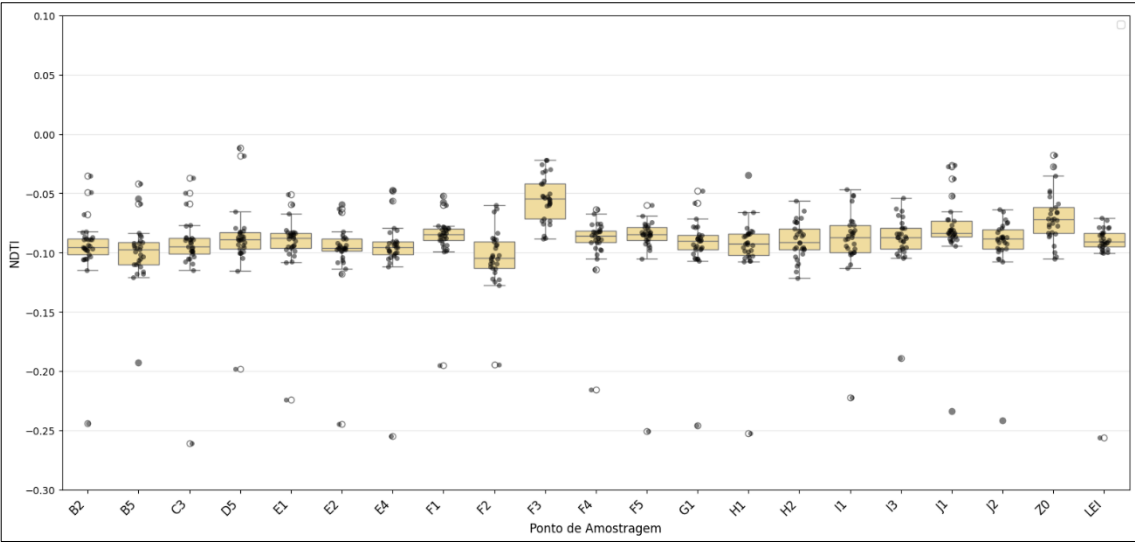


Fonte: Autor, (2025).

Assim como visto na análise do índice espectral anterior, os anos de 2022, 2023 e 2024 representados pelos Gráficos 19, 20 e 21 contêm diversas características semelhantes. O efeito de achatamento generalizado do intervalo interquartil a partir de 2022 também foi observado em todos os pontos de amostragem do NDTI, resultando na concentração de valores em torno de -0,1.

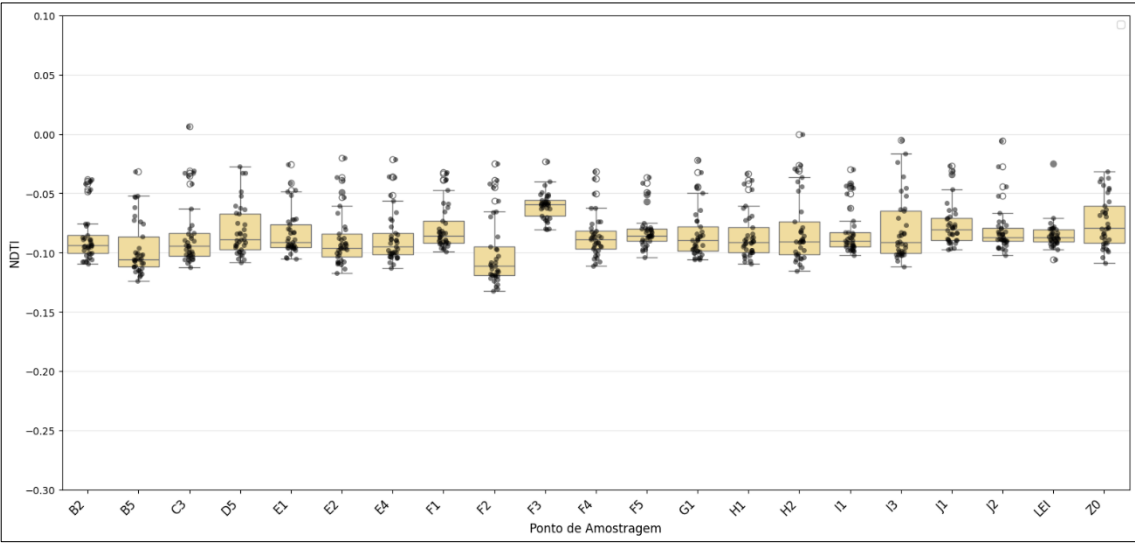
Ademais no NDTI, o efeito de achatamento foi intensificado quando comparado com os gráficos por ponto de amostragem do NDCI. Esse efeito sugere que as bandas usadas na composição do índice espectral NDTI, foram mais afetadas pelo processo de diminuição de variabilidade.

Gráfico 19: Box-plot do NDTI por ponto de amostragem 2022.



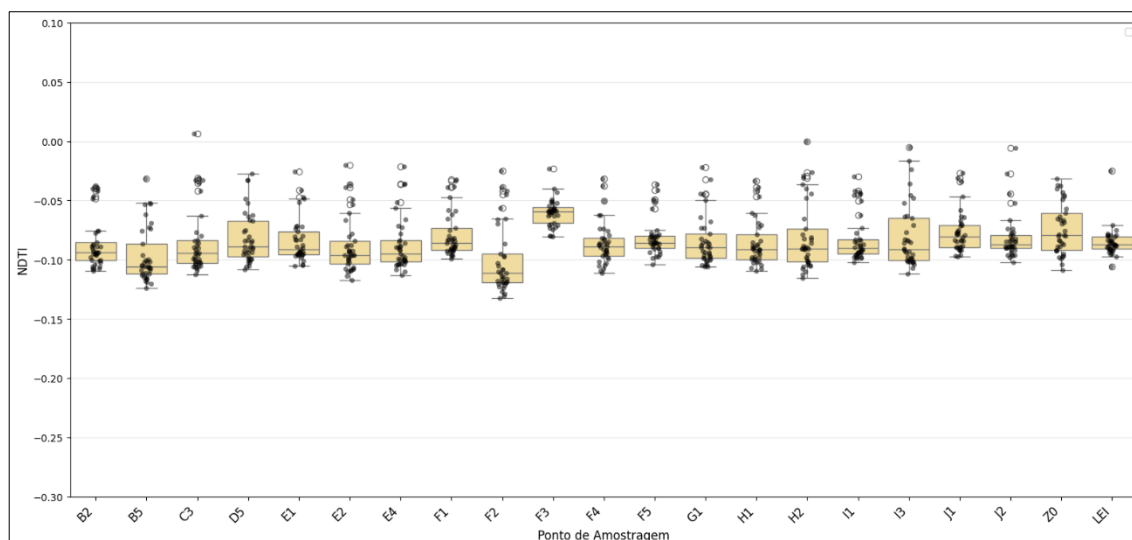
Fonte: Autor, (2025).

Gráfico 20:Box-plot do NDCI por ponto de amostragem 2023.



Fonte: Autor, (2025).

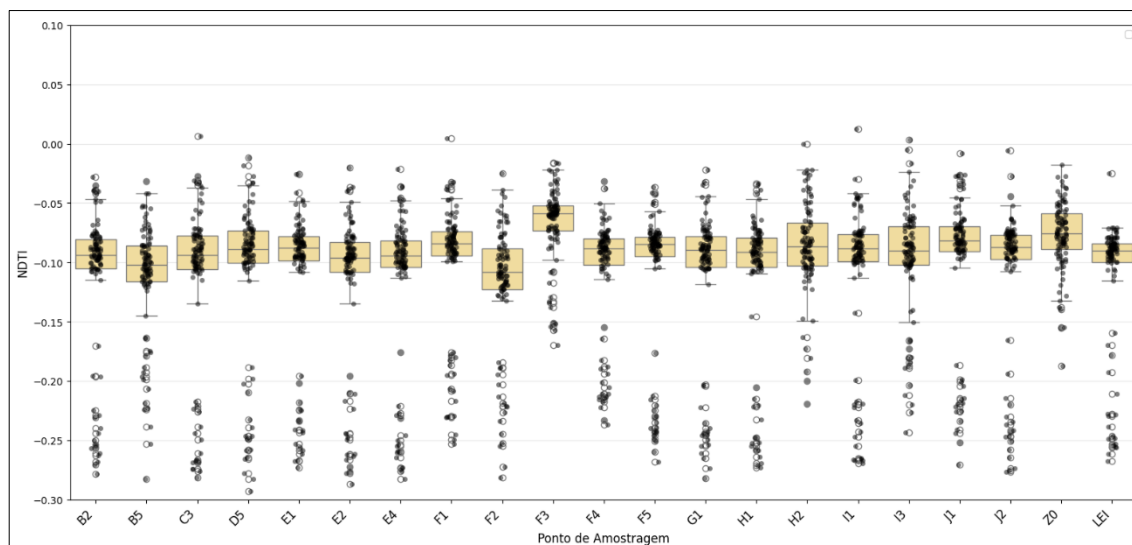
Gráfico 21: Box-plot do NDTI por ponto de amostragem 2024.



Fonte: Autor, (2025).

O efeito de concentração de variabilidade que resultou no encurtamento generalizado do intervalo interquartil é melhor observado no Gráfico 22, que reuniu todos os pontos de amostragem entre os anos 2020 até 2024. Os pontos de amostragem relativos aos anos de 2022, 2023 e 2024, estão concentrados no valor -0,10. Consequentemente, os valores que aparecem como *outlayer* abaixo do 1º quartil representam o NDTI de 2021 que contém mediana em torno de -0,25. Sendo assim, a concentração de variabilidade a partir de 2022 resultou na elevação sistemática do NDTI.

Gráfico 22: Box-plot do NDTI por ponto de amostragem compilado de 2020-2024.

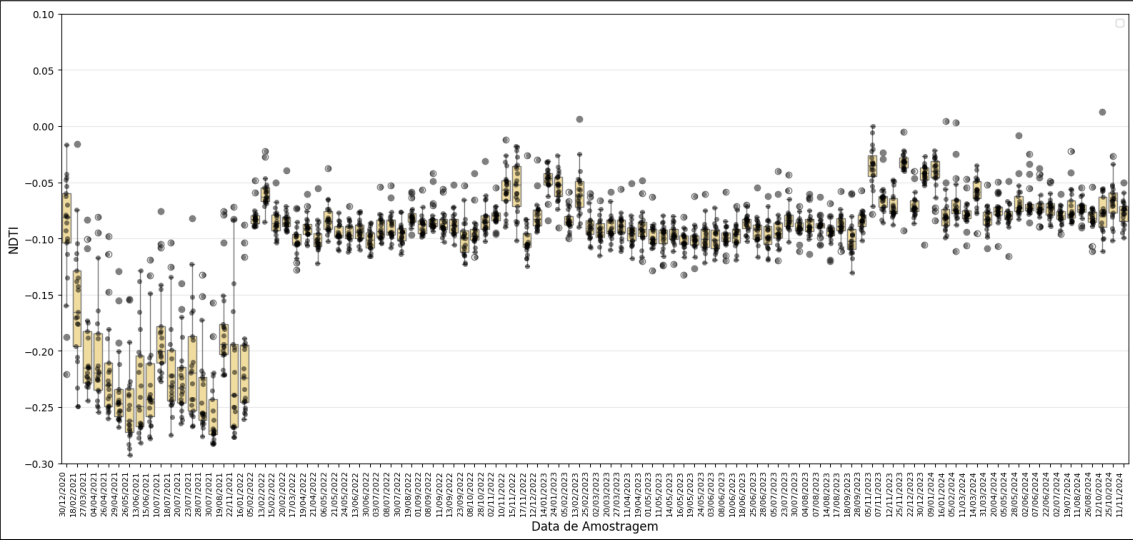


Fonte: Autor, (2025).

Para visualizar o início do efeito que causou a concentração de valores, foi criado o Gráfico 23, que compila os pontos de amostragem de acordo com a data da cena sob a Lagoa da Conceição. É necessário observar que o ano de 2021, mostra maior amplitude em cada box-plot que indica maior variabilidade para o ano. Outro aspecto notável é o deslocamento da tendência central entre as datas deste ano. Os primeiros meses do ano seguem com valores maiores (-0,20), com tendência de queda da mediana até 26 de maio de 2021 (-0,25), para logo em seguida dar início a um aumento do NDTI. Em resumo, os box-plots do ano de 2021 ilustram períodos de queda, seguidos de períodos de aumento de maneira gradual até 16 de janeiro de 2022.

De maneira análoga ao NDCI, a data 16 de janeiro de 2022 marca o início da alteração sistemática nos valores de NDTI, que resultou em um repentino aumento na tendência central (mediana) a partir dessa data em diante. Tendo em vista o padrão apresentado pelo ano de 2021, para posterior interrompimento brusco, resultou em incertezas no que tange à análise dos próximos anos.

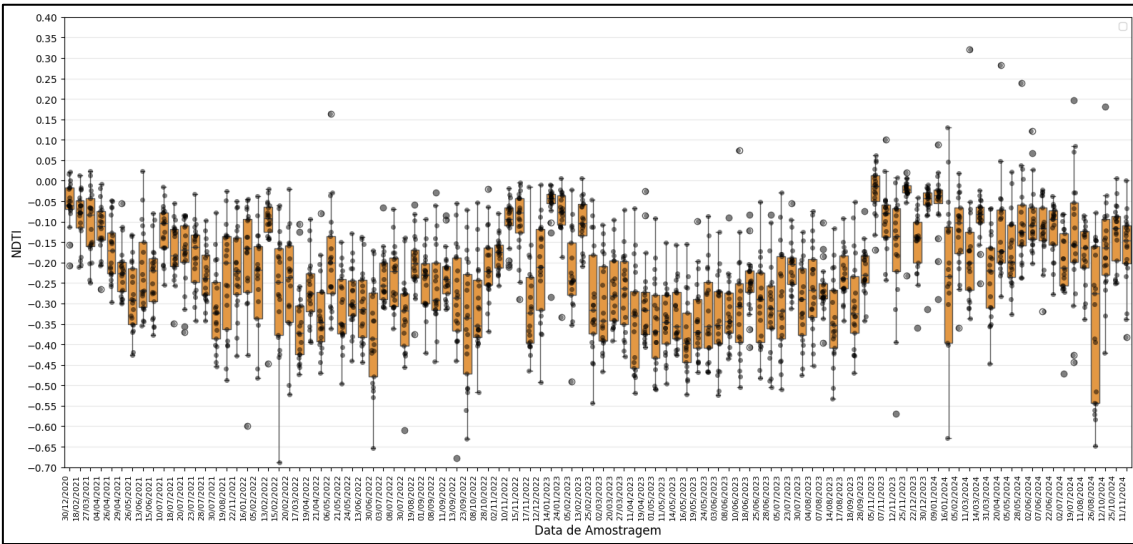
Gráfico 23: Box-plot do NDTI por data de amostragem 2020-2024.



Fonte: Autor, (2025).

De modo diferente o Gráfico 24, demonstra mais oscilações se comparado com o gráfico anterior. Tal variabilidade é notada através da ampliação do intervalo interquartil e, diferente dos dados do gráfico anterior, valores abaixo de -0.10 prevalecem na maioria das cenas.

Gráfico 24: Box Plot NDTI (Suface Reflectance) por data de amostragem 2020-2024.



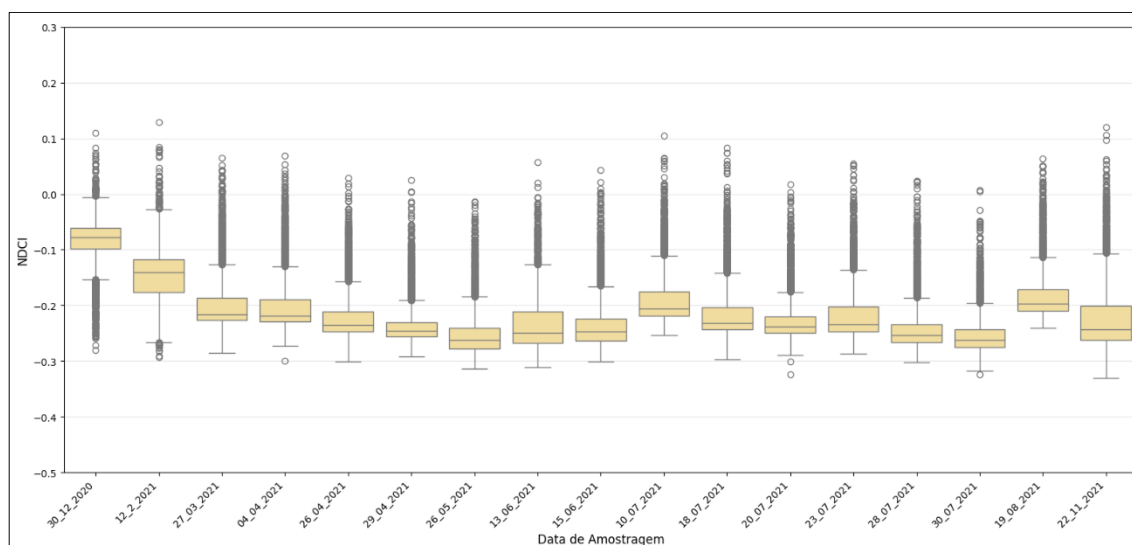
Fonte: Autor, (2025).

A alteração sistêmica que resulta no achatamento intervalo interquartil não foi notada nos gráficos de NDTI, indicado que o nível SR são sofreu nas suas imagens.

A série de gráficos a seguir surgiu da necessidade de observar, se o fenômeno de concentração de variabilidade foi influenciado pelo conjunto de pontos amostragem disponibilizados pela CASAN ou se a coleção de imagens foi alterada sistematicamente após 16 de janeiro de 2022. Para satisfazer essa dúvida, foram distribuídos 4000 pontos aleatoriamente, sobre o corpo hídrico da Lagoa da Conceição entre os anos 2021-2024.

O Gráfico 25 de 2021 mostra valores que variam entre -0,1 até aproximadamente -0,3 em que as primeiras cenas médias estão acima de -0,2 e seguem diminuindo até alcançar uma estabilidade de valores entre -0,2 e -0,3. A partir da cena de 27 de março de 2021, os box-plots tendem a exibir assimetria positiva indicando a concentração de valores baixos. Esse comportamento é notado através da proximidade entre 1ºquartil e 2ºquartil.

Gráfico 25: Box-plot do NDTI por data de amostragem aleatória 2021.

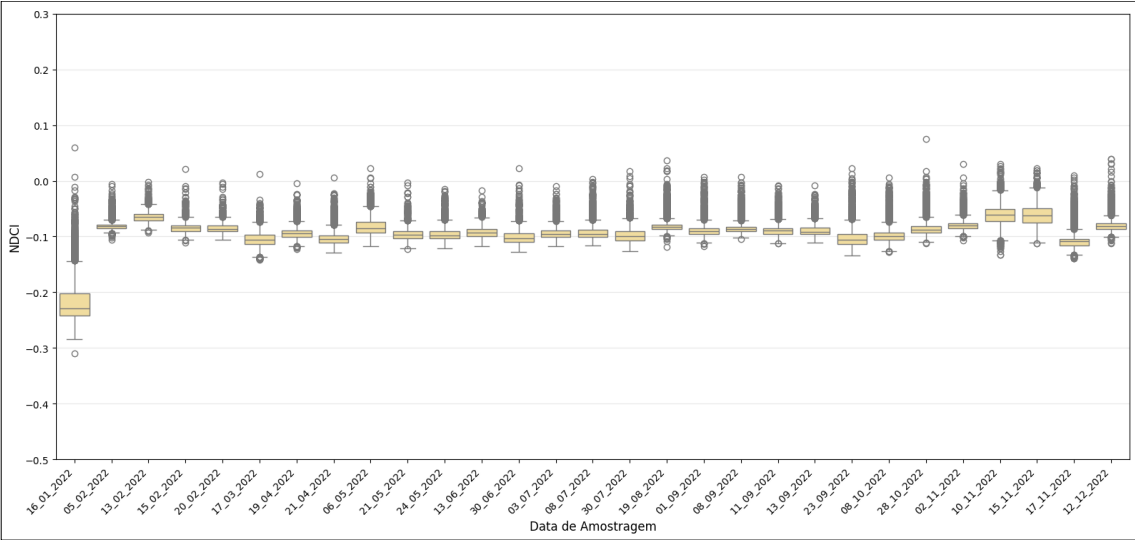


Fonte: Autor, (2025).

O Gráfico 26 de 2022 mostra que a estabilidade do ano anterior para valores de NDTI entre -0,2 e -0,3 permaneceu até a cena 16 de janeiro de 2022. As datas que sucedem essa cena demonstram tendência diferente junto de uma mudança abrupta do padrão, mostrado durante o ano de 2021. A partir da cena de 5 de fevereiro de 2022 até 12 de dezembro de 2022, houve uma concentração de valores em torno de -0,1 que resultou no achatamento generalizado da caixa.

Esse efeito indica diminuição da variabilidade, contrastando com o que foi em 2021.

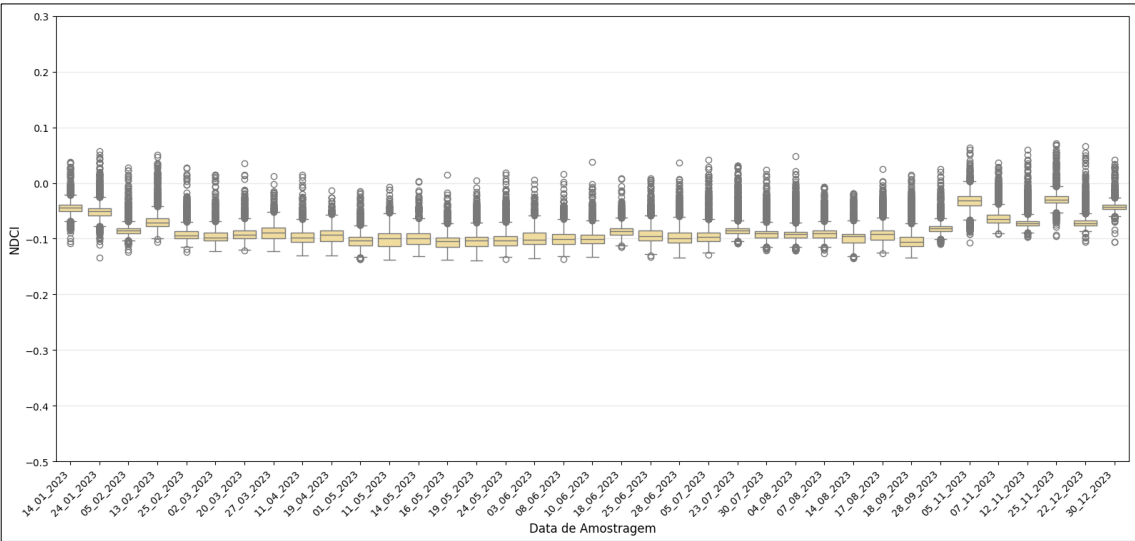
Gráfico 26: Box-plot do NDTI por data de amostragem aleatória 2022.



Fonte: Autor, (2025).

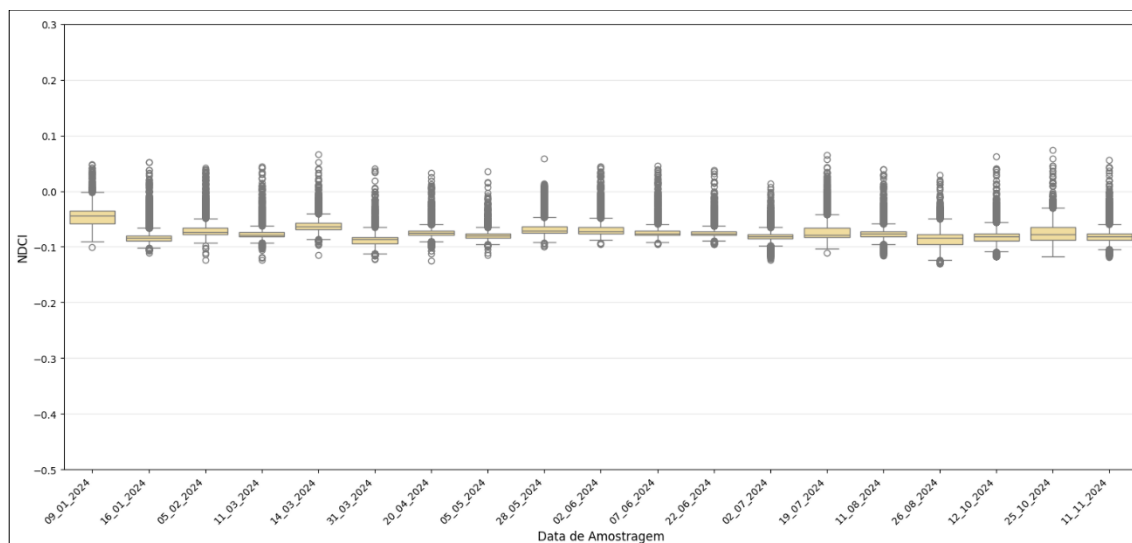
O padrão descrito em 2022 também é notado nos Gráficos 27 e 28 de 2023 e 2024, sendo assim a concentração de valores permaneceu próxima de -0,1. Assim como NDCI, o índice NDTI também foi afetado pelo efeito achatamento das caixas, confirmando a hipótese que houve uma alteração sistemática em todas as cenas a partir do ano de 2022.

Gráfico 27: Box-plot do NDTI por data de amostragem aleatória 2023.



Fonte: Autor, (2025).

Gráfico 28: Box-plot do NDTI por data de amostragem aleatória 2024.



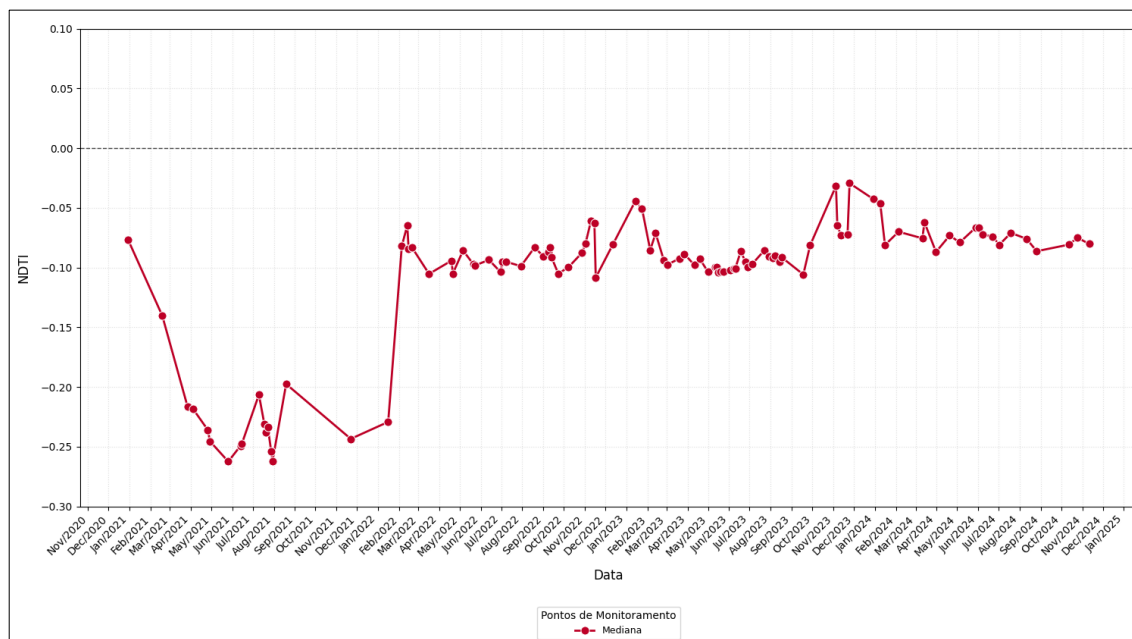
Fonte: Autor, (2025).

Assim como no Gráfico 17 que representa o NDCI, mostrou alteração sistemática na concentração de clorofila, em torno da mediana depois do dia 16 de janeiro de 2022, o Gráfico 29 abaixo também mostrou o mesmo efeito para o NDTI. Contudo, a mudança ocorre de maneira mais abrupta no NDTI. Por exemplo, para esse índice, o salto de valores ocorreu dentro de um intervalo de -0,25 a -0,05. Na circunstância do NDCI, esse salto foi de -0,05 até próximo de 0.

Isso é um indicativo de que a banda 3 verde sofreu maiores efeitos da alteração sistemática. Essa ideia é reforçada pelo fato de que ambos os índices espectrais são servidos pela banda 4 vermelho, consequentemente o elemento que diferencia tais índices é a banda verde do Sentinel-2.

Também não foram encontradas causas que expliquem a alteração sistemática em ambos os índices espectrais no site *SentiWiki Home* (<https://sentiwiki.copernicus.eu/web/document-library#Library-S2-Documents>), ou no manual disponibilizado pela ESA (2017).

Gráfico 29: Evolução da mediana do NDTI por amostragem aleatória 2021-2024.



Fonte: Autor, (2025).

5.3.2 Análise espacial do NDTI

Para analisar espacialmente as variações de turbidez por meio do NDTI, foram utilizadas cenas do Sentinel-2 entre os anos 2020 até 2024, tais imagens alimentaram uma série de mapas que representam a variação do índice espectral ao longo das estações do ano.

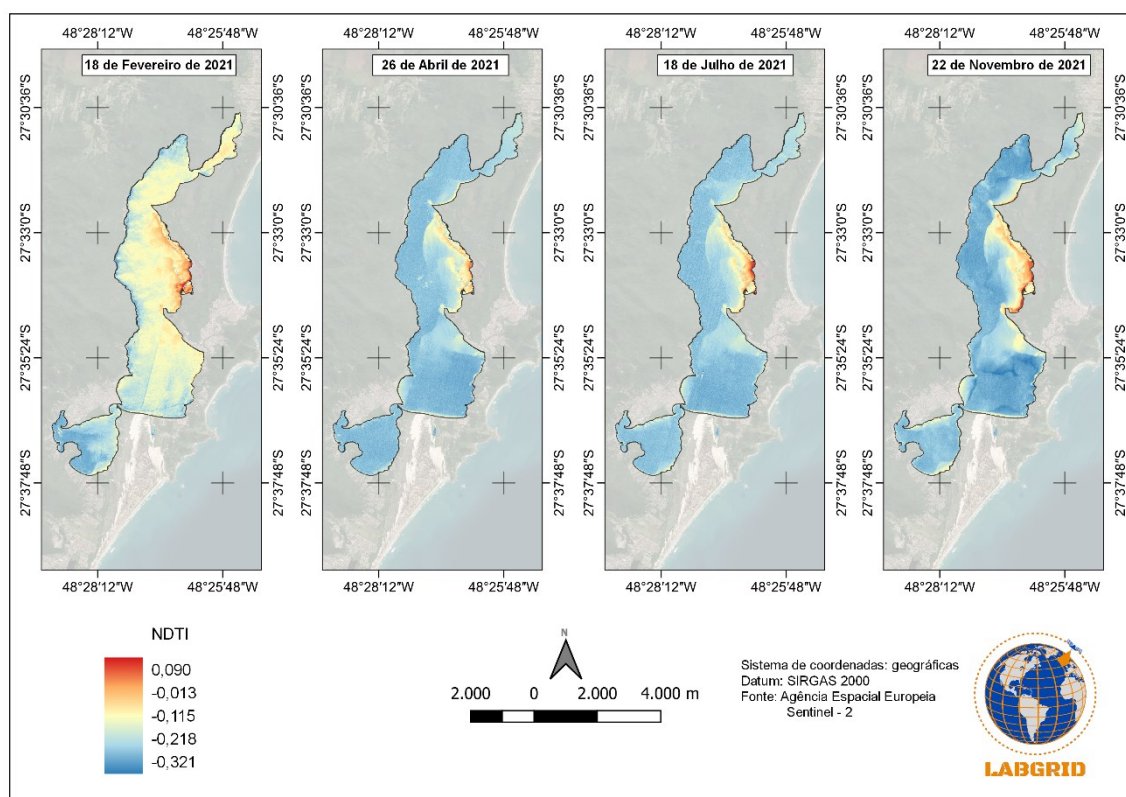
As imagens de satélite usadas na construção dos mapas foram obtidas na plataforma GEE, que possibilitou a aplicação do índice espectral para posteriormente serem usadas no *layout* do software Qgis para construção dos mapas.

A Figura 19 destaca as alterações do NDTI ao longo do tempo em 2021. Logo de início, é notável que a data 18 de fevereiro de 2021 possui os maiores valores de NDTI distribuídos espacialmente sobre a Lagoa da Conceição. Nessa data, NDTI próximo de 0,09 ficou concentrado na porção leste da laguna e segue diminuindo de valor na medida em que aumenta a distância dessa área *core*.

A data 26 de abril de 2021 contém a imagem representativa do outono mostra uma queda brusca de NDTI tanto em termos numéricos quanto espaciais. Nessa cena da laguna, os valores próximos de -0,21 são os predominantes, tal valor indica água com poucas partículas em suspensão e aparência límpida. Já a cena de 18 julho de 2021, mostra um sutil aumento de NDTI na zona leste da Lagoa da Conceição, esse padrão de aumento também é reproduzido na data de 22 de novembro de 2021.

O ano 2021 apresentou valores de NDTI no verão que estão associados a turbidez moderada, no entanto, esse cenário de turbidez é radicalmente alterado conforme visto na cena de 26 de abril, devido ao predomínio de valores associados a águas claras. Nas cenas seguintes, houve aumento gradual das plumas de turbidez localizadas ao leste, onde é possível notar a transição de águas claras para águas com turbidez moderada.

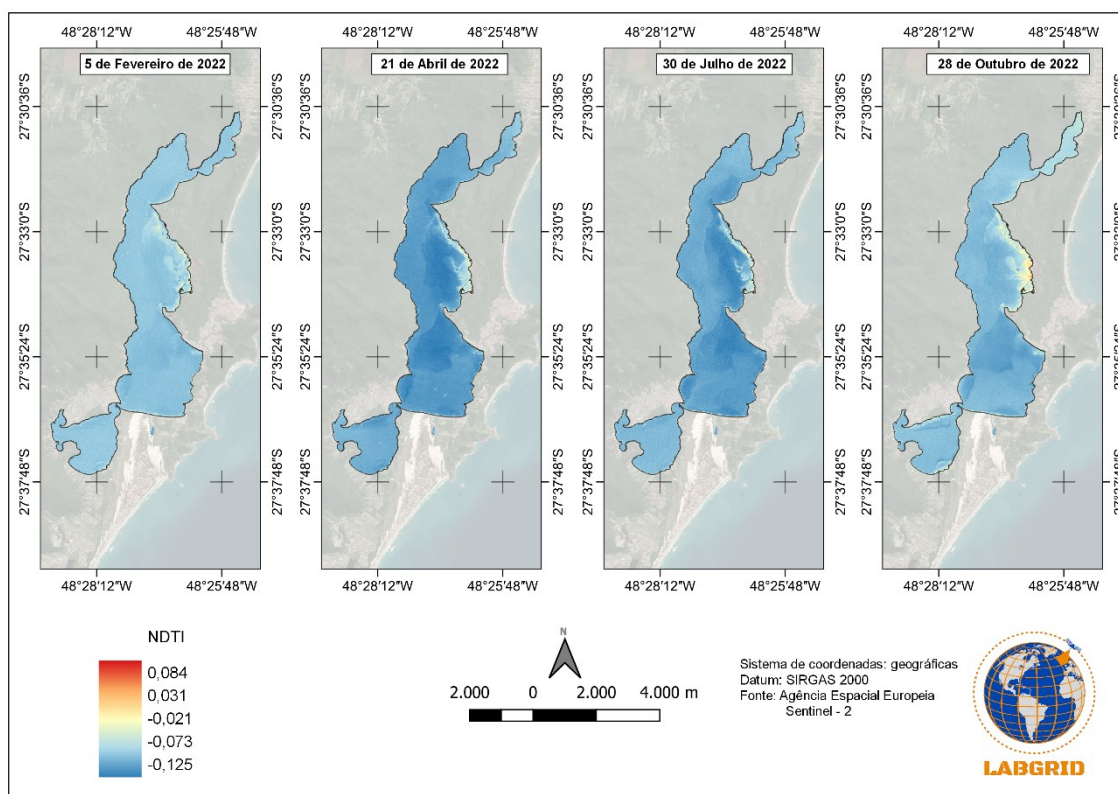
Figura 19: Mapa da variação do índice NDTI em 2021.



Fonte: Autor, (2025).

O mapa presente na Figura 20, mostra a distribuição espacial do NDTI referente ao ano de 2022. Primeiramente, é perceptível a diferença com o ano anterior que mostrou zonas de NDTI ao leste da laguna, em 2022 tais foram suprimidas na maioria das imagens, aparecendo somente na cena de 28 de outubro de 2022. Consequentemente, em 2022 valores dentro do intervalo de -0,073 e -0,125 prevaleceram na superfície aquática da Lagoa da Conceição, tais valores são indicativos de águas claras.

Figura 20: Mapa da variação do índice NDTI em 2022.



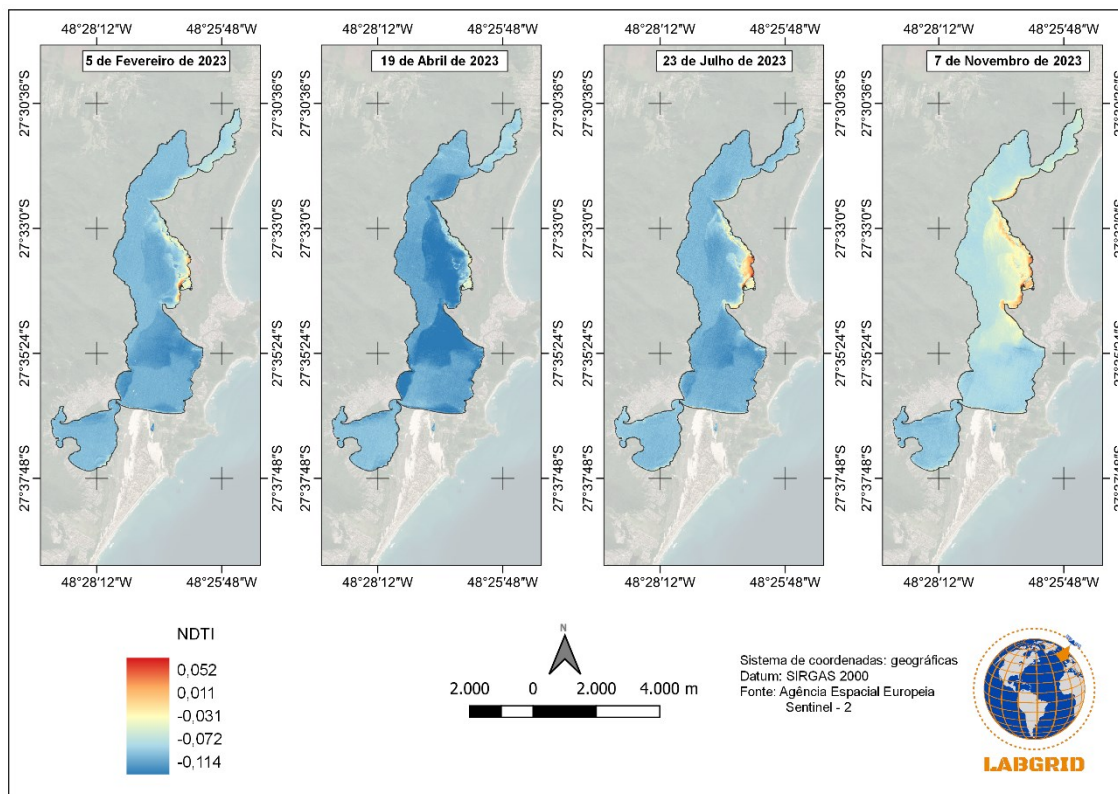
Fonte: Autor, (2025).

O de 2023 representado na Figura 21, é iniciado com a supressão dos valores concentrados de NDTI no setor leste da Lagoa da Conceição, sobretudo na cena do 19 de abril de 2023, em que NDTI próximos de -0,11 prevalecem neste setor da laguna. No entanto, na cena seguinte referente ao dia 23 de julho de 2023, valores entre 0,01 e 0,08 voltam a aparecer nesta parte da área de estudo.

Na cena referente à primavera, referente ao dia 7 de novembro de 2023, é notável o aumento da espacialidade de valores pertencentes ao intervalo de

0,01 até 0,08. Para o ano de 2023, a espacialidade do NDTI seguiu o padrão de valores extremamente baixos no início do ano, acompanhado de uma transição para valores maiores até a primavera.

Figura 21: Mapa da variação do índice NDTI em 2023.

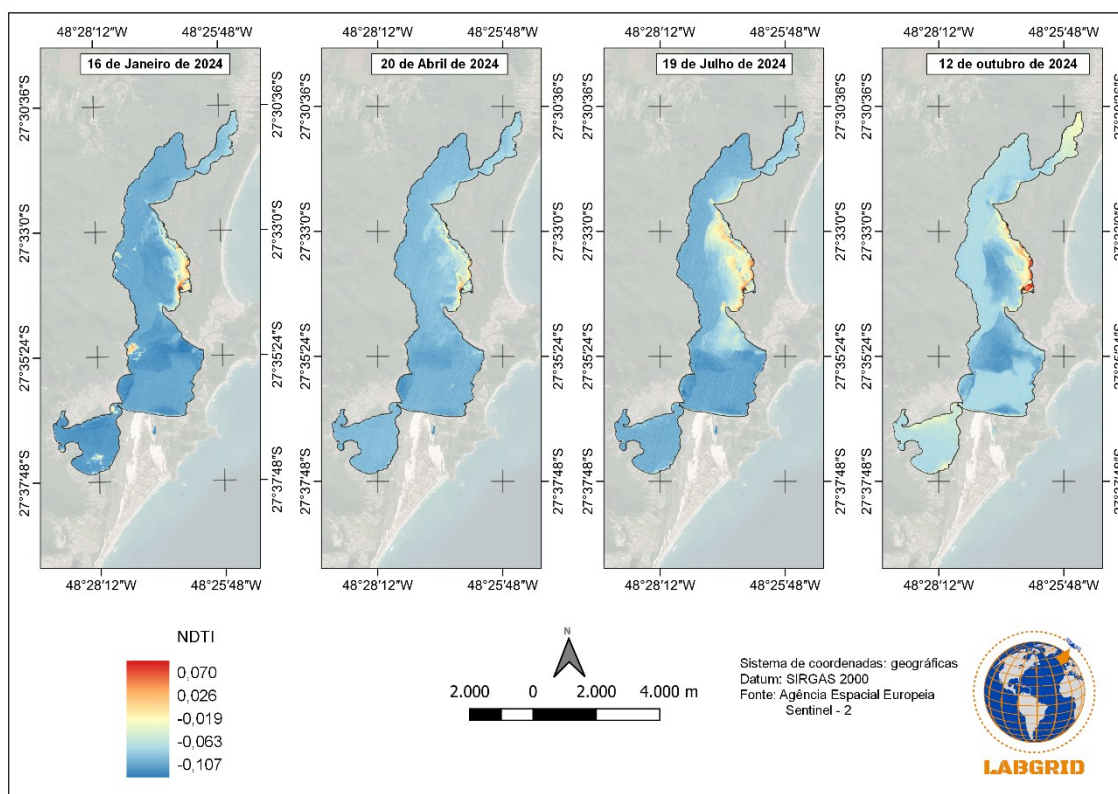


Fonte: Autor, (2025).

Com padrão semelhante ao ano anterior, o ano 2024 conforme a Figura (22) inicia com valores relativamente baixos no verão, conforme a imagem do dia 16 de janeiro de 2024, seguida de uma queda de valores conforme o dia 20 de abril de 2024 com a predominância de valores entre -0,06 e -0,10.

Os meses seguintes (julho e outubro), apresentam aumento do NDTI na zona leste da Lagoa da Conceição, na medida que passam a concentrar valores próximos de 0,02 até 0,10. Em resumo, ano de 2024 apresenta diminuição nos meses iniciais (janeiro e abril) e aumento progressivo nos meses de inverno e primavera (julho e outubro).

Figura 22: Mapa da variação do índice NDTI em 2024.



Fonte: Autor, (2025).

De modo geral NDTI, exceto pelo mês de fevereiro de 2021, apresentou de leve aumento no início do mercado por uma queda de valores durante o outono, para posterior aumento gradual até a primavera. É necessário sinalizar que semelhante ao índice espectral NDCI, as do setor leste tentem a acumular valores elevados de NDTI. Em alguns casos, as plumas de turbidez aparecem na porção sul da laguna conhecida como Rendeiras, o mesmo efeito ocorre próximo ao Centrinho da Lagoa.

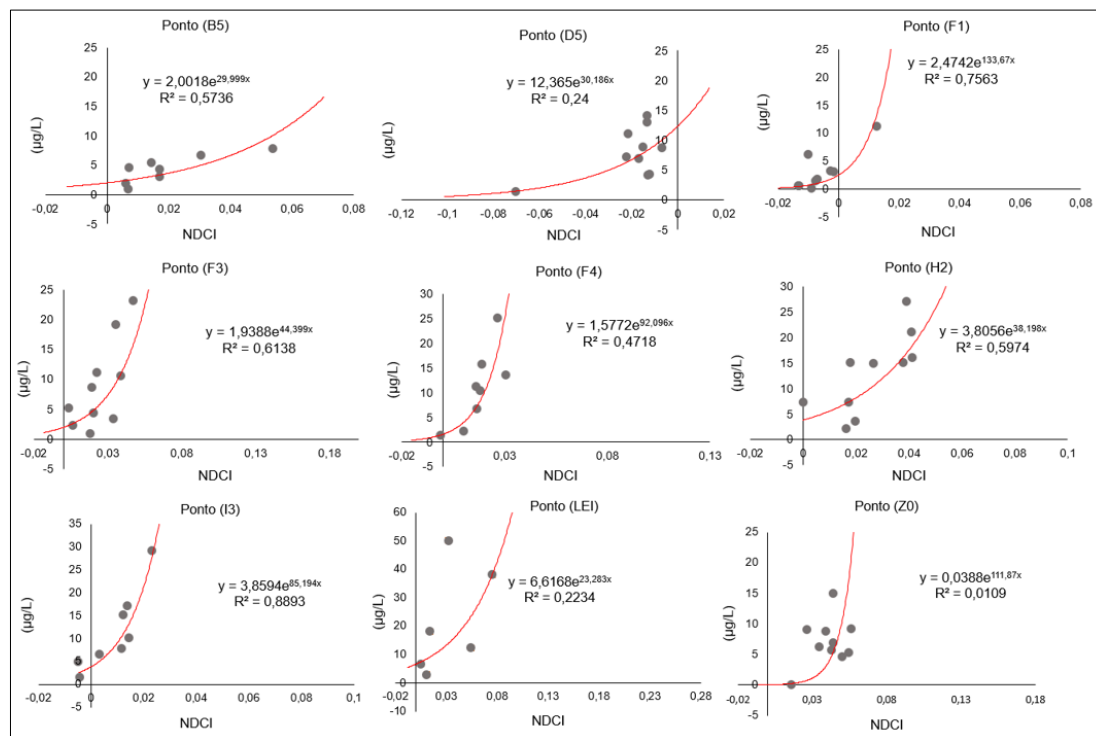
Porém, é preciso resguardar as diferenças entre os índices, a principal delas se refere ao aumento ou diminuição das plumas ao longo do ano. No NDCI, os meses de verão (janeiro ou fevereiro), tendem a exibir valores elevados, e no decorrer do ano sofrem progressiva diminuição. Diferente do NDTI, que apresenta valores altos no início do ano, para uma queda abrupta durante o mês abril e posterior aumento gradual até os meses de primavera (outubro ou novembro).

5.4 Relação entre clorofila *in situ* e NDCI

Com o objetivo de investigar a correlação entre a concentração de clorofila *in situ* e o NDCI, uma série de gráficos de dispersão foram construídos. O primeiro conjunto de gráficos, consistiu em comparar as amostras adquiridas em campo com amostras NDCI entre os anos 2021, 2022 e 2023 com base nos pontos amostragem da CASAN conforme o Gráfico 28.

Foram considerados satisfatórios pontos de amostragem com R^2 acima de 0,5, ou seja, são pontos em que a variância é considerada razoável para estimar a concentração de clorofila. Nesse sentido, os pontos (B5, F1, F3, H2 e I3) são aqueles que cumprem esses critérios, pois indicam que o NDCI consegue prever com algum nível de exatidão a concentração de clorofila. E dentro desse grupo de pontos, é preciso destacar valores acima de 0,7 como os pontos (F1 e I3). De acordo com a Figura 9, o ponto F1 está localizado ao oeste, próximo ao início da trilha da Costa da Lagoa, já o ponto I3 está localizado na porção norte da laguna, na margem leste.

Gráfico 30: Dispersão da concentração clorofila e NDCI por ponto de amostragem.



Fonte: Autor, (2025).

Tais pontos indicam a possibilidade de obter correlação forte em localizações totalmente opostas na Lagoa da Conceição. No entanto, são pontos localizados em zonas pouco profundas, que variam entre 0 até 2 metros, conforme o mapa da Figura 9, que exibe o levantamento batimétrico.

O restante dos pontos (F1, F4, LEI e Z0), foram considerados insatisfatórios em termos de correlação, pois, valores de R^2 abaixo de 0,5 indicam instabilidade entre a variável dependente (concentração de clorofila) e variável independente (NDCI). Não sendo úteis para a expressar variabilidade entre a concentração de clorofila e NDCI.

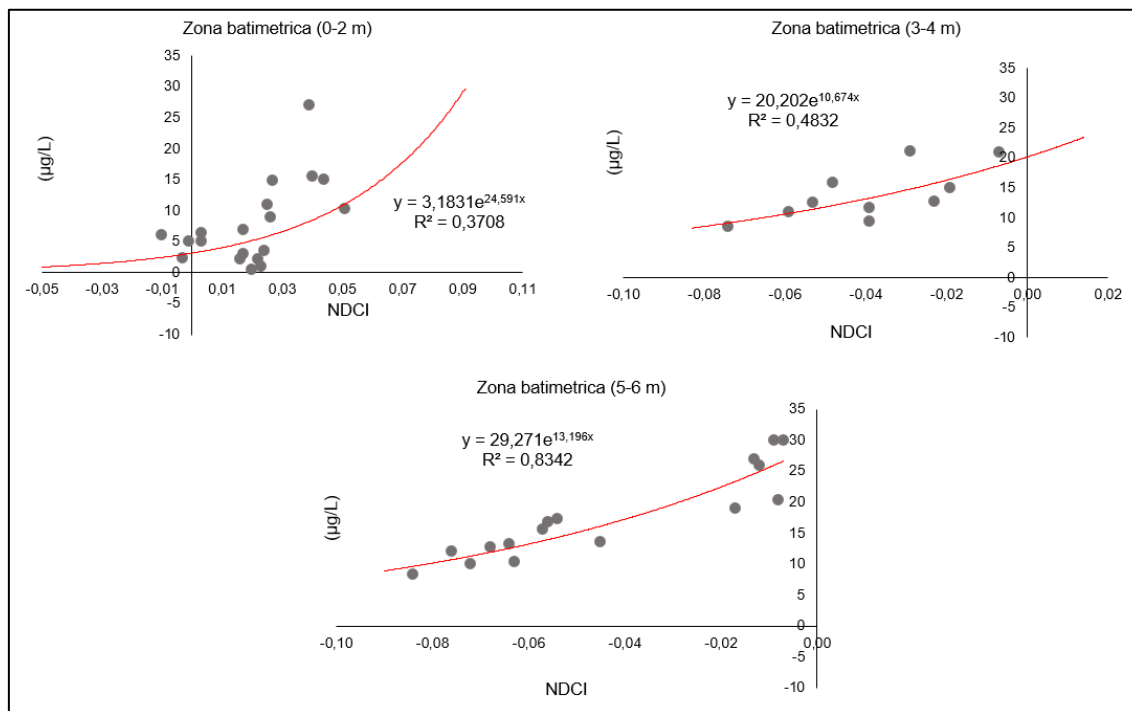
5.4.1 Análise batimétrica

A análise da correlação entre a concentração de clorofila e NDCI, sob os recortes de diferentes zonas batimétricas feita no Gráfico 29, consistiu em compilar todos os pontos de amostragem ao longo de três anos (2021 - 2023).

É notório o aumento progressivo do R^2 na medida que a zona batimétrica fica mais profunda. Por exemplo, os gráficos das zonas de (0-2 metros) e (3-4 metros) exibem, respectivamente, R^2 de 0.37 e 0.48. Em virtude disso, o registro do NDCI foi afetado, visto que colunas de água em localidades rasas sofrem influência do fundo e de outras partículas em suspensão.

Outro fator que pode ter afetado a relação entre as variáveis é o efeito de borda, resultado da mistura espectral do NDCI e do processo de *downscaling* para aplicação do índice espectral, que consistiu na transformação do pixel de 10 metros para 20 metros.

Gráfico 31: Dispersão da concentração clorofila e NDCI por zona batimétrica.



Fonte: Autor, (2025).

O melhor resultado foi obtido na zona batimétrica com intervalo de profundidade entre (5-6 metros), conforme mostra o R^2 de 0,83. A hipótese para tal resultado, consiste em fatores como distância da margem que diminui a influência do efeito de borda, tendo vista que os pontos de amostragem rasos estão localizados próximos das margens, os pontos tendem a estar distantes. Portanto, também não são afetados por efeitos de reflectância de fundo, resultando em coluna de água com fatores de interferência atenuados.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho objetivou demonstrar a aplicação dos índices espectrais NDCI e NDTI entre os anos 2021 até 2024, com o foco na dinâmica da qualidade da água pós o rompimento da Lagoa de Evapoinfiltração ocorrido em 25 de janeiro de 2021 na Lagoa da Conceição. A combinação entre dados in situ de concentração de clorofila permitiu capturar esse cenário crítico da laguna em um primeiro momento. A análise do ano de 2021 revelou uma laguna em estado crítico com 60.58% das amostras foram classificadas como eutróficas, e as imagens de satélite corroboram esse cenário. A primeira cena pós-evento (18 de fevereiro de 2021) registrou os maiores picos de NDCI de toda a série com valor atingindo (0.316), acompanhado de plumas em tons esverdeados, tal espacialização está provavelmente correlaciona ao despejo de matéria orgânica.

No entanto, os próximos anos mostraram recuperação da qualidade da água. O ano de 2023 apresentou melhora generalizada, com amostras eutroficas caindo para apenas 16.26% e classe de menor estado trófico (oligotrófico – ultra-oligotrofico) aumentam a sua proporção, alcançando juntas o valor de 49.75%.

Na tentativa de compreender a dinâmica complexa da Lagoa da Conceição por meio de índices espectrais a pesquisa encontrou inesperadas dificuldade. Foi detectada uma alteração sistemática e não comunicada por canais oficiais da ESA, nas imagens do Sentinel-2, o início dessa alteração foi marcada pela cena de 16 de janeiro de 2022. Este fenômeno, foi reconhecido através de um teste independente com 4000 amostras aleatórias, sendo revelado como diminuição da variabilidade e uma elevação da tendencia central (média e mediana) para os índices NDCI e NDTI.

O estudo mostrou que tentativa de correlacionar de dados concentração de clorofila com dados satélite pode resultar em falhas. Não sendo esse um problema de natureza metodológica, mas é erro relacionado ao comportamento anômalo iniciado em 2022.

Apesar desse desafio, a análise a partir de recorte batimétricos revelou um padrão. Enquanto zonas rasas (0 – 2 profundidade) exibiram R^2 de 0.37,

devido a fatores como reflectância de fundo e efeito de borda, as zonas batimétricas com (5 – 6 profundidade) mostraram melhor performance com R^2 de 0.83. Indicado que colunas de água mais profundas e sem influência do efeito de borda, resultam em um ambiente aquática capaz de abrigar correlação forte entre concentração de clorofila e NDCI. O coeficiente de determinação em zonas rasas revela a limitação do índice espectral aplicado a porções com pouca profundidade.

Além das limitações impostas pelos níveis batimétricos, o nível de processamento 1C TOA demonstrou dificuldades relacionadas à análise de dados de séries históricas. Quando comparado com múltiplas datas, os dados evidenciaram um comportamento sistemático que resultou na diminuição da variabilidade para ambos os índices espectrais.

O uso do nível SR revelou essa fragilidade, ao demonstrar comportamento mais heterogêneo aplicado em séries históricas para os dois índices. Em futuras publicações, pretende-se explorar as potencialidades e limitações do nível SR para estimar parâmetros de qualidade da água. Recomenda-se testar a viabilidade das imagens do nível de processamento SR, para a aplicações dos índices espectrais em outras áreas.

Portanto, essa pesquisa documentou a dinâmica da concentração de clorofila do evento de ocorrido em 2021 a partir de dados oficiais, e mesmo tempo contribui para construção de dados bió-ticos para o estado Santa Catarina. Esse conjunto dados são benéficos para iniciativas semelhantes ao BRAZA que reúnem, dados acerca de qualidade da água em escala nacional. Conjuntamente, esse trabalho comprovou uma anomalia sistêmica nos dados do Sentinel-2, sendo importante para futuros trabalhos na área do sensoriamento remoto aquático.

7 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA:

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Plano de recursos hídricos e enquadramento dos corpos de água**. 1 ed. Brasília: ANA. 2013.

ALVINO, F. C. G. et al. Vegetation indices for irrigated corn monitoring. **Engenharia Agrícola**: v.40, n.3, p.322-333. 2020. DOI: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n3p322-333/2020.

BATISTA, L. V. Turbidity Classification of the Paraopeba River Using Machine Learning and Sentinel-2 imagens. **IEE Latin America Transaction**, Nova Iorque: v.20, n.5, p.799-805. 2022.

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.

BRUCE, P; BRUCE, A. **Estatística Prática para Cientistas de Dados**: 50 Conceitos Essenciais. 1 ed. Rio de Janeiro: Alta Books. 2019.

BIER, F. B. **Caracterização morfométrica e hidrológica da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição, Florianópolis – SC**. 2013. 113 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

BUMA, W. G; LEE, S. Evaluation of sentinel-2 and landsat-8 for estimating chlorophyll-a concentrations in Lake Chad, Africa. **Remote Sensing**: v.12, p.1 18. 2023. DOI:10.3390/rs12152437.

CAVALCANTE, J. C; ALMEIDA, C. A; CASTELO, T. B. Análise de NDVI e temperatura da superfície terrestre utilizando a plataforma do *Google Earth Engine* em área de savana amazônica e floresta secundária, no município de Vigia – PA. **Revista de Geociências do Nordeste**, Caicó: v.6, n.1, p. 64-70, jan/jun. 2020.

CASAN (Companhia Catarinense de Águas e Saneamento). **Relatório de Monitoramento da Lagoa da Conceição**. 2021. Disponível em: <[https://www.casan.com.br/ckfinder/userfiles/images/Noticias_Conteudo/Relatorio%20Monitoramento%20Lagoa%20da%20Concei%C3%A7%C3%A3o%20Julho%20-%20analises%20junho%202021%20\(2\)\(4\).pdf](https://www.casan.com.br/ckfinder/userfiles/images/Noticias_Conteudo/Relatorio%20Monitoramento%20Lagoa%20da%20Concei%C3%A7%C3%A3o%20Julho%20-%20analises%20junho%202021%20(2)(4).pdf)>. Acesso em: 7 nov 2025.

CASAN (Companhia Catarinense de Águas e Saneamento). **Trato pela Lagoa fecha 2021 com quase 3mil inspeções e aumento na taxa de regularizações**. 2021. Disponível em: <<https://www.casan.com.br/noticia/index/url/trato-pela-lagoa-fecha-2021-com-quase-3-mil-inspecoes-e-aumento-na-taxa-de-regularizacoes#0>> Acesso em: 7 nov 2025

CASAN (Companhia Catarinense de Águas e Saneamento). **CASAN avalia dados de quatro anos de monitoramento da Lagoa da Conceição**. 2025. Disponível em: <https://www.casan.com.br/noticia/index/url/casan-avalia-dados-de-quatro-anos-de-monitoramento-da-lagoa-da-conceicao#0>. Acesso em 7 nov 2025.

CAZASSA, G. C; SANTOS, M. C; OLIVRIRA, T. G; PEREIRA, P. H. R; GONÇALVES, J. A. C; VIEIRA, E. M. Monitoramento de desastres em rios empregando sensoriamento remoto: Análise comparativa da turbidez e da refletância. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v.9, n.5, p.308-318. 2018. DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2018.005.0027.

CESAR, G. M. KAMPEL, M; STECH, J. Compartimento e caracterização Bio-óptica por satélite das águas de superfície do reservatório de Itumbiara (GO). **GEOGRAFIA**: v.37, n.3, p.509-524. 2012.

CETESB. **Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, Índice do Estado Trófico - IET**. 2013. Disponível em: <<https://www.cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2013/11/04.pdf>>. Acesso em: 21 jul. 2025.

CHEN, J; ZHANG, M; CUI, T; WEN, Z. A review of some important technical problems in respect of satellite sensing of chlorophyll-a concentration in coastal Waters. **IEEE Journal of selected topics in applied earth observation and remote sensing**: v.6, n.5. 2013. DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2242845.

CICERELLI, R. E; GALO, M. L. B. T. Sensoriamento Remoto multifonte aplicada na detecção do fitoplâncton em águas interiores. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande: v.19, n.3, p. 259-265. 2015.

CRACKNELL, A. P. The development of remote sensing in the 40 years. **International Journal of Remote Sensing**: v.39, n.23, p.8387 – 8427. 2018. DOI:10.1080/01431161.2018.1550919.

DIAS, B. B; PARIZOTTO, B. A. D. M; BONETTI, C. Agentes naturais e antrópicos modificadores da qualidade água e dos sedimentos nas áreas marginais da Lagoa da Conceição, SC. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**: v.18, p.33-43. 2014.

DIAS, J. K. **Proposta de compartimentação da Lagoa da Conceição, Florianópolis, SC, através de parâmetros físico-químicos**. 2007. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – UFSC, Florianópolis, 2007.

DUAN, H; ZHANG, B; ZHANG, K; SONG, Z; WANG, Z; LIU, D; LI, D. Estimation of chlorophyll-a concentration and trophic states for inland lakes in Northeast China from Landsat TM data and field spectral measurements. **International Journal of Remote Sensing**: v.29, n.3, p.767-786. 2008. DOI: 10.1080/01431160701355249.

ESA (European Space Agency). **Sentinel-2 User Handbook**. 2 ed. Londres: ESA Standard Document, 2015. 64 p.

FILHO, N. O. H; FELIX, A; CAMARGO, J. M. **Atlas geológico da planície costeira do estado de Santa Catarina em base ao estudo dos depósitos quaternário**. 1ed, Florianópolis: UFSC. 2020. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Alexandre-Felix/publication/347573894_Atlas_geologico_da_planicie_costeira_do_estado_de_Santa_Catarina_em_base_ao_estudo_dos_depositos_quaternarios_AGP_CSC/links/5fe2213e45851553a0e30a2a/Atlas-geologico-da-planicie-costeira-

do-estado-de-Santa-Catarina-em-base-ao-estudo-dos-depositos-quaternarios-AGPCSC.pdf>. Acesso em: 30 de jun. de 2025.

FITZ, P. R. **Geoprocessamento Sem Complicação**. 4 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

FLORENZANO, T. G. **Geomorfologia: conceitos e tecnologias**. 5 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

G1. **Enxurrada atinge casas e arrasta carros na Lagoa da Conceição, em Florianópolis**. G1, Santa Catarina. 25 Jan 2021. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2021/01/25/alagamento-atinge-casas-e-arrasta-carros-na-lagoa-da-conceicao-em-florianopolis-assustador-diz-coordenador-da-defesa-civil.ghtml>>. Acesso em 18 ago. 2025.

GARG, V; AGGARWAL, S. P; CHAUHAN, P. Changes in turbidity Ganga river Sentinel-2 satellite data during lockdown associated with COVID-19. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**: v.11, n.1, p.1175-1195. 2020. DOI: 10.1080/19475705.2020.1782482.

GARG, V et al. Spectral similarity approach for mapping turbidity of a inland waterbody. **Journal of Hydrology**. Wellington: v.550, p.527-537. 2017. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.05.039.

GOMES, M. C. V; JÚNIOR, C. B; VALDATI, J; SILVA, M. P. Vegetação de restinga: condicionantes pedológicos e geomorfológicos em costa de alta energia (Florianópolis-SC). **Geosul**: v.37, n.83, p.72-91. 2022. DOI: 10.5007/2177-5230.2022.e84111.

GORELICK, N. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environmet**: v.202, p.18-27. 2017. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.

GUOFENG, W. et al. Statistical model development and estimation of suspend particulate matter concentrations with Landsat 8 OLI image of Dongting Lake, China. **International Jornal of Remote Sensing**: v.36, n.1, p. 343-360. 2015. DOI: 10.1080/01431161.2014.995273.

GITELSON, A. A; YACOBI, Y. Z; ARNO, K; KRESS, N. Reflectance Spectral of polluted marine Waters in Haifa Bay, Southeastern Mediterran: features and application for remote estimation of chlorophyll concentracion. **Isreal Journal of Earth Science**: v.45, p.127-135. 1996.

GLOBAL SURFACE WATER EXPLORER. **European Commission**, Joint Research Centre. Disponível em: <<https://global-surface-water.appspot.com/>>. Acesso em: 18 jun. 2025.

HORN, L. R. **Caracterização do comportamento da concentração de clorofila-a em uma laguna costeira, com o uso de modelos bio-ópticos de sensoriamento remoto**. 2021. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

HOUBORG, R; MCCABE. M. F. Hign-Resolution NDVI From Planet`s Constellation of Earth observing nano-satellites: a new data source for precision agriculture. **Remote Sensing**: v.8, p.1-19. 2016. DOI:10.3390/rs8090768.

NDMAIS. **Justiça mantém indenização de R\$ 30 mil a morador afetado por desastre da CASAN na Lagoa**. NDMAIS. Santa Catarina. Disponível em < <https://ndmais.com.br/justica/justica-mantem-indenizacao-de-r-30-mil-a-morador-afetado-por-desastre-da-casan-na-lagoa/>>. Acesso em 11 nov. 2025.

LACAUX, J. P et al. Classification of ponds high-spatial resolution resolution remote sensing application to Rift Valley fever epidemics in Senegal. **Remote Sensing of Environment**: v.106, p.66-74. 2007. DOI:10.1016/j.rse.2006.07.012.

IBGE. **Folha SG 22-Z-D Florianópolis**. 1 ed. Rio de Janeiro. IBGE, 2004. Mapa de Geomorfologia. Escala 1:250000.

KRUG, L. A; NOERNBERG, M. A. Extração de batimetria por sensoriamento remoto de áreas rasas dos sistemas estuarinos do Estado do Paraná – Brasil. In: Simpósio brasileiro de sensoriamento remoto – SBSR, 12. 2005. **Anais...** Goiânia: INPE, 2005. p.3077-3084.

LIRA, C. et al. **Sistemas de Informação Geográfica: Análise de Dados de Satélite**. 1 ed. Lisboa: DGRM. 2016.

LOBO, F. L. et al. AlgaeMAP: Algae Bloom Monitoring Application for Inland Waters in Latin America. **Remote Sensing**: v.13, p.1-20. 2021. DOI: 10.3390/rs13152874.

NOVO, E. M. L. M; LONDE, L. R; BARBOSA, C; ARAUJO, C. A. S; RENNÓ, C. D. Proposal for a remote sensing trophic state index based upon Thematic Mapper/Landsat images. **Rev. Ambient. Água**: v.8, n.3, p.65-82. 2013. DOI: 10.4136/ambi-agua.1229.

MACHADO, M.T.S; BAPTISTA, G. M. Sensoriamento Remoto como ferramenta de monitoramento da qualidade da água do Lago Paranoá (DF). **Eng Sanit Ambient**, Rio de Janeiro: v.21, n.2, p.357-365. 2016. MARTINI, L. C; MATTOS, D. S; BARBOSA, D. F; RECH, A. I. Uso de sensoriamento remoto orbital para avaliação da distribuição espacial de Clorofila-a na Lagoa da Conceição-Florianópolis, SC. **Engenharia Sanitária e ambiental**: v. 11, n. 4, p. 318-324, 2006. DOI:10.1590/S1413-41522006000400004.

MARTINS, C. M. **Análise quantitativa da contribuição antrópica de drenagem fluvial na Lagoa da Conceição – SC**. 2016. 91 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Oceanografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

MAKWINJA, R. et al. Monitoring trophic states *in situ* and Sentinel-2 MSI algorithm: lesson from Lake Malombe, Malawi. **Environmental Science and Pollution Research**: v.30, p.29755-29772. 2023. DOI: 10.1007/s11356-022-24288-8.

MARQUETTI, L. M. C. **Experiência de Vitimização Ambiental: o caso da Lagoa da Conceição sob a ótica da criminologia verde**. 2022. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Direito) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

MENESES, P. R; ALMEIDA, T. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. 1 ed, Brasília: UnB. 2012.

MISHRA, S; MISHRA, D. R. Normalized Difference Chorophyll 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.

LOPES, A. R. B. C. **Valoração ambiental aplicada à qualidade da água da Lagoa da Conceição – Florianópolis / SC**. 2007. 158 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

ODRESKI L. F. R. **Influência Hidrológica nos processos hidrodinâmicos da Lagoa da Conceição – Florianópolis – SC**. 2012. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – UFSC, Florianópolis, 2012.

PMF. **Programa Floripa Se Liga na Rede - Relatório Parcial**. CASAN: Florianópolis, Disponível em: <07_03_2018_15.54.14.ce183724a36be6f71dbe305694466427.pdf>. Acesso em: 25 de jun. 2025.

PAULINO, S. R. MARTINS, V. S; NOVO, E. M. L. M; BARBOSA, C. C. F; MACIEL, D. A. WANDERLEY, R. L. N; PORTELA, C. I; CABALLERO, C. B; LIMA, T. M. A. Generation of robust 10-m Sentinel-2/3 synthetic aquatic reflectance bands over inland Waters. **Remote Sensing of Enviroment**: v.318, p. 1-20. 2025. DOI:10.1016/j.rse.2024.114593.

PEARSON, R. L.; MILLER, L. D. **Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado**. Fort Collins: Colorado State University, 1972.

PEREIRA, B; GANDRA, M. M. S; FONSECA, A. L. O. **Nutrientes e gases dissolvidos na coluna da água e teor da matéria orgânica no sedimento ao longo da Lagoa da Conceição e sua relação com o processo de eutrofização**. Expressões Geográficas: v.10, p.1-16. 2015. Disponível em: <<https://biogeoqmar.paginas.ufsc.br/files/2017/07/Pereira-et-al-2015.pdf>>. Acesso em 20 junho. 2024.

PONTE, N. S. C. et al. Estimating Concetration of chophyll-a and suspended sediments in a continental aquatic ecosystem usining remote sensing. **Revista Agro Ambiente**, Boa Vista: v.14, 2020.

PORTELLA, M. D. **Avaliação da qualidade da água de rios em bacias urbanizadas na bacia da Lagoa da Conceição, Florianópolis (SC)**. 2020. 85 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

PORTO FILHO, E. **Sedimentologia e Algumas considerações sobre a Biogeoquímica dos sedimentos de fundo da Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina**. 1993. 373 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – UFSC, Florianópolis, 1993.

QUEIROZ, D. M; VALENTE, D. S. M; PINTO, F. A. C; BORÉM, A. **Agricultura digital**. 2 ed, São Paulo: Oficina de Textos, 2021.

RODRIGUES, R. M. **Avaliação do impacto do sistema de esgoto sanitário na Lagoa da Conceição – Florianópolis – SC**. 1990. 128 f. Dissertação

(Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1990.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. **Proceedings of the 3rd Earth Resources Technology Satellite Symposium**: v.1, p.309-317. 1974.

SENTIWIKI HOME. **Document Library**, European Space Agency. Disponível em:<<https://sentiwiki.copernicus.eu/web/document-library#Library-S2-Documents>>. 14 ago. 2025.

SILVA, J. C. **Análise numérica da influência dos aportes fluviais e antrópicos sobre a hidrodinâmica residual e a qualidade da água da Lagoa da Conceição – Florianópolis – SC**. 2013. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

SILVA, M. L. G. da. **Análise da Qualidade Ambiental Urbana da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição**. 2002. 111f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis. 2002.

SILVA, V. E. C. et al. Influência antrópica e da hidrodinâmica na qualidade da água e na distribuição de nutrientes e clorofila na Lagoa da Conceição – SC. IN: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 22, 2017, Florianópolis. **Anais...** Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 2017, p. 1-8. Disponível em: <<https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/60/PAP022565.pdf>> 7 nov. 2025.

SILVA, V. E. C. **Análise hidrodinâmica e biogeoquímica de uma laguna costeira subtropical em bacia hidrográfica urbanizada: Lagoa da Conceição, Florianópolis, Santa Catarina**. 2021. 159 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

SOUZA JUNIOR, C. M. et al. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing**: v.12, p.1-27. 2020. DOI:10.3390/rs12172735.

WANG, W. et al. Estimation of Chlorophyll-A Concentration with Remotely Sensed Data for the Nine Plateau Lakes in Yunnan Province. **Remote Sensing**: v.14, p.1-19. 2022. DOI: 10.3390/rs14194950.

WEN, Z. et al. Remote sensing of total suspended matter concentration in lakes across China using Landsat images and Google Earth Engine. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**: v.185, p.61-78. 2022. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2022.02.018.

VAN WESTEN, C. J. Remote Sensing and GIS for Natural Hazards Assessment and Disaster Risk Management. **Earth Observation Applications to Landslide Mapping, Monitoring and Modeling**: v.3, n.15, p.241-255. 2013: DOI: 10.1016/B978-0-12-374739-6.00051-8.

XU, M. et al. A spectral space partition guide ensemble method for retrieving chlorophyll-a concentration in inland waters from sentinel-2A satellite imagery. **Journal of great lakes research**: v.45, n.3, p.454-465. 2018. DOI: 10.1016/j.jglr.2018.09.002.

XU, X. et al. Regime shifts in shallow lakes observed by remote sensing and the implications for management. **Ecological Indicators**: v.113, p.1-9. 2020. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106285.