

VALIDAÇÃO QUALITATIVA E DINÂMICA TEMPORAL DO ÍNDICE NDCI PARA MONITORAMENTO DE FLORAÇÕES DE CIANOBACTÉRIAS EM TAPES (RS)

GUILHERME BORZIO RODRIGUES¹; NIKOLAS URRUTIA HEINZ²; VINÍCIUS LIMA GUIMARÃES³; FELIPE DE LUCIA LOBO⁴

¹Universidade Federal de Pelotas – guilhermeborzio95@gmail.com

²Universidade Federal do Rio Grande – nikolasheinz01@gmail.com

³Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – vinicius.lima@inpe.br

⁴Universidade Federal de Pelotas – felipellobo@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

Florações de cianobactérias são cada vez mais frequentes em ambientes lagunares eutrofizados e representam riscos à saúde pública e aos ecossistemas aquáticos (CETESB, 2013; CHORUS & WELKER, 2021). No Brasil, a Resolução CONAMA 274/2000 define 50.000 cél mL⁻¹ como limiar crítico para a balneabilidade. A Organização Mundial da Saúde (OMS) aponta em seu Guia para Ambientes de Águas Recreacionais Seguras (WHO, 2003) que concentrações de 100.000 (cél./mL) ou 50 (µg/L) de concentração de clorofila-a indicam risco para irritações cutâneas e sintomas gastrointestinais, especialmente na presença de espécies produtoras de toxinas.

No Rio Grande do Sul, a Fundação Estadual de Proteção Ambiental (FEPAM) monitora a balneabilidade nas principais cidades turísticas, a partir de coletas *in situ* realizadas durante o verão, divulgando semanalmente os resultados. Tal monitoramento é vital, contudo, é financeiramente e logisticamente oneroso, além de incapaz de garantir a prevenção da exposição humana às cianotoxinas, uma vez que captura de maneira limitada a dinâmica de dispersão espacial e a duração dos eventos de florações (RAGHUL, 2024).

O sensoriamento remoto orbital emerge como uma ferramenta para monitoramento de florações de cianobactérias. Neste sentido, índices espectrais, como o Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI), podem ser utilizados para estimar a concentração de clorofila-a e identificar eventos desta natureza (MISHRA & MISHRA, 2011; LIU, 2020). Partindo dessa premissa, a plataforma Algae Bloom Monitoring Application (AlgaeMap) utiliza imagens do sensor MultiSpectral Instrument (MSI) a bordo dos satélites Sentinel-2A e Sentinel-2B, classificando valores de NDCI acima de 0,025 como florações (LOBO et al., 2021). Este trabalho objetiva avaliar a correlação linear entre as concentrações de cianobactérias da FEPAM e os valores de NDCI do AlgaeMap para pontos de balneabilidade em Tapes/RS, visando validar qualitativamente o NDCI e descrever padrões sazonais de florações de 2020 a 2025.

2. METODOLOGIA

O município de Tapes está localizado na Costa Doce da Laguna dos Patos, no estado do Rio Grande do Sul, Brasil (Lat 30° 40' 22"S, Lon 51° 23' 45"O). A cidade possui balneários (Rebello e Pinvest) que possuem intenso fluxo de turistas no verão, período em que as florações de cianobactérias tendem a ser maiores (CHORUS & WELKER, 2021). Os dados de concentração de cianobactérias (células/mL) foram coletados a partir de informações da FEPAM. Estes dados são disponibilizados semanalmente durante a realização do projeto “Balneabilidade” através de boletins informativos e de um banco de dado em WebGIS, cobrindo o

período de 11 semanas durante o verão. Neste estudo foram considerados os verões de 2020 a 2025. Os pontos de coleta estão localizados nos dois principais balneários da cidade, Rebelo e Pinvest, nas coordenadas: Lat. -30,688 Lon. -51,394 e Lat -30,651 Lon. -51,386 respectivamente.

Os dados de satélite foram obtidos através da plataforma AlgaeMap, desenvolvida para o monitoramento de florações de algas, por meio do processamento de dados de reflectância de sensoriamento remoto (R_{rs}), com correção atmosférica e de *sunglint*, provenientes do sensor MSI. A aplicação calcula o NDCI conforme a equação:

$$NDCI = \frac{R_{rs}(B5) - R_{rs}(B4)}{R_{rs}(B5) + R_{rs}(B4)}$$

Em que B5 refere-se à banda do MSI com comprimento de onda central em 705 nm, intervalo do espectro eletromagnético em que as cianobactérias apresentam máxima sensibilidade de reflectância, e B4 refere-se à banda situada em 665 nm, onde a clorofila-a tem um pico de absorção (LOBO et al., 2021).

Para a extração dos valores de NDCI, foi selecionado um ponto a 200 metros do local de coleta *in situ* da FEPAM para cada balneário, visando evitar efeitos de borda terrestre (areia, vegetação costeira). Para cada data, foram considerados os valores médios do NDCI dos pixels situados em um raio de 250 metros de cada ponto.

A integração dos dados *in situ* da FEPAM com os dados de NDCI do AlgaeMap foi feita em um pareamento temporal que selecionou apenas as datas de imagem de satélite que coincidiam com as datas de coleta *in situ*. Como os valores *in situ* são acumulados semanais, sem informações sobre os dias específicos de coleta, foram calculadas as médias semanais dos valores NDCI, através de uma planilha Excel e agrupados por data. Devido a rigorosidade de critérios de pareamento, limitações impostas por condições climáticas (e.g., cobertura de nuvens sobre a área de estudo) e pela frequência de coleta da FEPAM, um total de 23 pares de dados válidos foram obtidos para o balneário Rebelo e 36 para o balneário Pinvest, utilizados para as análises subsequentes.

A relação entre as concentrações de cianobactérias (*in situ*) e os valores espectrais de NDCI foi investigada através de uma adequação da abordagem de match-up recomendada pelo IOCCG (2011). Todas as rotinas foram implementadas em Python via Google Colab, utilizando as bibliotecas *pandas*, *numpy*, *matplotlib* e *scikit-learn*. O fluxo analítico foi feito em quatro etapas: leitura dos pares NDCI-Ciano em planilha; pré-processamento, onde foi aplicado $\square\square\square_{10}$ às concentrações para reduzir heterocedasticidade; regressão linear simples; e gráfico diagnóstico, onde foi gerado a dispersão com linha de regressão, eixo Y em escala logarítmica e marcação do limiar de 50.000 cél mL⁻¹.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 1 sintetiza a relação entre o NDCI obtido via AlgaeMap e as concentrações de cianobactérias medidas nos balneários Rebelo e Pinvest. É possível observar uma relação linear positiva. À medida em que os valores de NDCI aumentam, as concentrações de cianobactérias logaritmizadas também demonstraram uma tendência crescente. O modelo de regressão linear apresentou um coeficiente de determinação $R^2 = 0.30$, e correlação de Pearson (r_p) igual a 0.548. Este r_p , embora moderado, é considerado aceitável para dados ambientais em sistemas aquáticos complexos, refletindo a variabilidade intrínseca às condições ambientais e às potenciais disparidades temporais e espaciais entre as

coletas *in situ* (semanais) e a revisita do satélite. O modelo demonstrou ser estatisticamente significativo (Prob (F-statistic) = 5.68×10^{-6}), com coeficiente do NDCI apresentando $p = 0.000$.

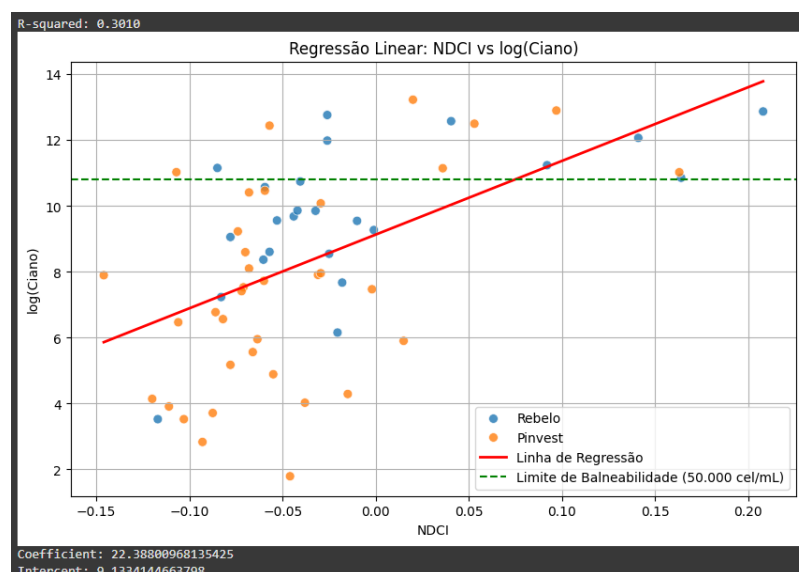


Figura 1: Diagrama de dispersão e correlação entre NDCI e log(Ciano).

A Fig. 2 revela a dinâmica da biomassa fitoplanctônica de 2020 a 2025. Observa-se uma variabilidade temporal significativa, caracterizada por extensos períodos com valores negativos de NDCI ou próximos a zero (outono e inverno), intercaladas por picos acentuados (primavera e verão), que indicam potenciais eventos de floração. Destacam-se picos entre final de 2024 e início de 2025, com NDCI superior a 0.4 (Rebelo) e 0.5 (Pinvest). Essa sazonalidade reforça a natureza dinâmica das florações e a utilidade do sensoriamento remoto para identificar episódios de alta biomassa fitoplanctônica, complementando o monitoramento *in situ* pontual. A similaridade nos padrões temporais e a sobreposição dos dados na Fig. 1 entre os balneários corroboram a robustez e aplicabilidade do NDCI na Costa Doce, embora existam flutuações na intensidade dos picos que podem ser influenciadas por processos hidrodinâmicos locais ou fontes pontuais de nutrientes.

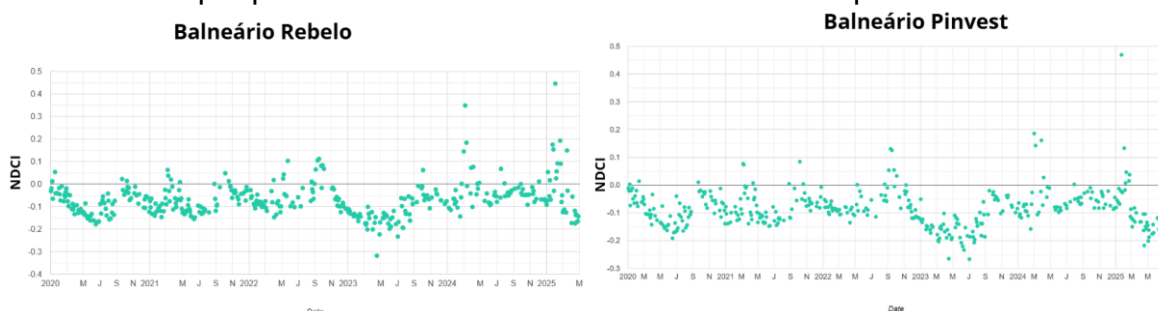


Figura 2: Biomassa de Fitoplâncton entre 2020 e 2025 para os balneários de Tapes.

A análise do limite sanitário da CONAMA (50.000 cél/mL) na Fig. 1 indica que todas as amostras com $NDCI > 0.025$ situam-se acima desse limiar, apontando para ausência de falsos positivos neste conjunto de dados. Esta característica é crucial para sistemas de alerta de balneabilidade, onde a credibilidade depende da minimização de alertas desnecessários. No entanto, foram identificados falsos negativos, onde altas concentrações *in situ* apresentaram NDCI abaixo de 0.025. A sensibilidade do NDCI pode ser limitada por fatores como cobertura de nuvens, interferência óptica de outros constituintes, escala espacial de extração e

disparidade temporal entre o horário de coleta e de visita do satélite. Apesar dos falsos negativos representarem um desafio, sua ocorrência não invalida o NDCI como ferramenta de triagem inicial ou complementar. Nesse sentido, ainda é necessário ampliar a compreensão sobre esses casos, uma vez que a prioridade em alertas de balneabilidade é evitar falsos negativos que subestimam o risco.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no trabalho indicam o potencial de emprego do AlgaeMap como um sistema adicional de monitoramento de florações de cianobactérias na Lagoa dos Patos. A análise temporal realizada entre os anos de 2020 e 2025 apontou que medidas de prevenção, como a orientação aos banhistas, podem ser adotadas quando o NDCI for superior a 0.025, reduzindo custos de amostragem.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Manual de cianobactérias planctônicas: legislação, orientações para o monitoramento e aspectos ambientais. São Paulo: CETESB, 2013.
- CHORUS, Ingrid; WELKER, Martin. Toxic cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management. Taylor & Francis, 2021.
- INTERNATIONAL OCEAN-COLOUR COORDINATING GROUP (IOCCG). Handbook of Satellite Remote Sensing Image Interpretation: Applications for Marine Living Resources Conservation and Management. Dartmouth, Canada: **EU PRESPO and IOCCG**, 2011.
- LIU, Qianqian et al. Probabilistic forecast of microcystin toxin using satellite remote sensing, in situ observations and numerical modeling. **Environmental Modelling & Software**, v. 128, p. 104705, 2020.
- LOBO, Felipe de Lucia et al. AlgaeMAP: algae bloom monitoring application for inland waters in Latin America. **Remote Sensing**, v. 13, n. 15, p. 2874, 2021.
- MISHRA, Sachidananda; MISHRA, Deepak R. Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 117, p. 394-406, 2012.
- RAGHUL, M.; PORCHELVAN, P. A Critical review of remote sensing methods for inland water quality monitoring: progress, limitations, and future perspectives. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 235, n. 2, p. 159, 2024.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Guidelines for safe recreational environments: Volume 1, Coastal and fresh waters**. Geneva: World Health Organization, 2003.