

ANÁLISE DOS PADRÕES ESPAÇO-TEMPORAIS DE CLOROFILA-a NO ESTUÁRIO DA LAGOA DOS PATOS A PARTIR DE DADOS DE SENSORES ORBITAIS

Isadora Bicho Emmendorfer¹

Dinalva Aires de Sales²

Jean Marcel de Almeida Espinoza³

Bento Almeida Gonzaga⁴

Victor Hugbo Lessa Rosolem⁵

RESUMO

Este estudo analisou a variabilidade espacial e temporal da clorofila-a no Estuário da Lagoa dos Patos por meio da análise *EOF*, aplicada a estimativa de concentração de clorofila-a obtida com dados do sensor MSI (*Sentinel-2*). Três padrões principais foram identificados: o primeiro, associado a variabilidade batimétrica; o segundo, ligado a geomorfologia e à ressuspensão de sedimentos em zonas rasas; e, o terceiro, relacionado à troca de massas d'água entre o estuário e o oceano. A análise temporal indicou variações sazonais, plumas estuarinas influenciadas por ventos e vazões, e o acúmulo de biomassa em áreas de baixa hidrodinâmica. Além disso, foi feita uma validação dos dados de clorofila-a estimados, com os dados do sensor *MODIS-Aqua*, indicando forte concordância, onde para concentrações inferiores a 3,5 mg/L, foi observada correlação de 90,20%; já para valores acima de 3,5 mg/L, a correlação foi de 81,77% ($p = 0,10$).

PALAVRAS-CHAVE: Sensoriamento remoto; *Sentinel-2*; *MODIS-Aqua*; Análise *EOF*.

SPATIOTEMPORAL ANALYSIS PATTERNS RECOGNITION OF CHLOROPHYLL-a IN THE PATOS LAGOON ESTUARY BASED ON ORBITAL SENSOR IMAGES

ABSTRACT

This study analyzed the spatial and temporal variability of chlorophyll-*a* in the Patos Lagoon Estuary using Empirical Orthogonal Function (EOF) analysis applied to chlorophyll-*a* concentration estimates derived from MSI (*Sentinel-2*) sensor data. Three main patterns were identified: the first was associated with bathymetric variability; the second was related to geomorphology and sediment resuspension in shallow areas; and the third was linked to water mass exchange between the estuary and the adjacent ocean. The temporal analysis revealed seasonal variations, estuarine plumes influenced by wind and river discharge, and biomass accumulation in areas of low hydrodynamic activity. In addition, the estimated chlorophyll-*a* data were validated against MODIS-Aqua sensor data, showing strong agreement. For chlorophyll-*a* concentrations below 3.5 mg/L, a correlation of 90.20% was observed, whereas for concentrations above 3.5 mg/L, the correlation was 81.77% ($p = 0.10$).

KEYWORDS: Remote sensing; *Sentinel-2*; *MODIS-Aqua*; EOF analysis.

¹ Mestre em Oceanologia, Universidade Federal do Rio Grande – FURG; Doutoranda em Modelagem Computacional, Universidade Federal do Rio Grande – FURG; emmendorferisadora@gmail.com

² Doutora em Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul- UFRGS; Professora na Universidade Federal do Rio Grande – FURG; dinalvaires@gmail.com

³ Doutor em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul- UFRGS; Professor no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – IFSC; jean.espinoza@ifsc.edu.br

⁴ Mestre em Gerenciamento Costeiro, Universidade Federal do Rio Grande; Doutorando em Modelagem Computacional, Universidade Federal do Rio Grande – FURG; profbentoag@gmail.com

⁵ Mestre em Modelagem Computacional, Universidade Federal do Rio Grande; Pesquisador na Universidade Federal do Rio Grande - FURG; vlessarosolem@gmail.com

ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL Y RECONOCIMIENTO DE PATRONES DE CLOROFILA-A EN EL ESTUARIO DE LA LAGUNA DE LOS PATOS MEDIANTE IMÁGENES DE SENSORES ORBITALES

RESUMEN

Este estudio analizó la variabilidad espacial y temporal de la clorofila-*a* en el Estuario de la Laguna de los Patos mediante el análisis de Funciones Ortogonales Empíricas (EOF), aplicado a las estimaciones de concentración de clorofila-*a* obtenidas a partir de datos del sensor MSI (Sentinel-2). Se identificaron tres patrones principales: el primero, asociado a la variabilidad batimétrica; el segundo, relacionado con la geomorfología y la resuspensión de sedimentos en zonas someras; y el tercero, vinculado al intercambio de masas de agua entre el estuario y el océano. El análisis temporal indicó variaciones estacionales, plumas estuarinas influenciadas por los vientos y los caudales fluviales, así como la acumulación de biomasa en áreas de baja actividad hidrodinámica. Además, se realizó una validación de los datos estimados de clorofila-*a* utilizando los datos del sensor MODIS-Aqua, mostrando una fuerte concordancia. Para concentraciones de clorofila-*a* inferiores a 3,5 mg/L, se observó una correlación del 90,20%; mientras que para valores superiores a 3,5 mg/L, la correlación fue del 81,77% ($p = 0,10$).

PALABRAS CLAVE: Percepción Remota; *Sentinel-2*; *MODIS-Aqua*; Análisis EOF.

INTRODUÇÃO

As zonas costeiras são ecossistemas de grande importância, sendo diretamente influenciadas pelas atividades humanas, como: urbanização, turismo, transporte hidroviário e aquicultura. A qualidade da água considera as características Físico-Químicas da água. No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), é um órgão do governo brasileiro que define normas e padrões para a qualidade da água, estabelecendo critérios e padrões para o uso (BRASIL, 2005).

Entretanto, monitorar a qualidade das águas nessas regiões torna-se um desafio por diversos fatores, como por exemplo, a logística intrínseca para obtenção dos dados. As abordagens tradicionais, como as medições e levantamentos em campo, apresentam limitações em termos de custo, escala espacial, eficiência e produtividade, quando comparados a métodos de sensoriamento remoto, principalmente em locais onde são necessárias análises com grande cobertura espacial e temporal (GHOLIZADEH; MELESSE; REDDI, 2016).

A clorofila-*a* é um parâmetro indicativo da qualidade da água nos ambientes aquáticos costeiros e serve muitas vezes como auxílio para identificar se o ambiente está com *blooms* de fitoplâncton. Quando em altas concentrações, afeta diretamente a qualidade da água (GHOLIZADEH; MELESSE; REDDI, 2016; MARKOGIANNI *et al.*, 2020).

Partindo desse pressuposto, este trabalho teve como objetivo mapear a distribuição da clorofila a partir de estimativas geradas com imagens do sensor multiespectral MSI dos satélites Sentinel-2 (A e B), validando esses valores por meio da comparação com dados de produtos de

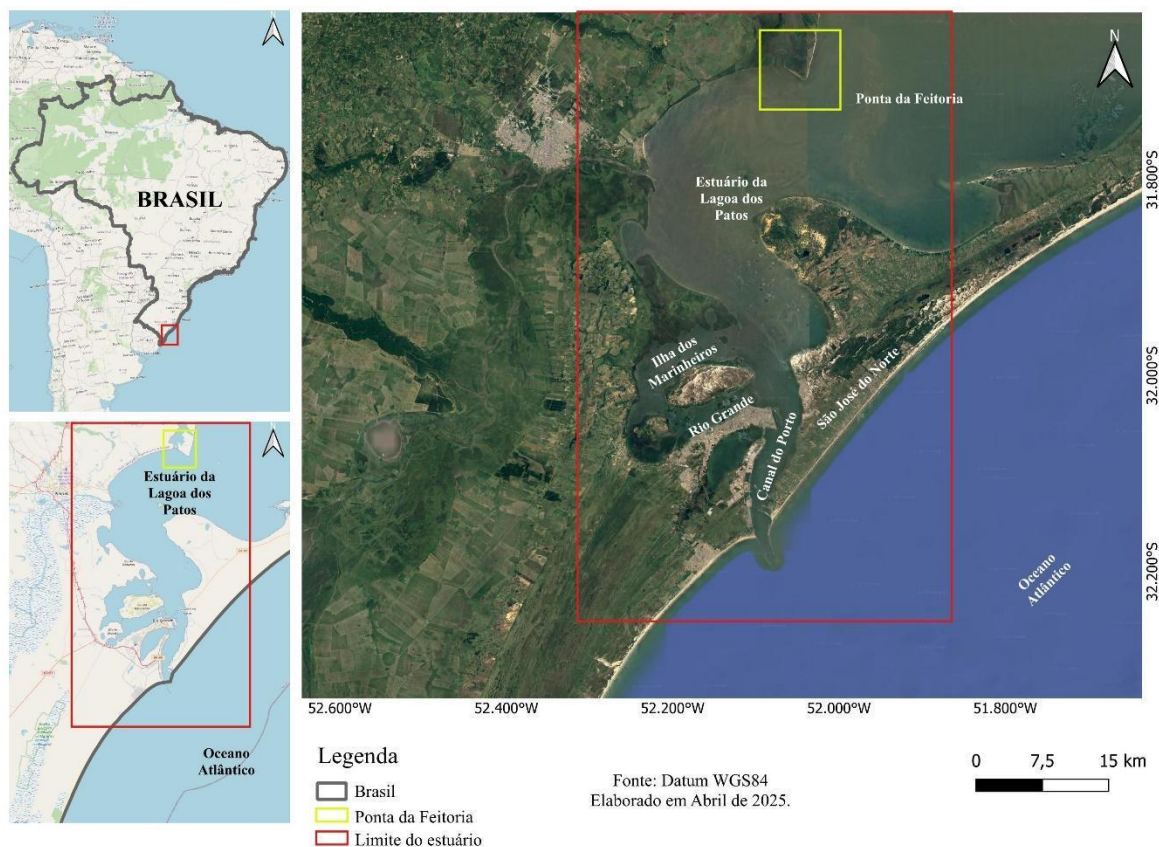
clorofila MODIS-Aqua. Em sequência, foram determinados os padrões espaço-temporais da Clorofila por meio do uso de funções ortogonais empíricas (EOFs), correlacionando os padrões evidenciados com características físicas do ambiente analisado.

METODOLOGIA

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no estuário da Lagoa dos Patos (Figura 1), sendo uma região de grande importância socioeconômica e ambiental, sendo habitat de diversas espécies com grande interesse econômico e cultural. Apesar do nome “Lagoa dos Patos”, em critérios geomorfológicos ela é uma laguna, onde a sua área estuarina localiza-se na porção sul, sua ligação com o Oceano Atlântico é por meio de estrutura de molhes (Molhes da Barra), o seu limite máximo ao norte, é conhecido como Ponta da Feitoria (delimitado pelo polígono amarelo). A representação batimétrica do estuário da Lagoa dos Patos está representada pela (Figura 2), onde observamos que na região do canal de navegação contém as maiores profundidades (abaixo de -18 m).

Figura 1 - Localização da área de estudo.

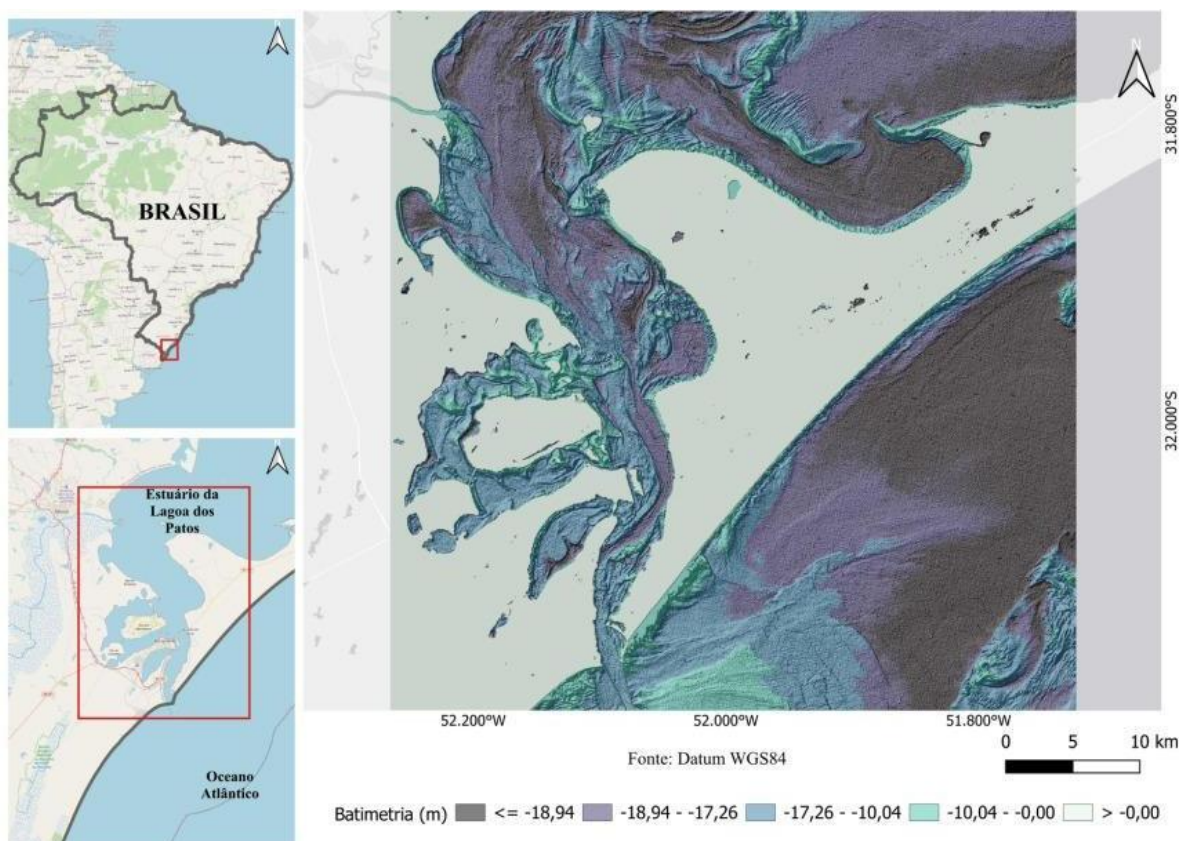


Fonte: Autores.

O estuário da Lagoa dos Patos pode ser classificado como um estuário de barra ou lagoa costeira, do tipo estrangulado, o qual está conectado ao Oceano Atlântico por um canal estreito, através do qual ocorrem processos de mistura e trocas com o oceano, gerando altas velocidades de correntes, principalmente em fluxos de vazante em períodos de alta descarga fluvial (FERNANDES et al., 2005). A hidrodinâmica dentro do estuário é mais intensa nos canais do que nas águas rasas marginais, sendo influenciada pelas interações entre os índices pluviométricos e de ventos, que alteram o nível da lagoa, definindo os regimes de enchente no estuário (entrada da água costeira oceânica no estuário) ou de vazante (escoamento da água estuarina para o oceano) (FERNANDES et al., 2010).

Nas margens do estuário está localizada a cidade do Rio Grande, onde existe um complexo portuário, o qual recebe efluentes ricos em matéria orgânica de diferentes origens e constituições, como domésticos, de indústrias de alimentos e de atividades portuárias de cargas e descargas de pescados e grãos vegetais (BAUMGARTEN; PAIXÃO, 2013).

Figura 2 - Mapa de batimetria da área de estudo.

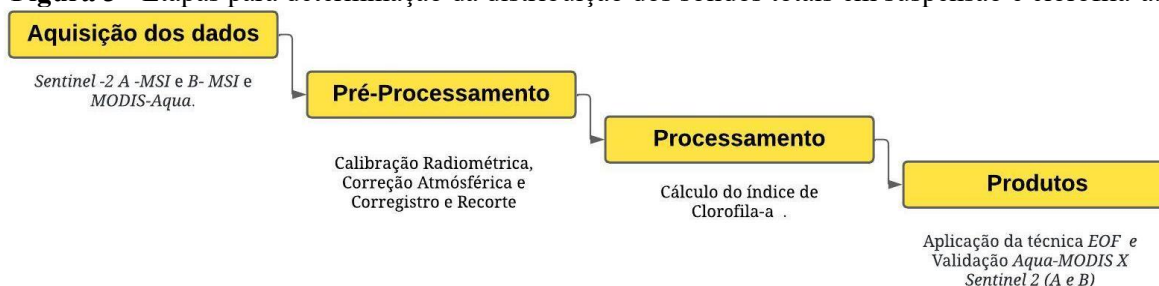


Fonte: Autores.

AQUISIÇÃO DOS DADOS E PROCESSAMENTO

A metodologia do trabalho pode ser sintetizada pela Figura 3, sendo subdividida em quatro etapas: aquisição dos dados, pré-processamento das imagens, processamento e análise.

Figura 3 - Etapas para determinação da distribuição dos sólidos totais em suspensão e clorofila-a.



Fonte: Autores.

Foram adquiridas 34 imagens pelo sensor *MultiSpectral Instrument* (MSI), a bordo dos satélites *Sentinel-2A* e *Sentinel-2B* da Agência Espacial Europeia (ESA). O sensor MSI da missão *Sentinel-2* (S2) adquire 13 bandas espectrais com resolução espacial de 10, 20 e 60 metros, aqui em nossa latitude e longitude, com resolução espacial de 10m.

Para cada imagem do sensor MSI, realizamos o processamento, dividindo-o em 4 etapas, sendo elas: (1) Aquisição das imagens; (2) pré-processamento; (3) processamento; e (4) análise dos dados.

A etapa de Pré-processamento foi realizada por meio do Plug-in SCP (*Semiautomatic Classification Plugin* - SCP) do QGIS, realizando as correções radiométricas, atmosféricas e geométricas, abrangendo o cálculo de refletância no Topo da Atmosfera (TOA), o cálculo de refletância de superfície (BOA), e o corregistro geoespacial no sistema de referência WGS84 UTM 22S. Na etapa de processamento, para determinar a concentração de Clorofila-a utilizou-se a Calculadora Raster do QGIS, para realizar uma álgebra de bandas afim com objetivo de calcular e obter a Clorofila-a, a partir das equações 1.

DOM-Clorofila: Representa a concentração estimada de matéria orgânica dissolvida (DOM) em mg/L, com base no comportamento espectral da clorofila-a.

$$DOM_Clorofila_a = K_1 \cdot e^{\left(K_2 \cdot \frac{B_3}{B_4}\right)}$$

Onde,

B₃: Banda espectral do verde (valor central: 0,560 µm). B₄: Banda espectral do vermelho (valor central: 0,665 µm). K₁ e K₂ são constantes calibradas para dados MSI-S2, derivadas de estudos prévios (PAHLEVAN et al., 2017; POTES et al., 2018; PAHLEVAN et al., 2019; ESPINOZA et al., 2024), que analisaram soluções com diferentes concentrações de clorofila-a.

Além disso, foram utilizados dados do sensor *MODIS* (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), a bordo do satélite *Aqua*, obtidos por meio da plataforma *Ocean Color* da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Esses dados *MODIS-Aqua* trazem estimativas de clorofila-a, geradas com base no algoritmo OCI (HU et al., 2019), apresentam resolução espacial de aproximadamente 1 x 1 km e foram empregados para validar os resultados das estimativas de concentração de clorofila-a obtidas a partir de dados *Sentinel-2*, obtidos neste estudo.

Para isso, foi utilizada uma imagem referente ao dia 20 de novembro de 2021, a qual foi comparada com uma imagem da mesma data proveniente do sensor MSI do satélite *Sentinel-2A*. A validação foi realizada por meio de ajuste de regressão linear (*fitting*), com a aplicação de um filtro para remoção de outliers, que considerou válidos os pontos dentro de um intervalo de $\bar{x} \pm 2\sigma$, e realização de teste de significância com nível de confiança de 90%, considerado adequado para a limitação da amostra. Para isso, foram selecionados 1.835 pontos contidos na área de estudo; foram extraídos os valores pontuais dos dados dos sensores *MODIS-Aqua* e *MSI/Sentinel-2* referentes à data de 20 de novembro de 2021. Esses pontos foram inicialmente agrupados em duas classes de valores com base na concentração de clorofila-a e na natureza bimodal da distribuição do histograma de valores: (1) uma classe contendo 438 pontos, compreendendo valores acima de 3,5 mg/L de concentração estimada de clorofila-a; e (2) uma segunda classe contendo 1.397 pontos, compreendendo valores abaixo desse limite de 3,5 mg/L de concentração estimada de clorofila-a. Após o processo de ajuste e filtragem, foram mantidos 139 pontos da classe de valores acima de 3,5 mg/L e 618 da classe com valores abaixo de 3,5 mg/L, totalizando 757 pontos considerados válidos.

Para a extração dos padrões espaço-temporais das variáveis analisadas, utilizou-se a abordagem de análise por Funções Empíricas Ortogonais (*EOFs*). Essa metodologia permite descrever a variabilidade temporal e espacial de um conjunto de dados em termos de funções ortogonais, escritas como seus padrões (autofunções) e respectivos pesos de importância (autovalores). Normalmente, as primeiras autofunções representam a maior proporção da variância total da série, contendo somadas 90% ou mais da variância total, representada por seus autovalores. Cada um desses padrões (autofunções) associa-se a fenômenos com diferentes escalas espaciais e temporais. As Funções Empíricas Ortogonais foram criadas e são amplamente utilizadas para representar padrões oceanográficos e climatológicos (BJÖRNSSON; VENEGAS, 1997). Na aplicação da técnica de *EOF* pode-se obter a variação de uma propriedade qualquer no espaço e no tempo, como a soma de um número de termos

finitos de *EOFs* em (x,y), representando a variabilidade espacial, com amplitude $um(t)$, representando a variabilidade temporal. A componente principal (PC) informa como a amplitude de cada *EOF* varia com o tempo. A *EOF* contém a estrutura espacial dos fatores de variação com maior importância temporal na variação da propriedade de X. A saída da análise *EOF* compreende uma matriz que demonstra a variabilidade espaço-temporal de cada valor de dado de entrada. A saída “L” gerada é uma matriz diagonal que representa a contribuição relativa de cada valor de *EOF*. Neste sentido, *EOF* representa a matriz de autovetores, e “L” a matriz de autovalores. Com a matriz “L” foi possível obter a contribuição percentual de cada *EOF*, dividindo cada valor de “L” pela soma dos mesmos e multiplicando por 100. Assim, determinando quais os maiores valores de “L” em porcentagem, ou seja, a maior variabilidade (BJÖRNSSON; VENEGAS, 1997). Neste sentido, a matriz PC representa as imagens reconstruídas, sendo calculadas pela multiplicação da matriz *EOF* pela matriz L, conferindo a análise.

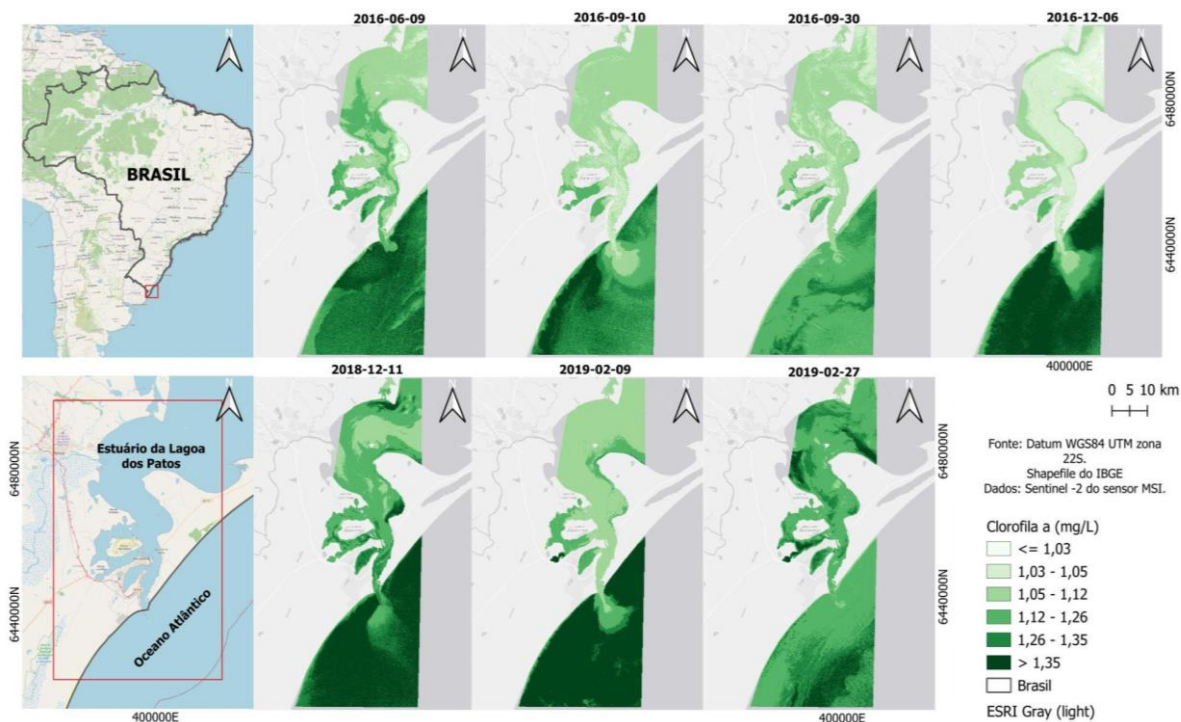
Para a aplicação neste trabalho, as imagens de clorofila-a que formaram a série temporal foram empilhadas em um único raster multicanal e, então, convertidas para o formato Erdas-74, que organiza todos os pixels de uma dada imagem em uma única coluna, sendo processadas no software GNU Octave utilizando o método de Björnsson e Venegas (1997). Com isso, a imagem da série temporal passou a assumir os pixels dispostos sequencialmente, linha a linha, e cada coluna passou a representar uma data de amostragem desse pixel, sendo isso necessário para a análise. Como somente as primeiras *EOFs* já reconstroem praticamente toda a variabilidade dos dados, apenas as três primeiras componentes foram reconstruídas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao observar as concentrações de clorofila-a no período de junho de 2016 a fevereiro de 2019 (Figura 4), observa-se um padrão consistente de maiores concentrações de clorofila-a no Saco da Mangueira em relação às demais áreas estuarinas internas, possivelmente associado à baixa hidrodinâmica local e à consequente retenção de biomassa fitoplânctônica. Em contraste, a região oceânica adjacente frequentemente apresenta valores elevados ($>1,35$ mg/L), sugerindo forte influência da dinâmica costeira e/ou maior produtividade associada à pluma estuarina. Em datas específicas (09/06/2016 e 11/12/2018), a distribuição espacial da clorofila-a acompanha o eixo do canal de navegação, indicando controle hidrodinâmico sobre o transporte e redistribuição da biomassa. De forma consistente, nas imagens de 10/09/2016, 06/12/2016, 11/12/2018 e 09/02/2019, identifica-se a pluma do estuário da Lagoa dos Patos,

marcada por um gradiente bem definido de clorofila-a entre o ambiente estuarino e o oceânico adjacente, evidenciando exportação de matéria orgânica e nutrientes para a plataforma costeira.

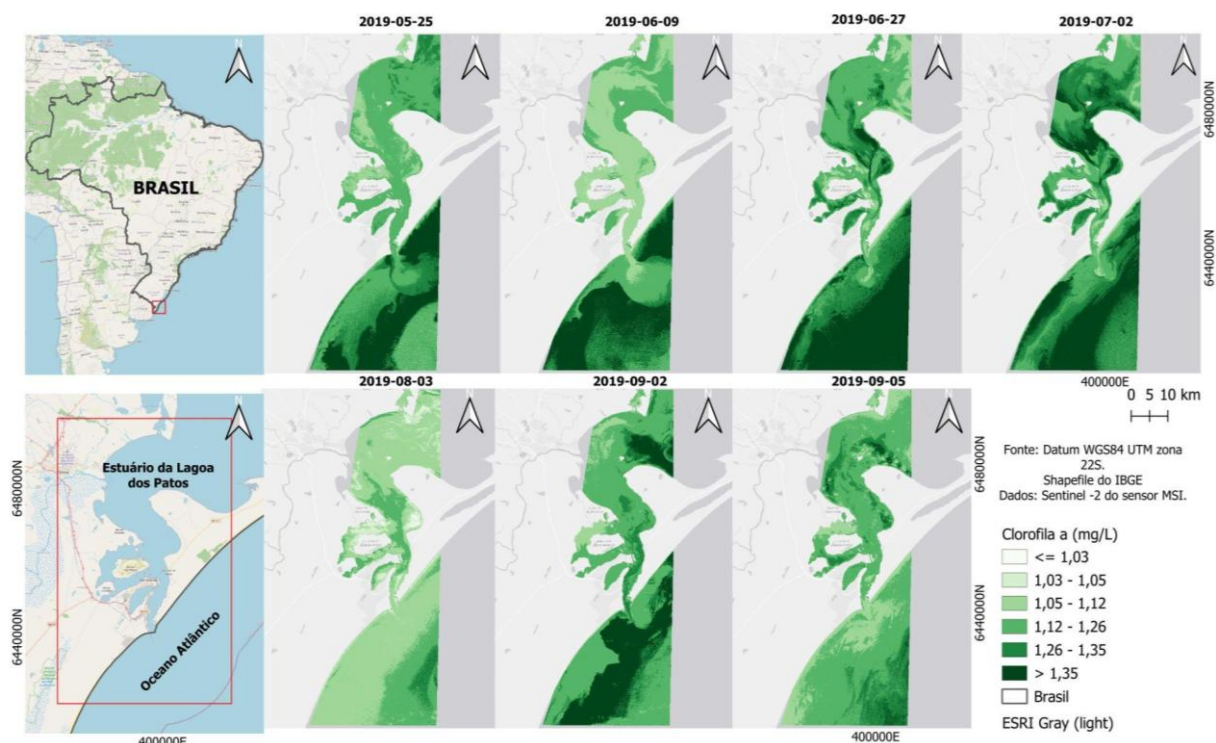
Figura 4 - Concentração de Clorofila -a estimada para o Estuário da Lagoa dos Patos para as datas de 2016-06-09, 2016-09-10, 2016-09-30, 2016-12-06, 2018-12-11, 2019-02-09 e 2019-02-27.



Fonte: Autores.

No período de maio a setembro de 2019 (Figura 5), observa-se a presença de uma pluma estuarina bem definida até meados de julho, enquanto nos meses de agosto e setembro esse padrão torna-se menos evidente, sugerindo alterações nas condições hidrodinâmicas e/ou na dinâmica de produção fitoplanctônica. Em 09/06/2019, predominam baixas concentrações de clorofila-a ($<1,03$ mg/L) em quase toda a extensão do estuário, com valores ligeiramente superiores restritos às enseadas e à porção norte, indicando heterogeneidade espacial associada a áreas de maior retenção. Em 03/08/2019, registram-se as menores concentrações médias do período, com distribuição espacial possivelmente influenciada pela batimetria local, o que pode refletir efeitos indiretos na circulação e na turbidez da coluna d'água. Nas demais datas analisadas, os valores médios de clorofila-a permanecem acima de 1,12 mg/L.

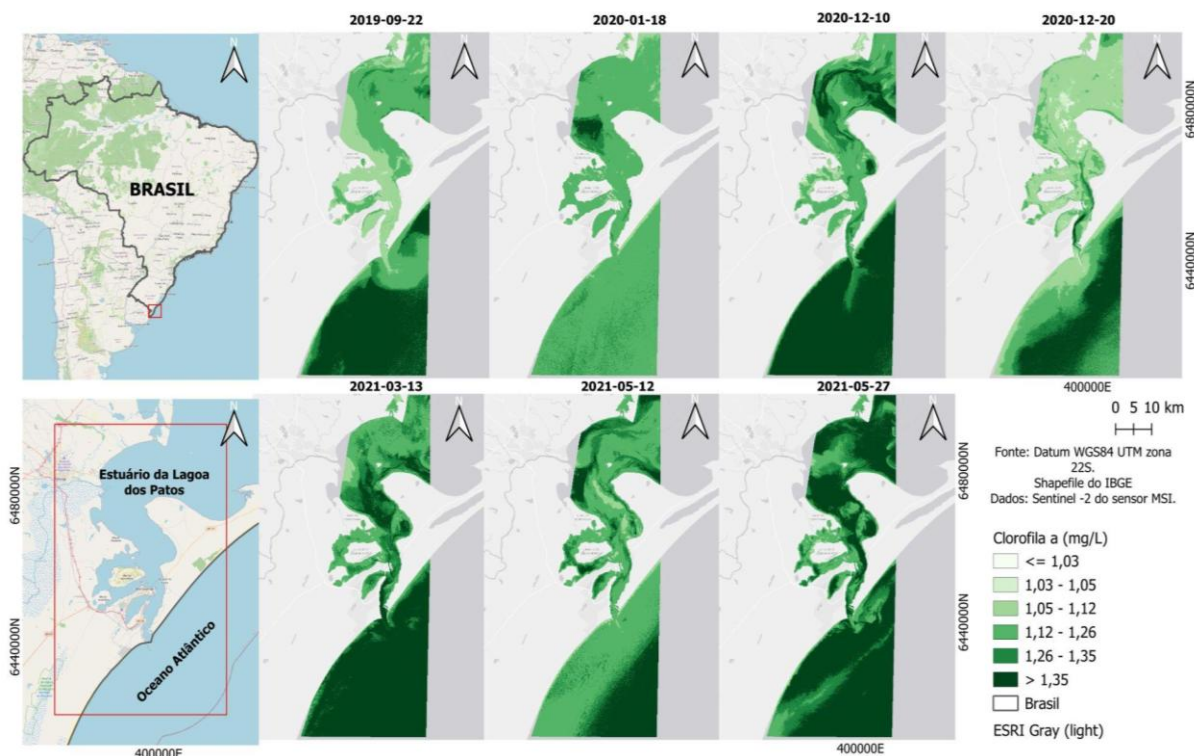
Figura 5 - Concentração de Clorofila -a estimada para o Estuário da Lagoa dos Patos para as datas de 2019-05-25, 2019-06-09, 2019-06-27, 2019-07-02, 2019-08-03, 2019-09-02, 2019-09-05.



Fonte: Autores.

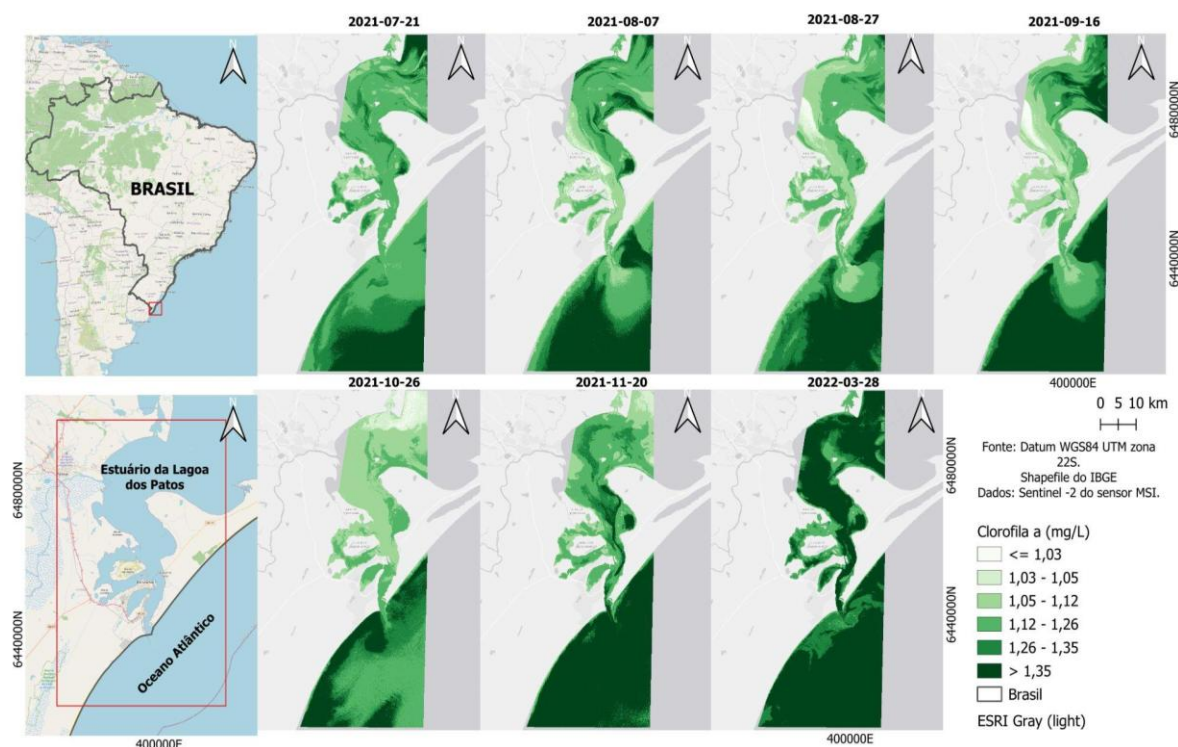
Durante o período de setembro de 2019 a maio de 2021 (Figura 6), observa-se que apenas na data de 22/09/2019 há uma pluma estuarina desenvolvida, possivelmente influenciada pela ação dos ventos. Nessa mesma data, registram-se também os menores valores de concentração de clorofila-a no estuário, variando entre 1,03 e 1,12 mg/L. Na imagem de 20/12/2020 apresenta valores semelhantes, com baixa concentração de clorofila-a. Por outro lado, em 2021, observa-se um aumento nas concentrações de clorofila tanto na região estuarina quanto na porção oceânica, com valores frequentemente acima de 1,26 mg/L. Esse padrão é particularmente evidente na imagem de 27/05/2021, na qual a alta concentração se destaca de forma mais ampla e expressiva, indicando um possível pico de produtividade na região.

Figura 6 - Concentração de Clorofila-a estimada para o Estuário da Lagoa dos Patos para as datas de 2019-09-22, 2020-01-18, 2020-12-10, 2020-12-20, 2021-03-13, 2021-05-12 2021-05-27.



No período de julho de 2021 a março de 2022 (Figura 7), observa-se a formação de uma pluma estuarina de menor intensidade nos meses de agosto, setembro e outubro, indicando variabilidade na exportação de água estuarina em direção à zona costeira. Esse padrão sugere influência de forçantes meteorológicas, especialmente a ação dos ventos, que modulam a circulação superficial e o transporte de massas d'água no sistema. De forma recorrente, as enseadas apresentam maiores concentrações de clorofila-a em comparação às demais áreas do estuário, o que pode estar associado à baixa hidrodinâmica local e à maior retenção de nutrientes, favorecendo o desenvolvimento fitoplancônico. Em 20/11/2021 e 28/03/2022, registram-se picos de concentração, com valores superiores a 1,12 mg/L e chegando a >1,35 mg/L em março de 2022, possivelmente relacionados a variações sazonais de temperatura e condições de estabilidade da coluna d'água.

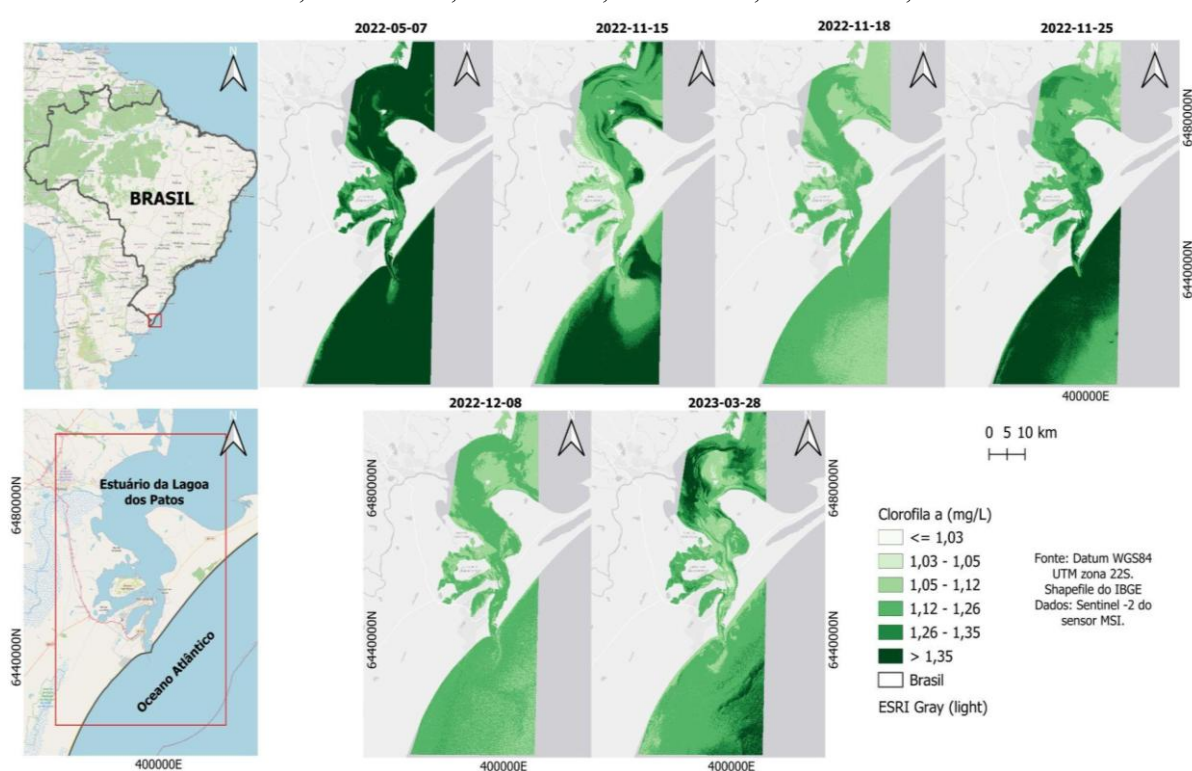
Figura 7 - Concentração de Clorofila -a estimada para o Estuário da Lagoa dos Patos para as datas de 2021-07-21, 2021-08-07, 2021-08-27, 2021-09-16, 2021-10-26, 2021-11-20, 2022-03-28



Fonte: Autores.

No período de maio de 2022 a março de 2023 (Figura 8), observa-se um pico expressivo de concentração de clorofila-a em 07/05/2022, com valores superiores a 1,35 mg/L no interior do estuário. Em novembro e dezembro de 2022, as concentrações tornam-se mais moderadas, sugerindo redução da biomassa fitoplanctônica no período. Em 15/11/2022, destaca-se a presença de uma pluma estuarina bem desenvolvida, possivelmente associada à maior vazão fluvial e/ou à atuação dos ventos na modulação da circulação superficial. Nas demais datas analisadas, não se observa a formação de plumas bem definidas, indicando menor exportação de água estuarina para a zona costeira ou maior homogeneização espacial da coluna d'água.

Figura 8 - Concentração de Clorofila-a estimada para o Estuário da Lagoa dos Patos para as datas de 2022-05-07, 2022-11-15, 2022-11-18, 2022-11-25, 2022-12-08, 2023-03-28.



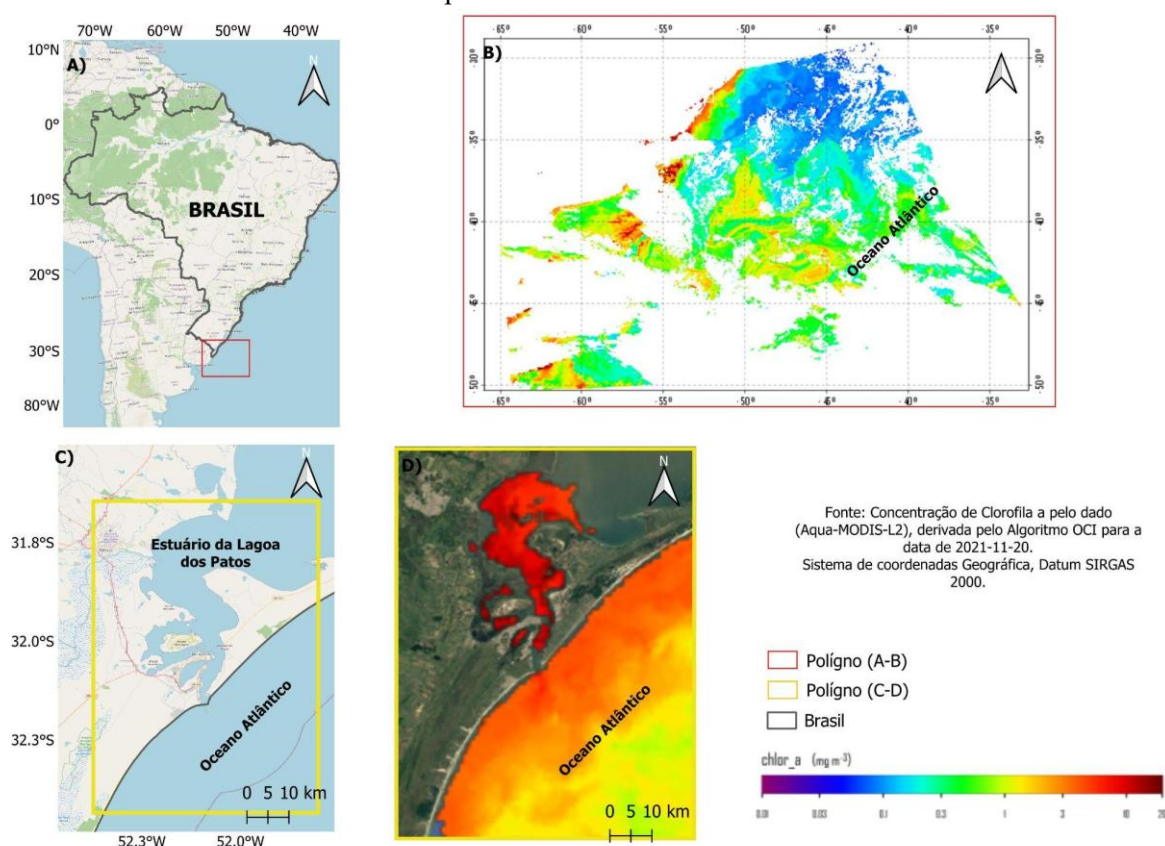
Fonte: autores

Por fim, vale ressaltar que o sistema estuarino da Lagoa dos Patos, especialmente na região do portuária, apresenta forte controle antrópico associado às atividades de dragagem, manutenção do canal de navegação e expansão da infraestrutura portuária, o que intensifica processos de ressuspensão sedimentar e assoreamento recorrente (SILVA, 2019; SILVA, 2023). Estudos hidrodinâmicos indicam que alterações estruturais nos molhes da barra modificam significativamente os padrões de circulação e transporte de sedimentos no estuário, com implicações diretas sobre a distribuição de material particulado em suspensão (FERNANDES et al., 2007). Nesse contexto, o setor portuário, somado a possíveis aportes de efluentes de origem urbana e industrial, pode atuar como fonte adicional de perturbação físico-química, contribuindo para o aumento da turbidez e para a introdução e remobilização de contaminantes associados às atividades de navegação, dragagem e da indústria de fertilizantes (BARBOSA et al., 2012). Em conjunto, esses processos reforçam a elevada complexidade biogeoquímica do estuário, na qual a interação entre sedimentos, matéria orgânica e coluna d'água compromete a distinção espectral entre constituintes ópticos, impondo limitações importantes à estimativa de parâmetros bio-ópticos por sensoriamento remoto em águas costeiras.

VALIDAÇÃO DAS ESTIMATIVAS: COMPARATIVOS *MODIS-AQUA* VS. *MSI SENTINEL-2* (A & B)

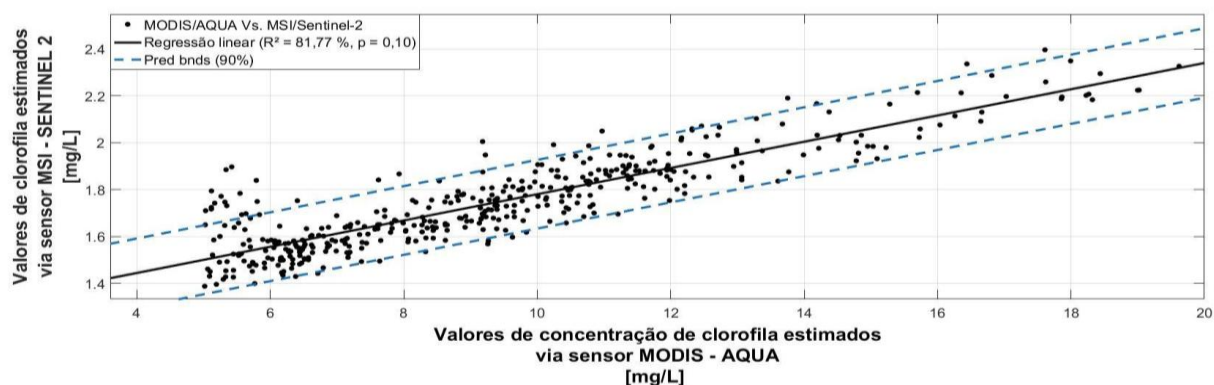
A validação dos dados foi realizada com base na extração de valores pontuais extraídos do produto de clorofila-a do sensor *MODIS* do satélite *Aqua* (gerada pelo algoritmo OCI, HU, et al. 2019) (Figura 9), os quais foram comparados com os resultados obtidos de clorofila-a da mesma data a partir do processamento da imagem do sensor *MSI* dos satélites *Sentinel-2* (A e B). Esta abordagem permitiu avaliar a acurácia das estimativas geradas, garantindo que os dados derivados do *Sentinel-2* apresentassem correspondência com os valores disponibilizados pelo sensor *MODIS*, sendo um dado amplamente utilizado como referência em estudos de sensoriamento remoto da qualidade da água (MOORE; CAMPBELL; DOWELL, 2009; KUMAR; BUBU; SHUKLA, 2014)

Figura 9 - Dado de clorofila a obtido pela *Ocean Color* da *NASA*, Algoritmo OCI (Hu, et. al, 2019), correspondente à data de 2021-11-20.



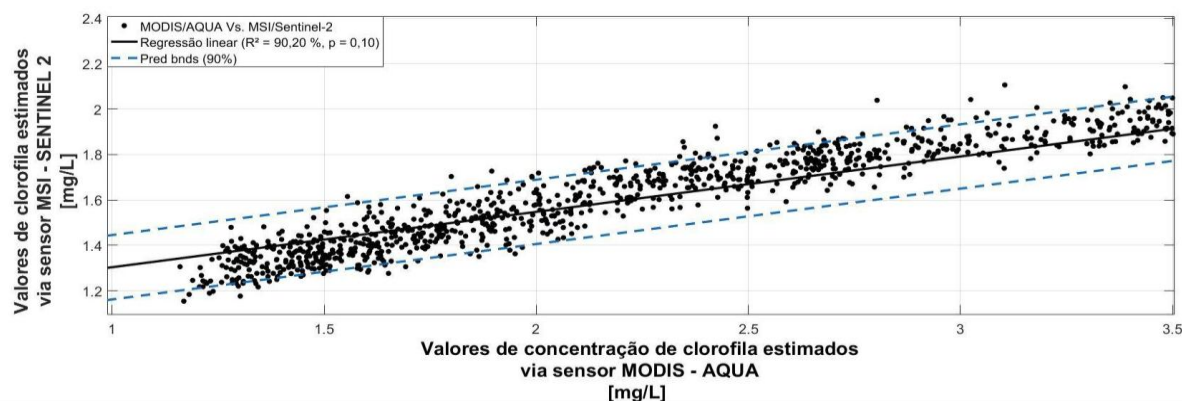
Fonte: Autores

Comparando os dados estimados de clorofila-a obtidos pelo sensor *MSI*, do *Sentinel-2*, com os valores correspondentes do sensor *MODIS-Aqua*, observou-se, para a faixa de concentrações acima de 3,5 mg/L, uma correlação de 81,77%, com *p*-valor igual a 0,10, exibindo o nível de confiança desses resultados (Figura 10).

Figura 10 - Subdivisão dos valores de clorofila-a de valores acima de 3,5 mg/L.

Fonte: Autores

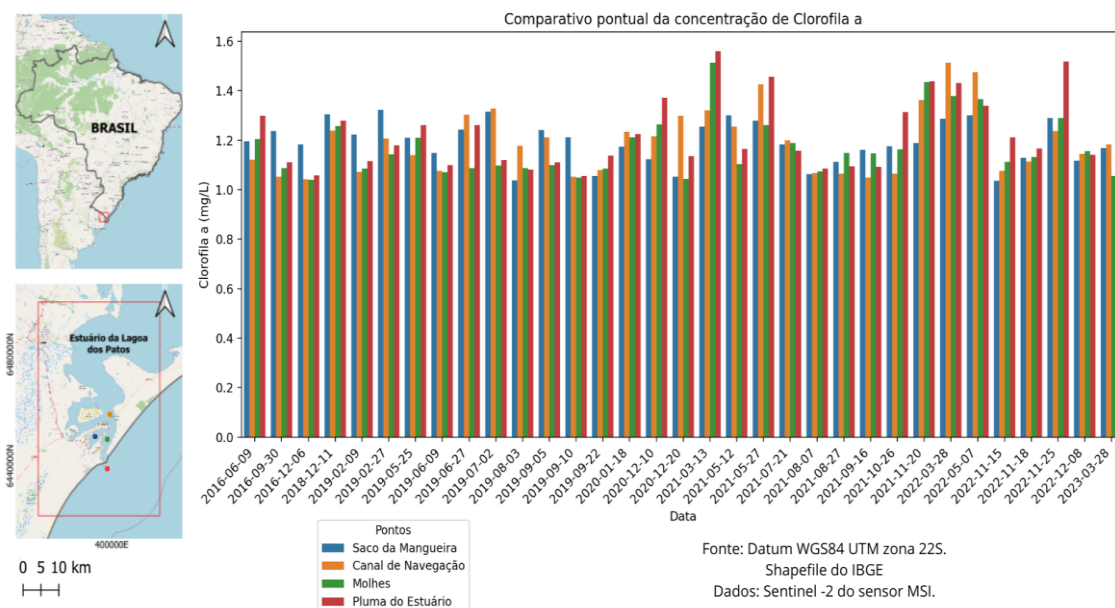
Considerando a faixa de concentrações de clorofila-a inferiores a 3,5 mg/L, foi observada uma correlação de 90,20% entre os dados estimados pelo sensor *MSI* do satélite *Sentinel-2* e os dados do sensor *MODIS-Aqua*. Esse resultado evidencia uma forte concordância entre as estimativas fornecidas por ambos os sensores, especialmente em concentrações mais baixas (Figura 11). Estudos como o de Aranha et al. (2022) apresentam resultados semelhantes, onde a concentração de clorofila-a foi estimada a partir do sensor *MSI* do *Sentinel-2* e validada com dados obtidos *in situ*, o modelo resultante apresentou uma correlação de 80%, demonstrando o potencial do sensor *MSI* para o monitoramento da clorofila-a em ambientes aquáticos, especificamente em um reservatório localizado no estado do Ceará, Brasil. De forma semelhante, no estudo de Poddar, Chacko e Swain (2019), conduzido na Baía de Bengala, foi obtida uma correlação de 79,5% entre os dados estimados por sensores orbitais (*OLI/Landsat-8* e *MSI/Sentinel-2*) em comparativo a dados de campo; entretanto, os autores observaram que o sensor *MSI* superestimou a concentração de clorofila-a em determinados pontos, quando comparado ao sensor *OLI*, indicando a necessidade de ajustes ou calibração específica em algumas condições ambientais.

Figura 11 - Subdivisão dos valores de clorofila -a de valores abaixo de 3,5 mg/L.

Fonte: Autores

A partir da extração pontual da concentração de Clorofila a para as regiões do Saco da Mangueira, Canal de Navegação, Molhes e Pluma do Estuário, observa-se de forma geral, que a Pluma do Estuário tem as maiores concentrações de clorofila-a, o que é normalmente esperado para regiões típicas de plumas estuarinas, onde, são geralmente enriquecidas por nutrientes transportados do ambiente estuarino para o marinho (Figura 12). O Saco da Mangueira por sua vez, apresenta concentrações ligeiramente menores e mais estáveis ao longo do tempo, entretanto, nas datas iniciais da série temporal, observam-se valores mais elevados de clorofila-a neste ponto, esse comportamento pode estar relacionado à baixa hidrodinâmica e à reduzida renovação da água no local, favorecendo o acúmulo de biomassa fitoplanctônica. Outra possibilidade, é que esses picos podem também refletir a ocorrência de blooms de algas, como também sugerem as distribuições espaciais observadas nas Figuras 4 a 8, sendo a Figura 6 representativa desses eventos de maior intensidade. Em contrapartida, o Canal de Navegação e os Molhes apresentaram, em geral, valores intermediários de clorofila-a, o que pode refletir uma condição de transição entre ambientes mais protegidos (como o Saco da Mangueira) e áreas com maior influência de trocas hidrodinâmicas com o mar aberto.

Figura 12 - Comparação pontual da concentração de clorofila a nos pontos: Saco da Mangueira, Canal de Navegação, Molhes e Pluma do Estuário.



Fonte: Autores

De forma geral, a detecção e interpretação de padrões espaciais de clorofila-a em ambientes estuarinos por sensoriamento remoto são fortemente condicionadas pela variabilidade óptica da coluna d'água. Conforme destacado por Aurin & Dierssen (2012), esses sistemas apresentam elevada complexidade bio-óptica, na qual a presença simultânea de fitoplâncton, matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM) e, sobretudo, sedimentos em suspensão altera significativamente o sinal espectral registrado pelos sensores orbitais. Os autores demonstram que, em regiões como o estuário de *Long Island Sound*, a absorção da luz em comprimentos de onda azuis é dominada pelo CDOM e por partículas não-algais, enquanto a contribuição do fitoplâncton representa frequentemente menos de 20% da absorção total, o que mascara a assinatura espectral da clorofila-a e dificulta sua recuperação por algoritmos padrão.

Neste sentido, aumentos na turbidez associados a maior carga de material em suspensão podem intensificar a dispersão e absorção da radiação, dificultando ainda mais a separação entre a contribuição da clorofila-a e outros componentes ópticos. O trabalho de Le et al. (2013) corroboram essa dificuldade ao avaliar diferentes algoritmos para a Baía de Tampa, mostrando que os algoritmos tradicionais de razão de bandas no azul/verde falham porque a reflectância nesses comprimentos de onda é primariamente influenciada pelo CDOM e partículas detriticas, e não pela clorofila.

Diante disso, aumentos na turbidez associados a maior carga de material em suspensão

podem intensificar a dispersão e absorção da radiação, dificultando a separação entre a contribuição da clorofila-a e outros componentes ópticos. Como resultado, a estimativa de concentrações pode apresentar incertezas, afetando tanto a magnitude quanto a variabilidade espacial observada. Diante desse cenário, torna-se fundamental reconhecer e discutir as limitações e incertezas associadas à estimativa e à distribuição espacial da clorofila-a em ambientes estuarinos opticamente complexos.

ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE CLOROFILA-A: ANÁLISE *EOF*

A análise das Funções Ortogonais Empíricas (EOF) revelou que a primeira EOF explicou 97,67% da variância total do conjunto de dados (Tabela 1), enquanto a segunda e a terceira explicaram 2,01% e 0,32%, respectivamente. Em conjunto, as três primeiras componentes representaram 99,99% da variabilidade, indicando que a dinâmica espaço-temporal da clorofila-a é fortemente dominada por um único modo de variabilidade. As componentes de ordem superior apresentaram contribuição desprezível para a variância total, representando apenas pequenas flutuações locais ou ruídos nos dados.

Tabela 1 - Autovalores, Variância Explicada (%) e Variância Acumulada (%) das componentes obtidas pela análise de Funções Ortogonais Empíricas (EOF) aplicada aos dados de Clorofila-a para o estuário da Lagoa dos Patos.

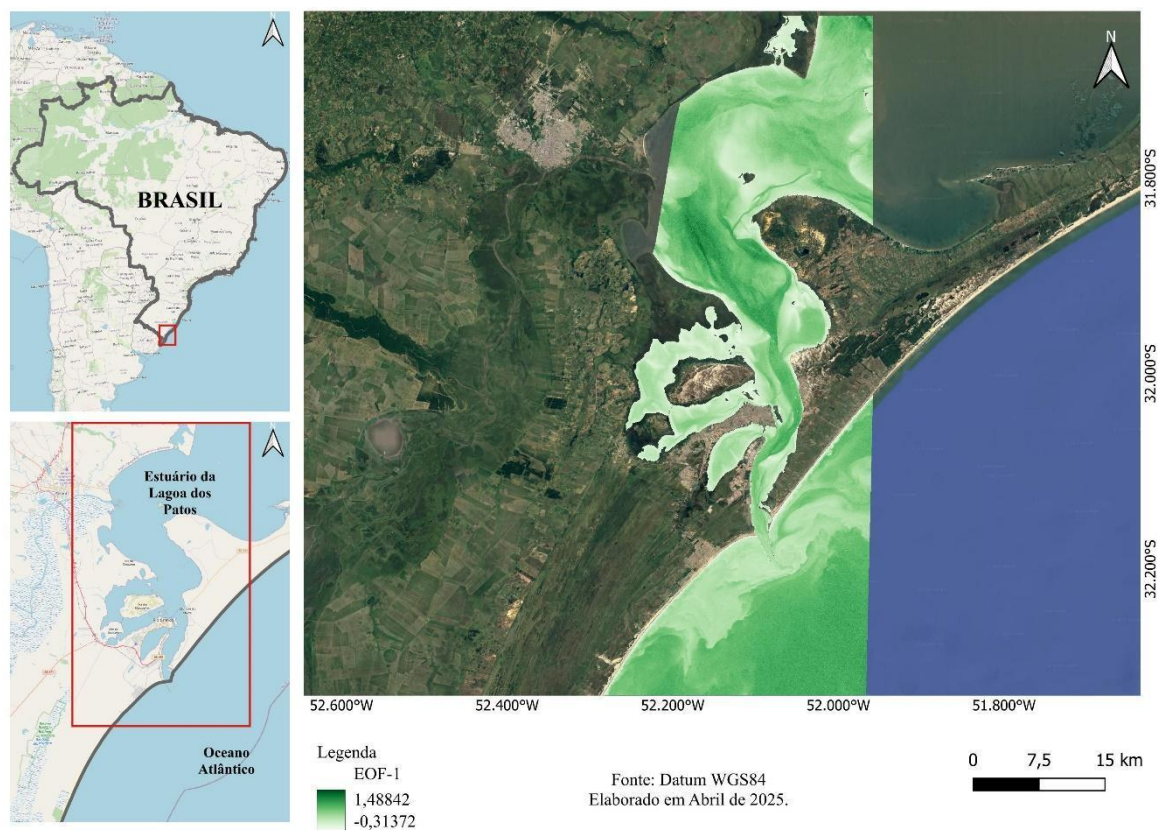
EOF	Autovalor bruto	Variância Explicada (%)	Variância Acumulada (%)
1	155.912.532,433602	97,669	97,669
2	3.206.534,627805	2,008	99,677
3	513.671,516396	0,322	99,999

Fonte: Autores

A primeira *EOF*, representa o padrão espacial dominante de variabilidade da concentração de clorofila-a na região estudada (Figura 13). Esse padrão principal representa a maior parcela da variância total dos dados, refletindo o comportamento mais recorrente da clorofila ao longo do tempo. Os valores mais elevados da *EOF* indicam maior variabilidade espacial da clorofila-a, enquanto valores mais baixos correspondem a regiões com menor variabilidade. Neste sentido, observa-se que a distribuição espacial da variabilidade da clorofila-a está fortemente associada à batimetria do Estuário da Lagoa dos Patos (Figura 2). Onde as áreas de maior profundidade, especialmente ao longo do canal de navegação,

coincidem com os valores mais altos da primeira *EOF*. Essa relação, pode estar relacionada à hidrodinâmica do estuário, onde, regiões com maior variação batimétrica tendem a apresentar correntes mais intensas, promovendo maior mistura vertical e horizontal da água, o que pode influenciar diretamente a variabilidade da clorofila.

Figura 13 - *EOF*-1 para Clorofila-a.

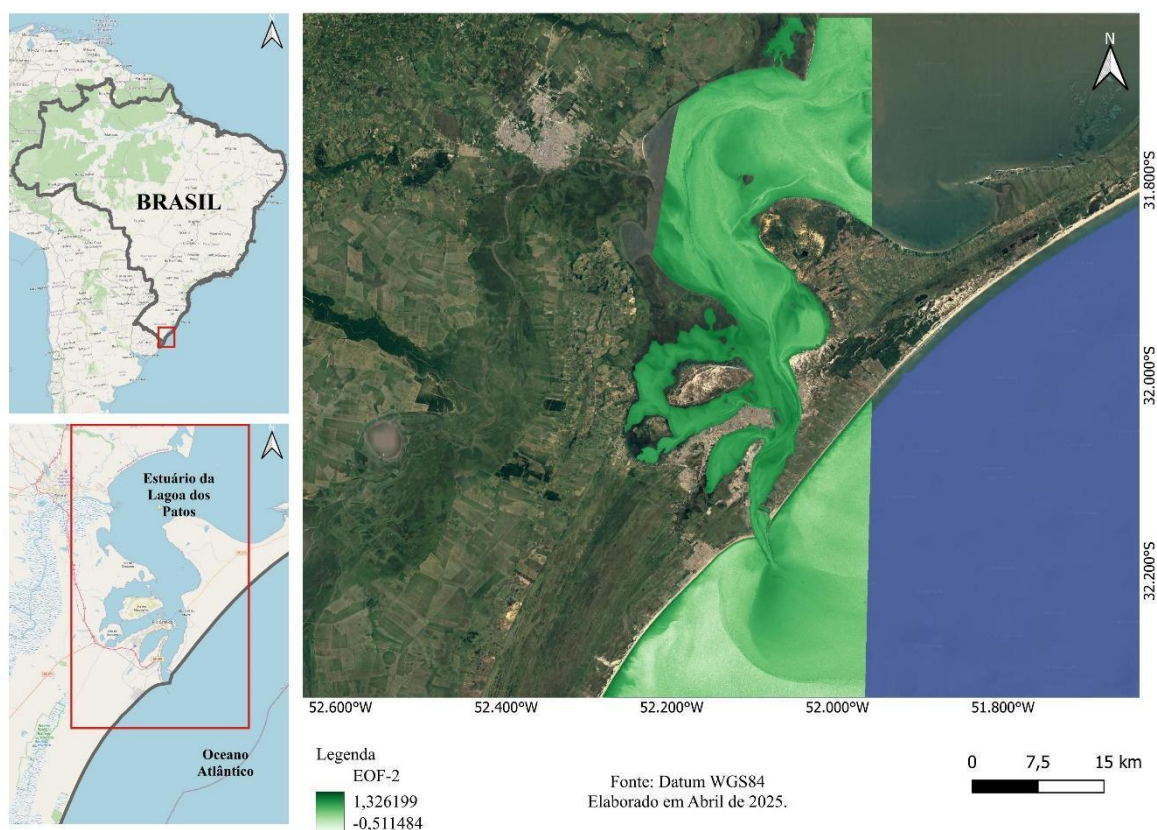


Fonte: Autores.

O segundo padrão de *EOF* (Figura 14) apresenta-se de forma mais difusa em comparação ao primeiro, mas ainda é possível associá-lo ao gradiente batimétrico da região (Figura 2). Observa-se uma relação com a hidrodinâmica do estuário, especialmente nas áreas onde ocorre um afunilamento da geomorfologia do local, como na região próxima aos molhes da barra. Nessas áreas mais estreitas, a velocidade das correntes tende a aumentar, seja em direção à saída para o Oceano Atlântico ou no movimento de entrada, dependendo da direção do vento e maré (pouca influência, devido ser micro maré). Esse padrão observado, sugere uma diferença significativa na variabilidade da clorofila entre a região interna do estuário e a plataforma costeira adjacente. Essa transição é muito evidente na zona de influência da pluma estuarina, onde se observa uma mudança no comportamento da clorofila-a (variabilidade da *EOF*) ao passar do ambiente estuarino para o oceânico. Além disso, nota-se pequeno aumento de variabilidade na zona de arrebenção das ondas (*swash zone*), a ação constante das ondas

provoca intensa ressuspensão de sedimentos e mistura da coluna d'água, o que pode contribuir para uma maior variabilidade local da clorofila-a detectada por este segundo modo. Isso indica que, mesmo em zonas costeiras mais rasas, processos físicos intensos exercem influência significativa sobre os padrões espaciais de variabilidade da clorofila.

Figura 14 - EOF-2 para Clorofila-a .

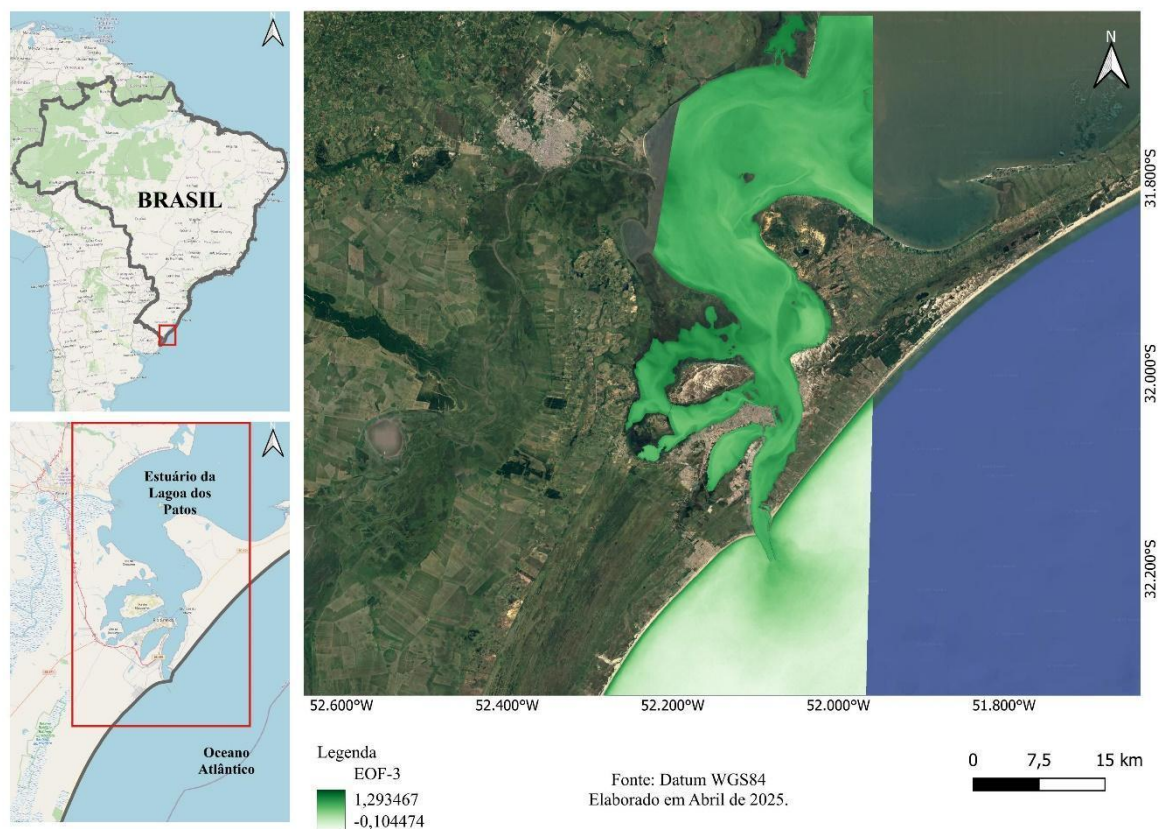


Fonte: Autores

O terceiro padrão de *EOF* mostra-se altamente relacionado à variabilidade das correntes entre o interior do estuário e a região oceânica adjacente (Figura 15). Diferente do segundo modo, esse padrão revela de forma mais evidente a influência da troca de massas d'água entre o estuário da Lagoa dos Patos e o Oceano Atlântico. Essa distinção espacial capturada pela *EOF-3* destaca com clareza a zona de transição entre esses dois ambientes, onde as diferenças na salinidade, na intensidade das correntes e na concentração de nutrientes promovem uma variabilidade significativa na distribuição da clorofila-a, sendo visível especialmente nas áreas próximas à desembocadura do estuário e ao longo da plataforma costeira rasa (padrão nos bancos arenosos da Praia do Cassino). Em comparação com a *EOF-2* (Figura 14), esse terceiro modo apresenta um padrão mais concentrado e bem definido, evidenciando de forma mais clara os efeitos das trocas hidrodinâmicas sobre a variabilidade da clorofila. Isso sugere que a *EOF-*

3 está fortemente vinculada à dinâmica estuarina, principalmente aos eventos de enchentes e vazante de água, controlados principalmente pela força do vento, sendo um indicador importante dos processos de mistura e transporte entre os dois ambientes costeiros.

Figura 15 - EOF-3 para Clorofila-a .



Fonte: Autores

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise temporal das concentrações de clorofila-a, por sua vez, mostrou variações sazonais e espaciais que refletem as condições hidrodinâmicas e geomorfológicas locais. Destaca-se a presença frequente de plumas estuarinas na região da desembocadura da Lagoa dos Patos, principalmente nos períodos de maior vazão ou ação dos ventos, bem como áreas de acúmulo de biomassa fitoplanctônica em regiões de baixa hidrodinâmica, exemplo: o Saco da Mangueira. A validação dos dados de clorofila-a obtidos pelo sensor *MSI* do *Sentinel-2*, em comparativo com o sensor *MODIS-Aqua*, demonstrou forte correlação, especialmente para as concentrações inferiores a 3,5 mg/L, confirmando a confiabilidade do sensor *Sentinel-2* para monitoramento de qualidade da água em ambientes estuarinos e costeiros. Esses resultados corroboram estudos anteriores que atestam o potencial do *Sentinel-2* para esse tipo de aplicação, embora ressaltem a necessidade de calibração específica em condições ambientais variadas (ARANHA et al., 2022; PODDAR, CHACKO e SWAIN, 2019).

Os resultados obtidos por meio da análise de *EOF* evidenciam padrões espaciais distintos na variabilidade da concentração de clorofila-a na região do Estuário da Lagoa dos Patos, refletindo diferentes processos hidrodinâmicos e geomorfológicos que atuam no sistema. A primeira *EOF* capturou o padrão dominante, fortemente relacionado à batimetria e à dinâmica das correntes nas áreas mais profundas do estuário, principalmente ao longo do canal de navegação, indicando a influência da mistura hídrica na distribuição da biomassa fitoplanctônica. O segundo padrão espaço-temporal obtido pela análise *EOF* revelou uma variabilidade mais difusa, podendo ser associada ao gradiente batimétrico e a aspectos da morfologia da região, como o afunilamento geomorfológico próximo aos molhes e a zona de arrebentação das ondas, onde a ressuspensão de sedimentos contribui para o aumento da variabilidade da clorofila-a, demonstrando a importância de processos físicos em regiões costeiras rasas. Já terceira componente *EOF* destacou a dinâmica da troca de massas d'água entre o interior do estuário e a zona oceânica adjacente, caracterizando a zona de transição estuarina e evidenciando a influência da hidrodinâmica local (períodos de enchentes e vazantes de água, controlados pela força dos ventos). Considerando esses aspectos, este estudo contribui para o entendimento da dinâmica espacial e temporal da clorofila-a no Estuário da Lagoa dos Patos, por meio do uso integrado de técnicas de sensoriamento remoto e análise estatística, mostrando-se eficaz para a caracterização dos padrões de variabilidade.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- AURIN, Dirk A.; DIERSEN, Heidi M. Advantages and limitations of ocean color remote sensing in CDOM-dominated, mineral-rich coastal and estuarine waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 125, p. 181-197, out. 2012.
- SILVA, M. J. B. da; CORRÊA, I. C. S.; FONTOURA, J. A. S.; SERPA, C. G. Sedimentation processes in the navigation channel of Patos Lagoon Estuary, southern Brazil. **Regional Studies in Marine Science**, v. 61, p. 102931, 2023.
- ARANHA, Thaís R. Benevides T. et al. Remote Analysis of the Chlorophyll-a Concentration Using Sentinel-2 MSI Images in a Semiarid Environment in Northeastern Brazil. **Water**, Basel, v. 14, n. 3, p. 451, 2022.

BARBOSA, Fabiana Gonçalves; WALLNER-KERSANACH, Mônica; BAUMGARTEN, Maria da Graça Zepka. Metais traço nas águas portuárias do estuário da Lagoa dos Patos, RS. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v. 16, n. 2, p. 27–36, 2012.

BAUMGARTEN, Maria da Graça Zepka; DA PAIXÃO, Bárbara Góis. Uso do índice do estado trófico para avaliar a qualidade das águas do estuário da Lagoa dos Patos (RS). **Atlântica** (Rio Grande), v. 35, n. 1, p. 5-22, 2013.

BJÖRNSSON, Halldór; VENEGAS, Silvia A. **A manual for EOF and SVD analyses of climate data**. Montréal, Québec: McGill University, Centre for Climate and Global Change Research, CCGCR Report No. 97-1, 52 p., fev. 1997.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, n. 53, p. 58–63, 18 mar. 2005. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450.

ESPINOZA, Jean Marcel de Almeida; ALVES, Deivid Cristian Leal; SALES, Dinalva A.; ALBUQUERQUE, Miguel da Guia; ESPINOZA, Tatiana de Almeida; GONZAGA, Bento Almeida; FAÇANHA, Matheus; MOREIRA, Jade. Monitoring Water Quality in Coastal Lagoons Using Orbital Sensors: Case Study for the North Coast of Rio Grande do Sul, Brazil. **Journal of Coastal Research**, v. 113, Special Issue No. 113, p. 569–573, 20 dez. 2024. DOI: <https://doi.org/10.2112/JCR-SI113-112.1>

FERNANDES, Elisa Helena L.; DYER, Keith Richard; MOLLER, Osmar Olinto. Spatial gradients in the flow of southern Patos Lagoon. **Journal of Coastal Research**, v. 21, n. 4, p. 759-769, 2005.

FERNANDES, E. H. L., CECILIO, R. O., & SCHILLER, R. V. (2007). Estudo da influência da alteração dos molhes da barra de Rio Grande sobre a circulação do estuário da Lagoa dos Patos - RS. **VETOR - Revista De Ciências Exatas E Engenharias**, 15(2), 49–57.

FERNANDES, Elisa Helena Leão; MONTEIRO, Igor Oliveira; MÖLLER JR, Osmar Olinto. On the Dynamics of Mangueira Bay—Patos Lagoon (Brazil). **Journal of Coastal Research**, n. 10047, p. 97-107, 2010.

GHOLIZADEH, M. H.; MELESSE, A. M.; REDDI, L. A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques. **Sensors**, v. 16, n. 8, p. 1298, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/s16081298>.

HU, C.; FENG, L.; LEE, Z.; FRANZ, B. A.; BAILEY, S. W.; WERDELL, P. J.; PROCTOR, C. W. Improving satellite global chlorophyll a data products through algorithm refinement and data recovery. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 124, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2019JC014941>.

JENSEN, John R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução de José Carlos Neves Epiphanyo (coord.) et al. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

KUMAR, Arun; BABU, K. N.; SHUKLA, A. K. Comparative analysis of chlorophyll-a distribution from SeaWiFS, MODIS-Aqua, MODIS-Terra and MERIS in the Arabian Sea. **Marine Geodesy**, v. 38, n. 1, p. 40–57, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1080/01490419.2014.914990>.

LE, Chengfeng; HU, Chuanmin; CANNIZZARO, Jennifer; ENGLISH, David; MULLER-KARGER, Frank; LEE, Zhongping. Evaluation of chlorophyll-a remote sensing algorithms for an optically complex estuary. **Remote Sensing of Environment**, v. 129, p. 75-89, fev. 2013.

PAHLEVAN, Nima et al. Sentinel-2/Landsat-8 product consistency and implications for monitoring aquatic systems. **Remote Sensing of Environment**, v. 220, p. 19-29, 2019.

PEIXOTO, Daniela Wancura Barbieri; GUASSELLI, Laurindo Antonio; PEREIRA FILHO, Waterloo. Estimativa de concentração e sedimentos em suspensão a partir de imagens LANDSAT 8 em PCHS no rio Ivaí-RS. **Geosciences= Geociências**, v. 37, n. 1, p. 147-154, 2018.

MARKOGIANNI, V.; KALIVAS, D.; PETROPOULOS, G. P.; DIMITRIOU, E. Estimating chlorophyll-a of inland water bodies in Greece based on Landsat data. **Remote Sensing**, v. 12, n. 13, p. 2087, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12132087>.

MOORE, Timothy S.; CAMPBELL, Janet W.; DOWELL, Mark D. A class-based approach to characterizing and mapping the uncertainty of the MODIS ocean chlorophyll product. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 11, p. 2424–2430, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.07.016>.

POTES, Miguel et al. Use of Sentinel 2–MSI for water quality monitoring at Alqueva reservoir, Portugal. **Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences**, v. 380, p. 73-79, 2018.

PODDAR, Shukla; CHACKO, Neethu; SWAIN, Debadatta. Estimation of Chlorophyll-a in Northern Coastal Bay of Bengal Using Landsat-8 OLI and Sentinel-2 MSI Sensors. **Frontiers in Marine Science**, [S.l.], v. 6, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00598>.

SILVA, Marine Jusiane Bastos da. **Estudo dos processos de sedimentação no Porto do Rio Grande (Rio Grande do Sul, Brasil)**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2019. Disponível em: <https://repositorio.furg.br/handle/123456789/12950>.