

DETERMINAÇÃO DA TURBIDEZ EM ÁGUAS COSTEIRAS E ESTUARINAS POR SENSORIAMENTO REMOTO: ESTUÁRIO DA LAGOA DOS PATOS

Rafael Simão¹, Araiene Pereira² e Elisa Fernandes³

¹Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, RS, Brasil, rafael.avila.simao@gmail.com; ²Instituto de Oceanografia, FURG, Rio Grande, RS, Brasil, araiene.peres@gmail.com; ³Instituto de Oceanografia, FURG, Rio Grande, RS, Brasil, fernandes.elisa@gmail.com

RESUMO

Os algoritmos semi-analíticos entendidos como globais são uma alternativa para o estudo da turbidez por sensoriamento remoto, porém sua aplicação pode levar à necessidade de calibração local. O presente trabalho tem como objetivo investigar a aplicabilidade de dois algoritmos semi-analíticos globais para recuperação da turbidez no estuário da Lagoa dos Patos. Estes algoritmos foram testados com cenas dos satélites Landsat 8 e 9, considerando duas correções atmosféricas e duas bandas. A melhor combinação encontrada após calibração local foi: ACOLITE, algoritmo de Nechad *et. al* e banda do vermelho. Com base nessa combinação, tem-se os maiores valores turbidez em inverno e primavera, o que está de acordo com os padrões de ventos e descarga fluvial. A variação interanual também foi observada, com maior turbidez em fases de El Niño. Estes padrões vão de encontro com outros trabalhos realizados na região, corroborando com os resultados obtidos.

Palavras-chave – Estuário, Lagoa dos Patos, Landsat, Sensoriamento Remoto, Turbidez.

ABSTRACT

*Global semi-analytical algorithms are an alternative to the study of turbidity using remote sensing, but it's applicability may require local calibration. The present work aims to investigate the applicability of two global semi-analytical algorithms to the retrieval of turbidity in Patos Lagoon estuary. These algorithms were tested with scenes from Landsat 8 and 9, considering two atmospheric corrections and two bands. The best combination after local calibration was found to be: ACOLITE, Nechad *et. al* (2009) algorithm and red band. Based on this combination, the highest values of turbidity were found on winter and spring, in agreement to the patterns of wind and fluvial discharge. The interannual variability was also investigated, with higher turbidity during El Niño phases. These patterns are in agreement with other works on the region, corroborating to the obtained results.*

Key words – Estuary, Landsat, Patos Lagoon, Remote Sensing, Turbidity.

1. INTRODUÇÃO

A Lagoa dos Patos (RS; Figura 1) é a maior laguna costeira do tipo estrangulado do mundo e representa a segunda maior fonte de água doce para a região costeira adjacente ao Oceano

Atlântico Sul [1]. Pode ser dividida entre uma zona lagunar (cerca de 90% da área total) e uma zona estuarina (cerca de 10% da área total) [2].

A região apresenta um regime de micromarés [3], que possuem mínima influência na hidrodinâmica local. Assim, a circulação na Lagoa é impulsionada pelo vento e pela descarga fluvial [4, 5], que possuem marcante variabilidade sazonal e são influenciadas pelos efeitos de El Niño Oscilação Sul (ENOS).

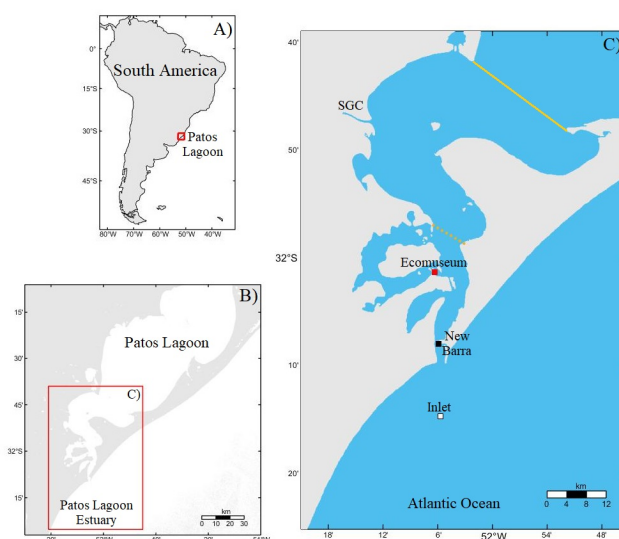


Figura 1: Localização da área de estudo. A linha amarela tracejada indica a divisão entre alto e baixo estuário definida por [5], a linha amarela preenchida indica a divisão entre a região estuarina e a região lagunar e os quadrados indicam a localização das estações *in situ* RS-1 (vermelho), RS-2 (preto), e RS-4 (branco).

As águas da Lagoa dos Patos são marcadas por altas concentrações de material particulado em suspensão (MPS), pigmentos fitoplancônicos e matéria orgânica dissolvida [6]. A turbidez é uma propriedade óptica e serve como proxy do MPS, além de ser um parâmetro ambiental comumente utilizado em legislações brasileiras e internacionais como indicador de qualidade de água [7].

Apesar de diversos estudos terem focado no MPS na Lagoa dos Patos (e.g., [8]), a turbidez na região continua sub-investigada. Nesse sentido, o uso de algoritmos globais é uma alternativa relevante, pois já foram extensivamente calibrados e validados. No entanto, nem sempre são representativos de regiões de comportamento complexo, como é o caso da Lagoa dos Patos.

Neste sentido, a contribuição deste trabalho será não apenas investigar os padrões espaço-temporais da turbidez na

região estuarina da Lagoa dos Patos, como também avaliar o desempenho de dois algoritmos semi-analíticos globais de turbidez: [9] e [10].

2. MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados dados de turbidez *in situ* de boias meteo-oceanográficas do programa SiMCosta (Sistema de Monitoramento da Costa Brasileira), obtidos entre 2016 e 2021. As três boias consideradas estão localizadas na região do baixo estuário (estação RS-1), no canal de navegação (estação RS-2) e offshore (estação RS-4) (ver Figura 1). As boias realizam medições a cada 30 min, a uma profundidade de 0,3 m e no comprimento de onda de 700 nm. Os dados passaram pelo controle de qualidade do SiMCosta e por um teste de remoção de outliers.

Ao todo, foram baixadas 136 arquivos de imagens orbitais brutas (nível 1) dos satélites Landsat 8/OLI (124 arquivos) e Landsat 9/OLI (12 arquivos). Para o processamento para nível 2, dois algoritmos de correção atmosférica foram empregados: o ACOLITE e o POLYMER.

O ACOLITE foi desenvolvido para águas costeiras e interiores turvas e possui duas opções de processamento: o "ajuste de espectro escuro" [11] e a "extrapolação exponencial" [12]. Ambas as opções foram testadas em três cenas aleatoriamente escolhidas e a correção por ajuste de espectro escuro foi escolhida, pois apresentou melhor desempenho tanto em cenas com maiores concentrações de nuvens, quanto em regiões costeiras de alta turbidez.

O POLYMER foi desenvolvido por [13] para a correção atmosférica mesmo em condições de sun glint, se baseando no método de correspondência espectral. Para o processamento das cenas, foram utilizadas as configurações padrão, com adição de uma *landmask*.

A turbidez foi calculada com base na reflectância de sensoriamento remoto (R_{rs}), utilizando o algoritmo desenvolvido por [10] (daqui adiante chamado Nechad09) e o algoritmo desenvolvido por [9] (daqui adiante chamado Dogli15). Ambos os algoritmos possuem o mesmo princípio físico semi-analítico e são genericamente aplicáveis a múltiplas regiões costeiras.

Os valores dos coeficientes empíricos recalibrados por [14] foram utilizados para o algoritmos de Nechad09, enquanto que os valores indicados em Dogli15 foram utilizados em seu algoritmo. Para Nechad09, o fator de escala "*nechad_max_rho_w_C_factor*" foi igualado a 1, evitando a exclusão de valores de alta reflectância próximos à reflectância de saturação.

Os *matchups* foram obtidos considerando uma diferença de, no máximo, 30 minutos entre o horário de coleta dos dados *in situ* e o horário da passagem do satélite. Para esses *matchups*, a média, a mediana e o desvio padrão de uma caixa 5x5 em torno das coordenadas da estação foram extraídos.

Os *matchups* foram utilizados para a calibração regional dos algoritmos. Diversos modelos de regressão foram testados, com base na caixa de ferramentas de Ajuste de Curvas, do programa MATLAB. Selecionado um modelo, foram calculadas as seguintes métricas: coeficiente de correlação tau de Kendall, *Root Mean Squared Difference*

(RMSD) e *Mean Absolute Difference* (MAD).

3. RESULTADOS

A Figura 2 mostra as curvas derivadas da calibração regional para as bandas do vermelho (655 nm) e do infravermelho próximo (865 nm), para os dois algoritmos utilizados (Nechad09 e Dogli15) e para as duas correções atmosféricas (ACOLITE e POLYMER).

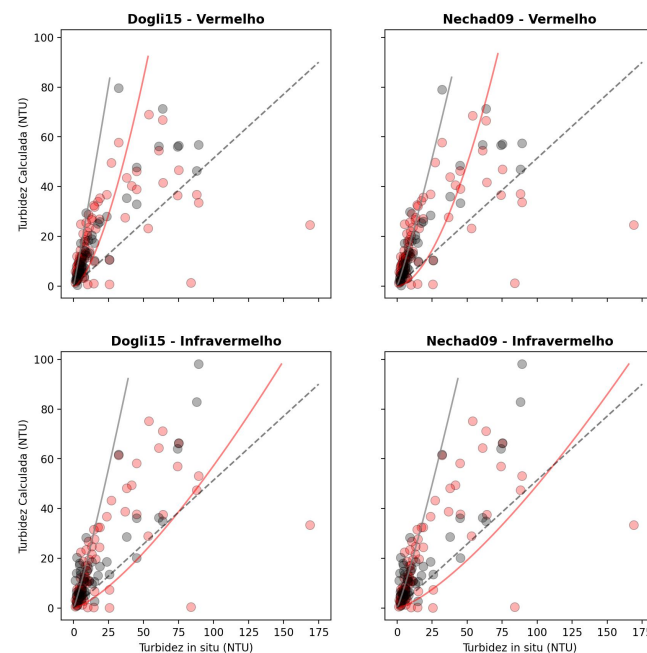


Figura 2: Curvas de regressão entre a turbidez medida *in situ* e obtida por sensoriamento remoto após a calibração local.

Os parâmetros estatísticos da comparação entre os dados de turbidez medidos *in situ* e derivados dos satélites, antes e depois da calibração, são mostrados nas Tabelas 1 e 2, para as correções atmosféricas do ACOLITE e POLYMER, respectivamente.

Com base nesses resultados, tem-se que o maior valor do coeficiente tau de Kendall e menor valor de MAD correspondem a correção atmosférica realizada pelo ACOLITE, para a banda do vermelho (655 nm) e para o algoritmo de Nechad09. Por esse motivo, essa combinação foi utilizada nos mapas sazonais e interanuais de turbidez na Lagoa dos Patos.

		Kendall	p valor	RMSD	MAD
Antes	D 655	0,77	<0,01	15,07	9,74
	D 865	0,50	<0,01	26,61	22,11
	N 655	0,77	<0,01	15,06	12,67
	N 865	0,50	<0,01	32,00	26,72
Após	D 655	0,77	<0,01	12,20	7,09
	D 865	0,50	<0,01	10,50	7,42
	N 655	0,77	<0,01	12,03	6,90
	N 865	0,50	<0,01	10,50	7,42

Tabela 1: Métricas antes e após a calibração local para correção atmosférica do ACOLITE, algoritmos de Nechad09 (N) e Dogli15 (D) e bandas do vermelho (655) e infravermelho (865).

		Kendall	p valor	RMSD	MAD
Antes	D 655	0,57	<0,01	28,89	13,95
	D 865	0,60	<0,01	25,66	11,57
	N 655	0,57	<0,01	26,45	11,78
	N 865	0,60	<0,01	24,87	10,84
Após	D 655	0,57	<0,01	23,28	12,79
	D 865	0,60	<0,01	20,97	10,37
	N 655	0,57	<0,01	23,26	12,72
	N 865	0,60	<0,01	20,97	10,37

Tabela 2: Métricas antes e após a calibração local para correção atmosférica do POLYMER, algoritmos de Nechad09 (N) e Dogli15 (D) e bandas do vermelho (655) e infravermelho (865).

As médias sazonais de turbidez na Lagoa dos Patos são apresentadas na Figura 3. Os maiores valores de turbidez ocorrem na primavera austral, com águas mais turvas na região do alto estuário e aporte dessas águas para a plataforma continental adjacente. Os menores valores de turbidez são vistos em outono e verão, sendo que durante o verão o deságue das águas continentais (mais turvas) torna-se praticamente imperceptível.

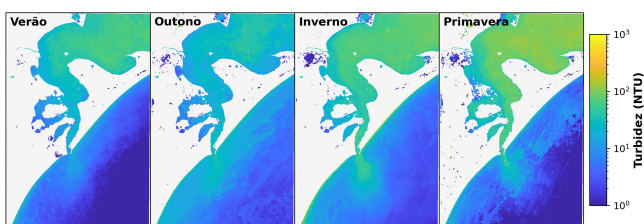


Figura 3: Médias sazonais da turbidez no estuário da Lagoa dos Patos, entre os anos de 2013 e 2022.

As médias anuais da turbidez derivada por sensoriamento remoto na Lagoa dos patos entre os anos de 2013 e 2022 são apresentadas na Figura 4. As composições correspondem a um número de imagens entre 2 e 8. No geral, a turbidez apresentou maiores valores no alto estuário, com diminuição em direção à desembocadura. Além disso, apresentou nítida variabilidade interanual, com maiores valores entre os anos de 2014 e 2017.

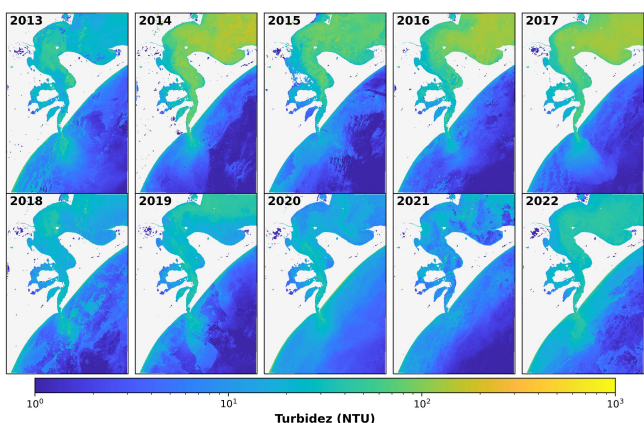


Figura 4: Médias anuais da turbidez no estuário da Lagoa dos Patos, entre os anos de 2013 e 2022.

4. DISCUSSÃO

A aplicação direta dos algoritmos semi-analíticos Nechad09 e Dogli15 não levou a resultados satisfatórios, fazendo-se necessária uma calibração regional para a área de estudo. Essa necessidade é um indicativo de que os coeficientes empíricos adotados por esses algoritmos não são representativos das propriedades ópticas (isto é, das propriedades de absorção e espalhamento) das águas costeiras e estuarinas da Lagoa dos Patos.

Após a calibração, os melhores resultados foram obtidos para a banda do vermelho (655 nm), a mesma faixa do espectro utilizada para as medições *in situ*. Nesse sentido, [15] mostraram que altas concentrações de material particulado em suspensão podem gerar saturação do sinal medido pela boia, que passam a registrar um valor constante. Como a saturação ocorre mais facilmente nos menores comprimentos de onda, é esperado que sua influência seja maior na banda do vermelho do que no infravermelho. Assim, em casos de elevada turbidez, tanto a boia quanto a banda do vermelho do satélite registram um sinal constante, o que pode aumentar a correlação dos dados.

Além disso, os erros nos resultados dos algoritmos podem estar associados a influência da matéria orgânica dissolvida (CDOM). De acordo com [15, 16], a alta absorção da CDOM no vermelho pode levar a resultados subestimados de turbidez estimada por satélites, enquanto que no infravermelho próximo o efeito da CDOM é quase nulo.

A turbidez na Lagoa dos Patos é influenciada principalmente pela descarga fluvial e ação do vento local [17]. Durante o verão, os ventos de NE empurram as águas turvas em direção ao estuário e sua desembocadura, enquanto que no outono os ventos de sudoeste (SO) empilham águas salinas para dentro do estuário [18]. No inverno (Figura 3C), o aumento da descarga fluvial promove um aumento da turbidez, mas os ventos de S-SO continuam a forçar a entrada de água salina para o estuário. Por fim, na primavera (Figura 3D) as direções do vento tornam-se mais variadas e a descarga fluvial aumenta, elevando a turbidez no estuário como um todo.

Conforme [19], a região sul do Brasil é afetada pelos efeitos do El Niño Oscilação Sul (ENSO), de modo que os períodos de El Niño (La Niña) provocam um aumento (diminuição) nas taxas de precipitação da região. A variabilidade interanual da turbidez na Lagoa dos Patos pode ser explicada por ciclos de ENSO, sendo que em anos de El Niño (indicados pelo Índice de Oscilação Sul - SOI) ocorre aumento da concentração de material particulado em suspensão, predomínio de ventos NE e altas taxas de precipitação e descarga fluvial [8].

Esse padrão é condizente com o visto nas médias anuais de 2014 até 2017, com alta turbidez possivelmente associadas a fase de El Niño, conforme o SOI desses anos. Na sequência, os anos de 2018 e 2019 apresentaram baixa turbidez, indicando um fortalecimento do fenômeno de La Niña.

A identificação do comportamento sazonal e interanual da turbidez na região do estuário da Lagoa dos Patos, associada aos padrões de descarga fluvial, ventos e ENSO, vai de encontro com o encontrado por diferentes trabalhos ([4, 6,

8, 17, 18]), corroborando com os resultados obtidos.

5. CONCLUSÕES

A calibração local realizada no presente trabalho levou a uma melhor correlação com os dados *in situ*, com os melhores resultados para a banda do vermelho (655 nm), para o algoritmo de Nechad09 e para a correção atmosférica do ACOLITE. Dessa forma, essa combinação demonstrou maior aplicabilidade à determinação da turbidez do estuário da Lagoa dos Patos através dos satélites Landsat 8/OLI e 9/OLI.

O melhor desempenho do ACOLITE deve ser melhor investigado, pois o POLYMER apresentou um número maior de *pixels* válidos. Por esse motivo, novas análises estão sendo realizadas. Estas análises podem vir a alterar a melhor combinação de banda, algoritmo e correção atmosférica. Dessa forma, os resultados apresentados devem ser vistos como parciais.

Apesar da banda do infravermelho próximo (865 nm) ser comumente utilizada em estimativas de turbidez, por evitar a saturação em águas altamente turvas, tal banda perde sensibilidade em regiões de turbidez baixa ou moderada. Esse parece ser o caso da Lagoa dos Patos, o que se soma ao fato das medições realizadas *in situ* serem realizadas também no comprimento do vermelho. Apesar disso, o efeito da CDOM pode ter subestimado as estimativas de turbidez, sendo necessários mais estudos sobre a influência do CDOM na região estuarina da Lagoa dos Patos.

Ademais, o uso dos satélites Landsat 8 e 9 para o estudo da turbidez na Lagoa dos Patos apresentou bom desempenho, uma vez que sua resolução espectral é ideal para tal estimativa. Entretanto, há uma dificuldade no monitoramento frequente da turbidez devido à obtenção dos dados a cada 16 dias, sem considerar a interferência de nuvens. Por fim, o uso de outros satélites da série Landsat pode ser vantajoso para estudos mudanças no padrão de distribuição da turbidez em longa escala temporal, já que estes abrangem dados desde a década de 70.

6. REFERÊNCIAS

- [1] J. P. CASTELLO. Sobre as condicoes oceanograficas no rio grande do sul. *Atlantica*, 2:25–110, 1977.
- [2] W. C. Marques and O. O. Möller. Variabilidade temporal em longo período da descarga fluvial e níveis de Água da lagoa dos patos, rio grande do sul, brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 13:155–163, 2008.
- [3] G. P. Barros, W. C. Marques, and E. P. Kirinus. Influence of the Freshwater Discharge on the Hydrodynamics of Patos Lagoon, Brazil. *International Journal of Geosciences*, 05:925–942, 2014.
- [4] O. O. Moller, P. Castaing, J. C. Salomon, and P. Lazure. The Influence of Local and Non-Local Forcing Effects on the Subtidal Circulation of Patos Lagoon. *Estuaries*, 24:297, 2001.
- [5] O. O. Moller, J. A. Lorenzzenti, J. Stech, and M. M. Mata. The Patos Lagoon summertime circulation and dynamics. *Continental Shelf Research*, 16:335–351, 1996.
- [6] A. C. F. Andrade, L. A. Guasselli, G. Toniolo, and A. A. Moreira. Dinâmica espacial e temporal de sedimentos em suspensão na região estuarina da lagoa dos patos - rs, a partir de dados do sensor oli, landsat-8. *Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, pages 1953–1960, 2015.
- [7] G. Piazza, R. Dupas, C. Gascuel-Oudou, A. Pinheiro, V. Kaufmann, and E. Blainski. Variability of hydro-chemical response to storm events captured using high-frequency river monitoring in subtropical catchments, southern Brazil. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 17:1–15, 2020.
- [8] J. Távora, E. H. Fernandes, L. P. Bitencourt, and P. M. S. Orozco. El-Niño Southern Oscillation (ENSO) effects on the variability of Patos Lagoon Suspended Particulate Matter. *Regional Studies in Marine Science*, 40:101495, 2020.
- [9] A. I. Dogliotti, K. G. Ruddick, B. Nechad, D. Doxaran, and E. Knaeps. A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters. *Remote Sensing of Environment*, 156:157–168, 2015.
- [10] B. Nechad, K. G. Ruddick, and G. Neukermans. Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of turbidity in coastal waters. volume 7473, page 74730H, 2009.
- [11] Q. Vanhellemont and K. Ruddick. Atmospheric correction of metre-scale optical satellite data for inland and coastal water applications. *Remote Sensing of Environment*, 216:586–597, 2018.
- [12] Q. Vanhellemont and K. Ruddick. Turbid wakes associated with offshore wind turbines observed with Landsat 8. *Remote Sensing of Environment*, 145:105–115, 2014.
- [13] F. Steinmetz, P. Y. Deschamps, and D. Ramon. Atmospheric correction in presence of sun glint: application to meris. *Optics Express*, 19:9783–9800, 2011.
- [14] B. Nechad, A. Dogliotti, K. Ruddick, and D. Doxaran. Particulate backscattering and suspended matter concentration retrieval from remote-sensed turbidity in various coastal and riverine turbid waters. *Proceedings of ESA Living Planet Symposium*, page 740, 2016.
- [15] X. Luo, T. F. Keenan, J. B. Fisher, J. C. Jiménez-Muñoz, J. M. Chen, C. Jiang, W. Ju, N. V. Perakalapudi, Y. Ryu, and J. M. Tadić. The impact of the 2015/2016 El Niño on global photosynthesis using satellite remote sensing. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 373:20170409, 2018.
- [16] N. Cherukuru, P. W. Ford, R. J. Matear, K. Oubelkheir, L. A. Clementson, K. Suber, and A. D. L. Steven. Estimating dissolved organic carbon concentration in turbid coastal waters using optical remote sensing observations. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52:149–154, 2016.
- [17] W. C. Marques, E. H. Fernandes, I. O. Monteiro, and O. O. Möller. Numerical modeling of the Patos Lagoon coastal plume, Brazil. *Continental Shelf Research*, 29:556–571, 2009.
- [18] E. Fernandes, P. Silva, G. Gonçalves, and O. Möller. Dispersion Plumes in Open Ocean Disposal Sites of Dredged Sediment. *Water*, 13:808, 2021.
- [19] C. F. Ropelewski and M. S. Halpert. Global and Regional Scale Precipitation Patterns Associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, 115:1606–1626, 1987.