IMPACTOS DE ONDAS DE CALOR ATMOSFÉRICAS NA QUALIDADE DA ÁGUA DA LAGOA DE ARARUAMA A PARTIR DE SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL

Luiz Fernando de Albuquerque Bruno[1], Lino Augusto Sander de Carvalho[1], Renata dos Santos Libonati[1],
Talita Fernanda das Graças Silva[2], Felipe de Lucia Lobo[3]

[1]Departamento de Meteorologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, abfluiz@gmail.com; lino.sander@igeo.ufrj.br; renata.libonati@igeo.ufrj.br
[2]Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, talita.silva@ehr.ufmg.br
[3]Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, felipe.lobo@ufpel.edu.br

RESUMO

A Lagoa de Araruama (LA) é a maior lagoa hipersalina permanente do mundo, com elevada importância socioeconômica para o Estado do Rio de Janeiro. Nas últimas décadas, esforços têm sido realizados para recuperação desse ambiente degradado pelo crescimento urbano. O objetivo deste trabalho é avaliar a qualidade da água na LA utilizando o AlgaeMAp Rio, um aplicativo de monitoramento por sensoriamento remoto. Estimativas de Concentração de Clorofila-a (Chl-a) e Turbidez foram analisadas espaço-temporalmente, além da resposta de um índice de Chl-a (NDCI) a ocorrência de uma onda de calor atmosféricas (OC). As análises espaço-temporais apontam para maior Chl-a na região interior e nas margens da LA, as quais também apresentam turbidez elevada. Percebeu-se um atraso na resposta da LA à OC, possivelmente em razão de sua dimensão. A batimetria da LA e a análise da OC em lagoas similares são passos futuros para elucidar questões não respondidas.

Palavras-chave – Sensoriamento Remoto da Água, Qualidade da Água, Ondas de Calor Atmosféricas, Lagoa de Araruama

ABSTRACT

The Araruama Lagoon (AL) is the largest permanent hypersaline lagoon in the world, with high socioeconomic importance for the state of Rio de Janeiro. In recent decades, efforts have been made to recover this environment degraded by urban growth. The objective of this work is to assess water quality in AL using AlgaeMAp Rio, a remote sensing monitoring application. Estimates of Chlorophyll-a (Chl-a) Concentration and Turbidity were analyzed spatio-temporally, as well as the response of a Chl-a index (NDCI) to the occurrence of an atmospheric heatwave (HW). Spatio-temporal analyses point to higher Chl-a in the interior region and margins of AL, which also present high turbidity. A delay in AL's response to HW was observed, possibly due to its size. Bathymetry of AL and analysis of HW in similar lagoons are future steps to elucidate unanswered questions.

Keywords – *Remote Sensing of the Water, Water Quality, Atmospheric Heatwaves, Araruama Lagoon*

1. INTRODUÇÃO

Lagoas costeiras são corpos de água parcial ou totalmente isolados do oceano por uma barreira acima do nível da maré [1] com origem geomorfológica diretamente relacionada a condições climáticas e a topografia pré-existente [2]. Kjerfve et al. (1986) [3] estabelece um espectro para representar as lagoas costeiras de acordo com suas características geomorfológicas, apresentando três subdivisões: lagoas sufocadas, restritas ou vazantes, definidas por suas características de ligação com o mar. As propriedades físico-químicas e biológicas das lagoas estão ligadas às fontes de água do sistema ou ao balanço hídrico (a exemplo da salinidade), portanto os aportes recebidos pelo corpo d'água e até mesmo por sua bacia hidrográfica e as forçantes da região afetam diretamente suas características biogeoquímicas [4].

No Estado do Rio de Janeiro (ERJ), a alta densidade demográfica e a urbanização transformaram o ambiente das lagoas e são responsáveis por impactos antrópicos significativos, como a ocupação das margens e o lançamento de esgoto sem tratamento [5]. Além da Lagoa Rodrigo de Freitas, famosa mundialmente, o ERJ possui diversas outras lagoas inseridas no meio urbano e com elevada importância turística e socioeconômica, dentre elas a maior lagoa

costeira hipersalina permanente do mundo, a Lagoa de Araruama. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é avaliar espaço-temporalmente parâmetros da qualidade da água na Lagoa de Araruama utilizando um aplicativo de monitoramento por sensoriamento remoto.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

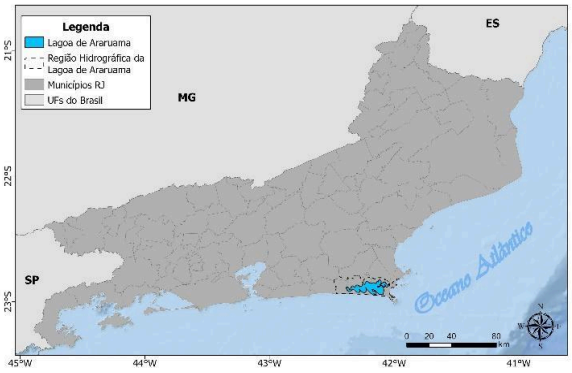

Figura 1. Localização da Lagoa de Araruama

A Lagoa de Araruama, localizada na Região dos Lagos do ERJ, possui salinidade média de cerca de 50 psu e uma área superficial de cerca de 220 km² [6]. Conectada ao mar ao nordeste pelo estreito Canal do Itajuru, a lagoa é considerada estrangulada e possui profundidade média (máxima) de 3 (17) metros [7]. Tendo o vento como o principal agente da circulação hidrodinâmica devido à baixa profundidade, a Lagoa de Araruama apresentou um ápice de eutrofização no início deste século entretanto, apresentou melhoras na qualidade da água em razão dos movimentos de recuperação e monitoramento da lagoa desde 2005 [8].

2.2 AlgaeMAp Rio

O aplicativo AlgaeMAp Rio (alarmes.lasa.ufrj.br/lasaaguas/), desenvolvido no Laboratório de Aplicações de Satélites Ambientais – LASA/UFRJ a partir do AlgaeMAp [9], é uma plataforma de monitoramento da qualidade da água exclusiva para os lagos e reservatórios do ERJ. Utilizando imagens Sentinel-2 o aplicativo gera dados do Índice de Clorofila da Diferença Normalizada (NDCI) [10] do qual são estimados a Concentração de Clorofila-a (Chl-a), o Índice de Estado Trófico (TSI) e a Frequência de *Bloom*. A partir de dados do sensor TIRS (Landsat 8), também é disponibilizada a temperatura de superfície da lagoa (LST). O algoritmo utilizado para estimar a concentração de Chl-a, o TSI e a Frequência de *Bloom* são descritos por Lobo et al. (2021) [9]. A estimativa de turbidez é gerada a partir do algoritmo de Dogliotti et al. (2015) [11].

2.3 Ondas de Calor

Além das análises temporais, foram calculadas as ondas de calor na Lagoa de Araruama durante o período e, a partir do *matchup* entre as datas encontradas e as datas com disponibilidade de imagens, foi avaliada a variação da distribuição dos valores NDCI antes, durante e depois da Onda de Calor (OC). Para calcular as OCs foram utilizados dados de temperatura máxima diária obtidas do ERA-5 e o índice CTX90pct, que define uma OC como um período de 3 ou mais dias com temperatura máxima acima do percentil 90 climatológico de temperaturas máximas [12]. O período base considerado para a climatologia foi de 1981 a 2010.

2.3 Metodologia

Neste trabalho, foram utilizadas as séries temporais de Chl-a e turbidez de dezembro de 2018 a outubro de 2024, além de imagens da distribuição espacial desses parâmetros e da frequência de *bloom* em todo o período.

Foram selecionados quatro pontos (Figura 2) dentro da Lagoa de Araruama para garantir a conformidade espacial da lagoa durante as análises temporais.

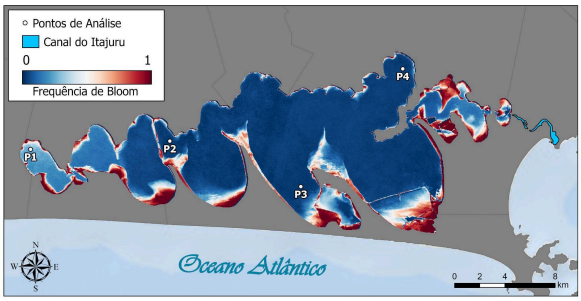

Figura 2. Pontos de análise utilizados para a série temporal e a frequência de *bloom* no período completo de análise.

3. RESULTADOS

3.1 Séries Temporais e Variação Espacial

Os gráficos temporais de Chl-a e turbidez podem ser avaliados, respectivamente, nas Figuras 3 e 4. Para todos os conjuntos de dados foram considerados apenas os valores menores que o percentil-97 para Chl-a, e menores que o percentil-90 para a turbidez.

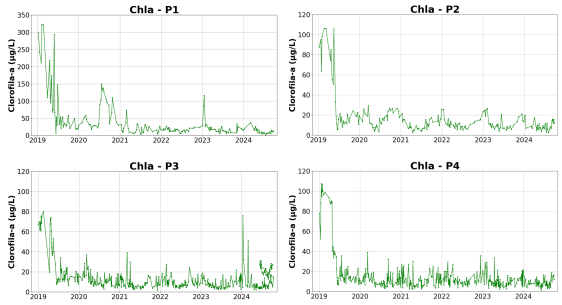

Figura 3. Variação temporal da Chl-a nos quatro pontos de análise deste trabalho.

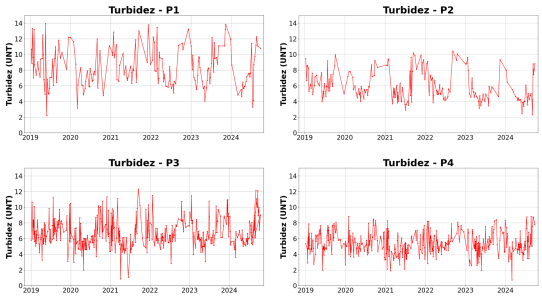

Figura 4. Variação temporal da turbidez nos quatro pontos de análise deste trabalho.

Os valores da estimativa de Chl-a (Figura 3) apresentam uma variação temporal similar em todos os pontos, indicando uma sazonalidade em toda a Lagoa. Com relação a variação espacial, vemos valores mais altos no P1, que representa o ponto de análise mais interior, próximo ao município de Araruama.

Em relação à turbidez, também podemos notar uma variação similar em todos os pontos, com destaque para uma média maior (menor) no P1 (P4). Uma análise batimétrica seria de grande importância na tentativa de qualificar a influência do fundo nas respostas verificadas por satélite, em razão da baixa profundidade média da lagoa.

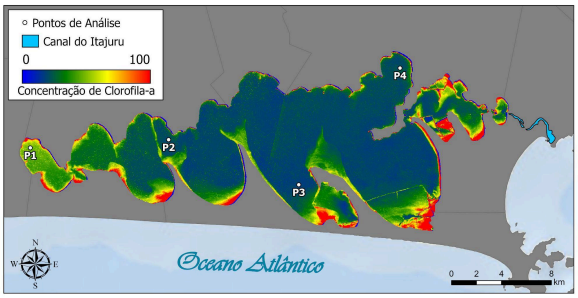

Figura 5. Clorofila-a média da Lagoa de Araruama de 2019 a outubro de 2024.

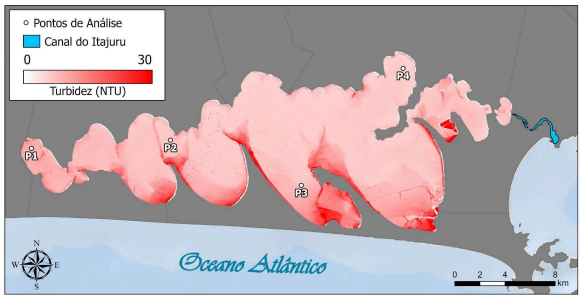

Figura 6. Turbidez média da Lagoa de Araruama de 2019 a outubro de 2024.

As figuras acima (Figura 5 e Figura 6) apresentam, respectivamente, as médias de Chl-a e turbidez para todo o período de análise e são mais representativas da espacialidade desses parâmetros na Lagoa de Araruama.

Analisando a Figura 5 podemos verificar maiores valores de Chl-a na região mais interior da Lagoa de Araruama, próximo ao P1 e ao município de Araruama, o segundo mais populoso daqueles que circundam a Lagoa e com área densamente populada às suas margens. A Figura 6 apresenta uma continuidade nos valores de turbidez em quase toda a Lagoa, com exceção às regiões próximas às margens, principalmente na parte do Sul, que também apresentam valores altíssimos de Chl-a. Esses altos níveis podem estar relacionados a efeitos de fundo e até mesmo salinas, que são muito comuns na Lagoa de Araruama e na Região dos Lagos do ERJ.

3.2 Onda de Calor Atmosférica

A Figura 7 representa os *boxplots* da distribuição de pixels de três dias que representam o antes, durante e depois de uma OC ocorrida entre 28/01 e 02/02/2019 na Lagoa de Araruama. Para cada elemento do gráfico são consideradas as imagens NDCI do dia em questão.

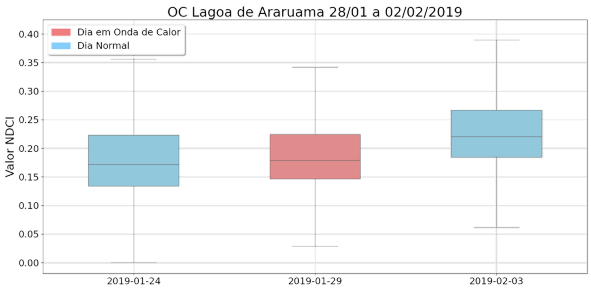

Figura 7. *Boxplot* de dias antes, durante e depois da ocorrência de uma onda de calor na Lagoa de Araruama.

A hipótese inicial era de que a OC geraria um aumento nos valores de NDCI, entretanto é possível perceber que o aumento só ocorreu após o final da OC. Entende-se que as características hidrogeomorfológicas e biogeoquímicas de cada reservatório/lagoa influenciam nas respostas à ocorrência de fenômenos. Para o caso da Lagoa de Araruama, infere-se que sua elevada área de superfície e volume podem retardar essa resposta a fenômenos atmosféricos.

4. CONCLUSÕES

Os resultados da análise temporal apontam para uma variação sazonal da Chl-a e da turbidez em todos os pontos, além de maiores valores de Chl-a no ponto mais ao interior da Lagoa, próximo ao município de Araruama. A avaliação da Chl-a média para o período ratifica o resultado das análises pontuais, visto os maiores níveis deste parâmetro são visualizados na região mais interior da Lagoa de Araruama. Além disso, valores altíssimos podem ser observados nas margens ao sul da Lagoa, que, vide imagem média da turbidez, podem representar efeitos do fundo e até mesmo áreas utilizadas para extração de sal. A análise da

distribuição de pixels mostra um *delay* na resposta esperada à ocorrência de uma OC, o que atribui-se ao elevado tamanho da Lagoa, retardando o tempo de resposta.

Tendo em vista os resultados obtidos nas análises temporais e espaciais, uma análise da batimetria da Lagoa de Araruama seria interessante para verificar a influência do fundo nas respostas obtidas por satélite. Em relação à análise realizada para a ocorrência da OC, a aplicação da metodologia desenvolvida neste trabalho em outras lagoas e reservatórios com características diferentes poderia corroborar com a hipótese de que a hidrogeomorfologia e a biogeoquímica da Lagoa influenciam no tempo de resposta à ondas de calor atmosféricas.

5. AGRADECIMENTOS

Luiz Fernando de Albuquerque Bruno foi bolsista de Iniciação Científica fomentado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ).

6. REFERÊNCIAS

[1] E. C. F. Bird. “Coastal Geomorphology: An Introduction”. John Wiley & Sons, New York, 2011.

[2] P. T. Wanless. “Current purchasing-power accounting: a study of a cooperative venture”. Abacus, v. 12, n. 1, pp. 61–74, 1976.

[3] B. Kjerfve. “Comparative oceanography of coastal lagoons”. Estuarine variability, pp. 63–81. Academic Press, [s.l.], 1986.

[4] S. Teurlincx et al. “Towards restoring urban waters: understanding the main pressures”. Current Opinion in Environmental Sustainability, v. 36, pp. 49–58, 1 fev. 2019.

[5] C. Marinho, A. L. Fonseca, F. Esteves. “Impactos antrópicos nas lagoas costeiras do norte do estado do Rio de Janeiro: uma revisão sobre a eutrofização artificial e gases de efeito estufa”. Revista Brasileira de Pós-Graduação, v. 13, pp. 703, 2016.

[6] I. Ogashawara et al.. “Bio-optical modeling in a tropical hypersaline lagoon environment”. Environmental applications of remote sensing. IntechOpen, [s.l.], 2016.

[7] M. F. L. Souza et al. “Nutrient budgets and trophic state in a hypersaline coastal lagoon: Lagoa de Araruama, Brazil”. Estuarine, Coastal and Shelf Science, v. 57, n. 5, pp. 843–858, 1 ago. 2003.

[8] C. A. I. de Lima. “O impacto da urbanização em lagoas do Rio de Janeiro: estudo de caso sobre as lagoas Rodrigo de Freitas e de Araruama”. Revista Educação Pública, v. 14, n. 2, 2014.

[9] F. L. Lobo et al.. “AlgaeMAp: Algae Bloom Monitoring Application for Inland Waters in Latin America”. Remote Sensing v. 13, n. 15, pp. 2874, 2021.

[10] S. Mishra, D. R. Mishra. “Normalized difference chlorophyll index: a novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters”. Remote Sensing of Environment, v. 117, pp. 394–406, 2012.

[11] A. I. Dogliotti et al..”A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters”. Remote Sensing of Environment, v. 156, pp. 157-168, 2015.

[12] J. L. Geirinhas, et al.. “Climatic Characterization of Heat Waves in Brazil”. Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ, v. 41, pp. 333-350, 2018.