SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO À QUALIDADE DA ÁGUA EM AMBIENTES LÓTICOS E LÊNTICOS NO BRASIL: UMA REVISÃO DE MODELOS PARA ESTIMATIVA DE CLOROFILA-A E TURBIDEZ

José Sávio Bezerra [1] *; Janine Brandão de Farias Mesquita* [2]

RESUMO – Este estudo apresenta uma revisão bibliográfica sistemática e exploratória sobre a aplicação do sensoriamento remoto (SR) no monitoramento da qualidade da água em ambientes lóticos e lênticos no Brasil, com foco na estimativa de clorofila-*a* e turbidez. Foram analisados estudos publicados entre 2013 e 2025, comparando o desempenho de sensores como Landsat-8, Sentinel-2 e ASD FieldSpec. Os resultados indicam que, embora bandas isoladas (como a do vermelho) apresentem boa acurácia em cenários específicos, a complexidade óptica dos reservatórios brasileiros, especialmente no semiárido, exige frequentemente o uso de razões de bandas e modelos multiespectrais para mitigar interferências. A integração com ferramentas de processamento em nuvem, como o Google Earth Engine, demonstrou ser eficaz para o monitoramento de séries históricas e desastres ambientais em larga escala. A revisão evidencia a inexistência de um modelo universal de predição, reforçando a necessidade de calibrações regionais contínuas. Conclui-se que o SR é uma solução indispensável para a gestão estratégica dos recursos hídricos, permitindo capturar a heterogeneidade espacial e temporal necessária para garantir a segurança hídrica e a fiscalização ambiental em território nacional.

ABSTRACT– This study presents a systematic and exploratory literature review on the application of remote sensing (RS) for water quality monitoring in lotic and lentic environments in Brazil, focusing on chlorophyll-a and turbidity estimation. Studies published between 2013 and 2025 were analyzed, comparing the performance of sensors such as Landsat-8, Sentinel-2, and ASD FieldSpec. The results indicate that, although single bands (such as the red band) show good accuracy in specific scenarios, the optical complexity of Brazilian reservoirs, particularly in the semiarid region, often requires the use of band ratios and multispectral models to mitigate interferences. Integration with cloud computing platforms, such as Google Earth Engine, has proven effective for monitoring historical time series and large-scale environmental disasters. This review highlights the absence of a universal prediction model, reinforcing the need for continuous regional calibrations. It is concluded that RS is an indispensable solution for strategic water resource management, enabling the capture of the spatial and temporal heterogeneity necessary to ensure water security and environmental enforcement nationwide.

Palavras-Chave – Sensoriamento Remoto; Monitoramento Hídrico; Modelos Empíricos.

[1]) Mestrando em Gestão e Regulação em Recursos Hídricos, Universidade Federal do Ceará (UFC), Campus Crateús, engsaviobezerra@gmail.com
[2]) Professora Adjunta, Universidade Federal do Ceará (UFC), Campus Crateús, janine@crateus.ufc.br

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a segurança hídrica enfrenta desafios crescentes devido à convergência entre expansão demográfica, urbanização e intensificação agroindustrial, cenário agravado pelas mudanças climáticas globais. Essa vulnerabilidade manifesta-se de forma crítica no Nordeste brasileiro (NEB), onde a fragilidade decorrente de dinâmicas hidroclimáticas erráticas impõe riscos severos ao abastecimento (Lima, Mamede e Lima Neto, 2018). Nessa região, a instabilidade do regime hídrico e as elevadas taxas de evaporação potencializam processos de eutrofização, tornando os reservatórios propensos a florações de cianobactérias e ao aumento da turbidez (Lopes *et al*., 2021).

O monitoramento desses corpos d'água é tradicionalmente realizado por coletas pontuais, que, embora precisas, falham em capturar a heterogeneidade espacial e a dinâmica temporal de grandes sistemas (Oliveira, 2021). Nesse sentido, o sensoriamento remoto (SR) surge como uma solução disruptiva, permitindo a extração de informações quantitativas sobre constituintes opticamente ativos (COAs), como a clorofila-*a* e os sedimentos em suspensão, por meio da análise da reflectância espectral (Santos; Pereira Filho, 2020).

Sensores modernos como o OLI (Landsat-8) e o MSI (Sentinel-2) oferecem resoluções espaciais e espectrais que possibilitam a aplicação de algoritmos complexos, superando as limitações dos sensores de gerações anteriores (Pahlevan *et al*., 2017). A integração dessas imagens com ferramentas de computação em nuvem, como o Google Earth Engine, tem permitido o processamento de séries históricas e a análise de eventos críticos, como desastres ambientais e secas prolongadas (Brito, 2018).

Diante disso, o presente trabalho propõe uma revisão sobre o emprego do sensoriamento remoto no monitoramento da qualidade da água no Brasil, com foco específico na estimativa de clorofila-*a* e turbidez. O objetivo é sistematizar os modelos empíricos e as configurações de bandas de melhor desempenho, ponderar a aplicabilidade de distintos sensores e discutir como as características hidrológicas regionais influenciam a precisão das estimativas.

2. METODOLOGIA

Este estudo empregou uma revisão bibliográfica sistemática e exploratória, analisando criticamente a literatura científica para consolidar o conhecimento sobre o comportamento espectral da água e a eficácia de algoritmos para recuperação de parâmetros limnológicos. A estratégia de busca foi delineada para investigar as interações entre o sensoriamento remoto e a análise da

qualidade da água, utilizando palavras-chave em português e inglês, como "Qualidade da Água", "Sensoriamento Remoto", "Landsat 8", "Sentinel", "clorofila-*a*", "turbidez" e "semiárido", combinadas por operadores booleanos (AND, OR). A pesquisa foi realizada nas bases de dados SciELO, ScienceDirect, SpringerLink, Portal de Periódicos da CAPES e repositórios institucionais de ensino e pesquisa.

Inicialmente, foram analisados 26 estudos abrangendo todas as regiões do Brasil, os quais mencionavam a estimativa de clorofila-*a* e turbidez por meio de sensores orbitais. Após uma triagem baseada em critérios de relevância técnica, acurácia estatística e atualidade (publicações de 2013 a 2025), foram selecionados 7 estudos principais para compor o núcleo desta revisão. A seleção final priorizou, em sua grande maioria, pesquisas realizadas na região Nordeste, devido às particularidades ópticas de seus reservatórios, buscando estabelecer um comparativo com estudos emblemáticos das regiões Sudeste, Centro-Oeste e Sul para identificar padrões nacionais de modelagem. Os resultados foram sistematizados de forma temática na Tabela 1.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da produção científica recente revela uma evolução significativa no uso de geotecnologias para o monitoramento da qualidade da água em território nacional. Embora a revisão tenha perpassado por 26 trabalhos de todas as regiões brasileiras, a predominância de modelos robustos e validados concentra-se em reservatórios estratégicos, com destaque para o semiárido nordestino. A Tabela 1 apresenta a distribuição dos estudos selecionados que serviram de base para as discussões subsequentes. Cabe destacar que a referida seleção não esgota a vasta produção acadêmica sobre o tema, uma vez que existem diversas outras pesquisas relevantes conduzidas no semiárido brasileiro que também contribuem para o avanço do conhecimento na área.

Tabela 1 – Estudos incluídos na revisão

Região/Reservatório	Sensor utilizado	Foco do estudo	Desempenho Principal
Nordeste (Ceará - Orós)	ASD FieldSpec	Chl-*a*	R^2 = 0,88 (Modelo de 3 bandas)
Nordeste (Ceará - Quixeramobim)	Landsat-8 (OLI)	Chl-*a* e Turbidez	R^2 > 0,9 (Banda Vermelha B4)
Nordeste (Ceará –	Landsat-8 (OLI)	Chl-*a*	R^2 = 0,9976 (Razão

Edson Queiroz)			B5/B6)
Sudeste (SP – RMSP: Billings, Guarapiranga e Rio Grande)	Sentinel-2	Chl-*a*	R^2 = 0,92 (Modelo Dall'Olmo)
Sudeste (MG - Rio Doce)	Landsat-8 / GEE	Turbidez pós-desastre	Aumento de 445% na turbidez
Centro-Oeste (DF - Lago Paranoá)	Landsat 5	Turbidez (MLME)	Identificação de plumas de poluição
Sul (RS - Lagoa Mirim)	Sentinel-2 / GEE	Turbidez	R^2 = 0,70 (B3 e B8)

No Nordeste brasileiro, o monitoramento de reservatórios eutróficos ganha relevância devido à instabilidade hídrica. Lopes *et al*. (2021), ao estudarem o reservatório Orós (CE) com radiometria de campo (ASD FieldSpec), demonstraram que modelos de três bandas (comprimentos de onda de $\lambda 1$ = 660 nm, $\lambda 2$ = 690 nm e $\lambda 3$ = 717 nm) são superiores na estimativa de clorofila-*a* em águas opticamente complexas, alcançando um R^2 de 0,88 e um erro médio absoluto de apenas 5,35µg/L.

Em convergência, Bezerra (2024) avaliou o açude Quixeramobim (CE) utilizando o sensor OLI (Landsat-8), identificando que a banda do vermelho (B4) isolada apresentou um bom ajuste ($R^2 > 0,9$) tanto para clorofila-*a* quanto para turbidez, com RMSE de 1,91 µg/L e 0,106 NTU, respectivamente, validando o uso de séries temporais para capturar variações sazonais vinculadas ao volume hídrico.

Contudo, a aplicabilidade de bandas isoladas parece depender da complexidade do corpo d'água. No reservatório Edson Queiroz (CE), Oliveira (2025) utilizou o satélite Landsat 8-OLI e a técnica do ano representativo para a estimativa de clorofila-*a*. Em contraste ao observado no açude Quixeramobim, a banda B4 isolada foi ineficaz ($R^2 < 0,5$), sendo superada pela razão B5/B6 (NIR/SWIR1), que obteve ajuste superior (R^2 = 0,9976). Esse contraste reforça que, mesmo dentro da mesma região geográfica, a variabilidade na composição da água exige calibrações locais específicas, especialmente em sistemas que utilizam comprimentos de onda mais longos para mitigar a interferência de sólidos suspensos.

Diferente do cenário de reservatórios do semiárido, o monitoramento em áreas metropolitanas do Sudeste exige alta resolução espectral. Crioni, Teramoto e Chang (2023) investigaram reservatórios urbanos em São Paulo (Billings, Guarapiranga e Rio Grande) utilizando o satélite Sentinel-2. O estudo revelou que o modelo exponencial de Dall'Olmo alcançou a maior precisão na estimativa de clorofila-*a* (R^2 = 0,92), dentre os demais modelos testados (Gitelson *et al*., R^2 = 0,90; Banda única, R^2 = 0,71). Os autores concluíram que a alta resolução espectral do Sentinel-2, especialmente na região do *red-edge*, é superior para o monitoramento sistemático de sistemas hipereutróficos em áreas metropolitanas.

Ainda no Sudeste, mas voltado à dinâmica fluvial, Brito (2018) utilizou a plataforma Google Earth Engine (GEE) para analisar o Rio Doce (MG) pós-desastre de Mariana. O estudo quantificou mudanças drásticas na qualidade da água, registrando um aumento de 445% na turbidez e uma redução de 29% na transparência (disco de Secchi) logo após o desastre. A pesquisa evidenciou o potencial do processamento em nuvem para o monitoramento de eventos críticos em larga escala.

No contexto da região Centro-Oeste, Bias, Barbosa e Brites (2013) aplicaram o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) no Lago Paranoá (DF). Utilizando imagens do satélite Landsat 5 TM, os autores discriminaram classes de “águas brancas” e “pretas” para avaliar a influência da sazonalidade. O estudo revelou que as áreas de baixa turbidez aumentaram de 10% no período chuvoso para 45% no seco, evidenciando o forte impacto do escoamento superficial e de plumas de poluição urbanas, como as do Córrego Riacho Fundo. Essa abordagem confirmou a eficácia do MLME em mapear a heterogeneidade hídrica, permitindo identificar as zonas centrais do lago como as mais preservadas para a captação de água.

Na região Sul do Brasil, Caballero *et al.* (2023) monitoraram a turbidez na Lagoa Mirim (RS) integrando imagens Sentinel-2 à plataforma Google Earth Engine. O modelo de melhor desempenho utilizou a combinação das bandas do verde (B3) e infravermelho próximo (B8), alcançando um ajuste de R^2 = 0,70 e identificando valores médios entre 30 e 75 NTU. Os autores observaram que a porção sul da lagoa, por ser mais rasa e estreita, apresenta maior acúmulo de sedimentos em comparação ao setor norte, reafirmando a eficiência do processamento em nuvem para a gestão de sistemas lagunares de grande extensão.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta revisão evidenciou que o sensoriamento remoto transcende o monitoramento tradicional ao capturar a heterogeneidade espacial da clorofila-*a* e turbidez em ambientes lóticos e

lênticos. A série Landsat destaca-se como ferramenta indispensável nesse processo, oferecendo robustez espectral e uma série histórica essencial para calibrações precisas e análises de tendências sazonais. Sua utilidade é potencializada pela integração com o processamento em nuvem, permitindo a gestão de sistemas hídricos extensos e uma resposta ágil a eventos críticos e desastres ambientais.

Todavia, a variabilidade óptica dos corpos d'água brasileiros reforça a inexistência de um modelo universal, exigindo calibrações regionais contínuas e o uso estratégico de sensores complementares, como o Sentinel-2, em sistemas hipereutróficos. Conclui-se que a incorporação definitiva dos dados Landsat e de geotecnologias avançadas pelas instâncias gestoras é fundamental para otimizar a fiscalização e garantir a segurança hídrica, especialmente em regiões de elevada vulnerabilidade como o semiárido brasileiro.

AGRADECIMENTOS – O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), através do Convênio CAPES/UNESP No. 951420/2023. Agradeço ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua pelo apoio técnico científico aportado até o momento. O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – Brasil, Edital Chamada CNPq/MCTI/FNDCT Nº 44/2024 – Chamada Universal, processo nº404286/2025-9.

REFERÊNCIAS

BEZERRA, José Sávio. Avaliação da qualidade da água no açude Quixeramobim, semiárido cearense, utilizando sensoriamento remoto. 2024. Monografia (Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal do Ceará.

BIAS, Edilson de Souza; BARBOSA, Felipe Lima Ramos; BRITES, Ricardo Seixas. Emprego de imageamento passivo na análise da variabilidade espacial da turbidez no espelho d'água do Lago Paranoá, Distrito Federal. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, p. 55-64, 2013. https://doi.org/10.1590/S1413-41522013000100007.

BRITO, Higor Costa de et al. Aplicação de sensoriamento remoto como ferramenta de monitoramento de parâmetros de qualidade da água em corpos hídricos. 2018. Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande.

CABALLERO, Cassia Brocca et al. Predictive model for monitoring water turbidity in a subtropical lagoon using Sentinel-2A/B MSI images. **RBRH**, v. 28, p. e5, 2023. https://doi.org/10.1590/2318-0331.282320220097.

CRIONI, Pedro Luiz Becaro; HIDEO TERAMOTO, Elias; CHANG, Hung Kiang. Monitoramento de Clorofila-*a* em reservatórios da Região Metropolitana de São Paulo: Aplicação de modelos com imagens Sentinel-2. **Geoambiente On-line,** Goiânia, n. 47, 2023. Disponível em: https://revistas.ufj.edu.br/geoambiente/article/view/76164. Acesso em: 22 mai. 2026.

LOPES, Fernando Bezerra et al. Modelling chlorophyll-a concentrations in a continental aquatic ecosystem of the Brazilian semi-arid region based on remote sensing. **Revista Ciência Agronômica**, v. 52, p. 20207210, 2021. https://doi.org/10.5935/1806-6690.20210028.

LIMA, Berthyer Peixoto; MAMEDE, George Leite; LIMA NETO, Iran Eduardo. Monitoring and modeling of water quality in a semiarid watershed. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 23, p. 125-135, 2018. https://doi.org/10.1590/S1413-41522018167115.

OLIVEIRA, Anderson de. Sensoriamento remoto orbital para estimar parâmetros de qualidade da água: Um estudo na Represa Billings, São Paulo, Brasil. 2021. Programa de Pós-Graduação em Cidades Inteligentes e Sustentáveis – Universidade Nove de Julho.

OLIVEIRA, Edimara Torres. Sensoriamento remoto aplicado à avaliação da qualidade da água do reservatório Edson Queiroz, Ceará. 2025. Monografia (Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal do Ceará.

PAHLEVAN, Nima et al. Sentinel-2 MultiSpectral Instrument (MSI) data processing for aquatic science applications: Demonstrations and validations. **Remote sensing of environment**, v. 201, p. 47-56, 2017. 017. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.08.033.

SANTOS, Felipe Correa dos; PEREIRA FILHO, Waterloo. Estimativa de constituintes opticamente ativos da água por sensoriamento remoto orbital. **Geo UERJ**, n. 37, p. e38068-e38068, 2020. https://doi.org/10.12957/geouerj.2020.38068.