

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

AVALIAÇÃO DA TURBIDEZ COM IMAGENS DE SATÉLITE NO AÇUDE QUIXERAMOBIM, SEMIÁRIDO CEARENSE

José Sávio Bezerra¹; Antonia Letícia Paiva de Sousa² & Janine Brandão de Farias Mesquita³

RESUMO – O presente estudo teve como objetivo estimar a turbidez no açude Quixeramobim, localizado no semiárido cearense, por meio da aplicação de técnicas de sensoriamento remoto. Para isso, foram utilizadas imagens do satélite Landsat 8-OLI referentes ao período de 2013 a 2023, processadas no software QGIS (versão 3.28) e analisadas estatisticamente com o auxílio do Jamovi. Foram testados 15 algoritmos baseados em diferentes combinações espectrais do sensor OLI, a fim de avaliar sua capacidade preditiva em relação aos dados de turbidez. A partir da análise de correlação entre os valores estimados e os dados de reflectância, destacaram-se duas combinações espectrais com melhor desempenho. Dentre elas, a banda do vermelho (B4) apresentou melhor desempenho, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,9614 e erro quadrático médio (RMSE) de 0,106 NTU. Considerando o ano de 2021 como referência, os valores de turbidez variaram entre 4,7339 NTU e 8,9611 NTU. Os resultados obtidos reforçam a eficácia do sensoriamento remoto como ferramenta para o monitoramento da qualidade da água, evidenciando sua aplicabilidade na estimativa da turbidez, desde que acompanhada de calibração adequada dos modelos e correções atmosféricas precisas.

ABSTRACT – This study aimed to estimate turbidity in the Quixeramobim reservoir, located in the semi-arid region of Ceará, Brazil, using remote sensing techniques. To achieve this, images from the Landsat 8-OLI satellite, covering the period from 2013 to 2023, were processed using QGIS software (version 3.28) and statistically analyzed with Jamovi. Fifteen algorithms, based on different spectral combinations of the OLI sensor, were tested to evaluate their predictive capability regarding turbidity data. From the correlation analysis between the estimated values and reflectance data, two spectral combinations showed superior performance. Among these, the red band (B4) performed best, with a coefficient of determination (R^2) of 0.9614 and a root mean square error (RMSE) of 0.106 NTU. Considering 2021 as a reference year, turbidity values ranged between 4.7339 NTU and 8.9611 NTU. The obtained results reinforce the effectiveness of remote sensing as a tool for water quality monitoring, demonstrating its applicability in turbidity estimation, provided that adequate model calibration and precise atmospheric corrections are applied.

Palavras-Chave – Qualidade da água; Imagens de satélite; Correção atmosférica.

¹⁾ Mestrando em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Universidade Federal do Ceará (UFC), engsaviobezerra@gmail.com

²⁾ Mestranda em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Universidade Federal do Ceará (UFC), antonialeticiapaiva@alu.ufc.br

³⁾ Professora Adjunta, Universidade Federal do Ceará (UFC), janine@crateus.ufc.br.

1. INTRODUÇÃO

O aumento da demanda hídrica e a escassez de água em regiões áridas e semiáridas são fatores que intensificaram a construção de reservatórios e sistemas de transferência hídrica entre bacias hidrográficas (França *et al.*, 2022). Apesar dessas soluções propiciarem maior segurança hídrica em aspecto quantitativo, o monitoramento da qualidade da água em reservatórios é essencial para a gestão hídrica sustentável. Esse instrumento permite a coleta de dados limnológicos e, assim, são extraídas informações relevantes sobre a higidez de ecossistemas aquáticos (Da Silva Gomes *et al.*, 2022). Essamlali *et al.* (2024) enfatizam que o monitoramento da qualidade da água exige uma perspectiva interdisciplinar, a qual envolve o entendimento dos fatores que impactam a qualidade da água, a construção de estratégias para otimizar e gerenciar os recursos hídricos, e a implementação de políticas e normas para regular as atividades antrópicas com potencial de alterar essa qualidade.

A análise da qualidade da água abrange um conjunto de parâmetros físicos, químicos e biológicos, como Oxigênio Dissolvido (OD), Sólidos Dissolvidos Totais (SDT), Sólidos Suspensos Totais (SST), pH (potencial hidrogeniônico), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Turbidez, Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Nitrogênio Amoniacal (NH₃N) (Kumar *et al.*, 2020). Esses parâmetros podem ser obtidos *in situ*, com métodos analíticos em laboratórios e por meio do uso de dados espaciais do sensoriamento remoto (Zhou *et al.*, 2021; Adjovu *et al.*, 2023; Mamun *et al.*, 2024).

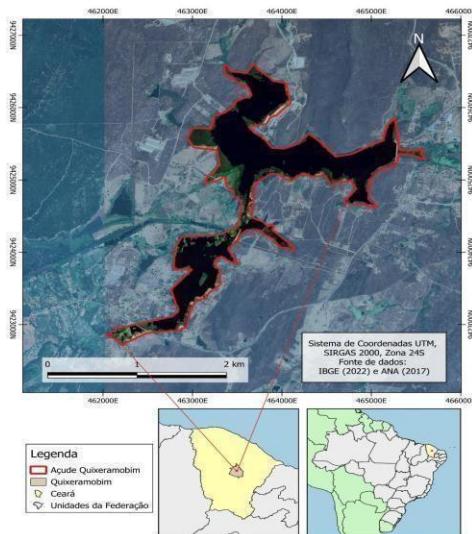
A utilização da técnica do sensoriamento remoto na medição de variáveis da qualidade da água como a turbidez, nitrogênio e clorofila-a, tem sido testada e aprovada a sua eficácia em diversos estudos (Prasad *et al.*, 2017; Serbeto *et al.*, 2021; Amaral, 2022; Li *et al.*, 2023; Mamun & Yang, 2025). Essa ferramenta mostrou sua eficácia tanto na medição de variáveis da qualidade da água isoladas quanto na obtenção de índices, como o Índice de Estado Trófico (IET). Nessa perspectiva, o presente estudo objetiva realizar o monitoramento da qualidade da água empregando esta ferramenta em um reservatório do Sertão Central do Ceará, o açude Quixeramobim. Almeja-se elaborar uma série temporal de dados da turbidez para correlacionar com dados medidos em campo.

2. METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

O presente estudo tem como área de investigação o açude Quixeramobim, localizado no município homônimo, situado na região do Sertão Central do estado do Ceará, Nordeste do Brasil, indicado na Figura 1. Este reservatório encontra-se inserido na bacia hidrográfica do rio Banabuiú, tendo como principal curso d'água contribuinte o rio Quixeramobim, conforme informações do inventário hidrológico da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará – COGERH (Ceará, 2011). Caracterizado por um clima Tropical Quente Semiárido, o semiárido cearense apresenta condições climáticas marcadas por baixa pluviosidade, altas temperaturas médias ao longo do ano e elevada taxa de evaporação, fatores que exercem forte influência sobre a disponibilidade e a qualidade dos recursos hídricos da região.

Figura 1 - Mapa de localização do açude Quixeramobim, estado do Ceará.



2.2 Metodologia empregada para a realização da estimativa

2.2.1 Aquisição e pré-processamento dos dados

Diante da importância de compreender os fatores que afetam diretamente a qualidade da água em ambientes aquáticos tropicais, este estudo busca analisar a variação temporal do parâmetro turbidez no açude Quixeramobim através da aplicação da técnica de sensoriamento remoto. Para isso, foram utilizados dados de qualidade da água provenientes do banco de dados da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará – COGERH, abrangendo o período de 2013 a 2023. As informações de volume do reservatório no mesmo intervalo temporal foram obtidas através do Portal Hidrológico do Ceará, permitindo uma abordagem integrada entre dados medidos *in situ* e imagens de satélite para investigar a dinâmica da turbidez ao longo do tempo.

Foram utilizadas imagens do satélite Landsat 8 (sensor OLI), adquiridas entre 2013 e 2023 por meio da plataforma do USGS. A seleção das cenas considerou baixa cobertura de nuvens e proximidade das datas em relação às coletas de campo realizadas pela COGERH. Para a análise da turbidez, foram empregadas cinco bandas espectrais: B3 (verde), B4 (vermelho), B5 (infravermelho próximo – NIR), B6 e B7 (infravermelho médio – SWIR 1 e 2, respectivamente). Os dados *in situ* de turbidez variaram entre 1,61 e 105,9 NTU, enquanto os volumes do açude, nas datas correspondentes às imagens e coletas, oscilaram entre 0,24 e 7,89 hm³. As imagens selecionadas apresentaram cobertura de nuvens entre 0,01% e 25,96%, garantindo compatibilidade com os dados de campo.

Após essa etapa, as imagens foram processadas no software QGIS, versão 3.28, com o objetivo de aplicar a correção atmosférica. Para isso, foi utilizado o plugin *Semi-Automatic Classification* (SCP), amplamente empregado em estudos de sensoriamento remoto, como o de Melo *et al.* (2015) e de Bezerra *et al.* (2024), para o parâmetro clorofila-a. Essa ferramenta possibilita a conversão dos níveis de cinza das imagens para valores de reflectância no topo da atmosfera (TOA *reflectance*), etapa essencial para garantir a comparabilidade dos dados espectrais.

Tomando como base a abordagem metodológica proposta por Prasad *et al.* (2017), que demonstraram resultados consistentes na estimativa de turbidez e clorofila-a por meio de sensoriamento remoto, foram avaliadas 15 combinações espectrais com o objetivo de estimar a turbidez no açude Quixeramobim. As variáveis selecionadas contemplaram reflectâncias de bandas individuais, transformações logarítmicas e razões espectrais simples e compostas, incluindo: B3, B4, Log B3, Log B4, B3/B5, B4/B5, Log (B3/B5), Log (B3/B6), Log (B3/B7), Log (B4/B5), Log (B4/B6), Log (B4/B7), Log B6/Log B3, Log B6/Log B4 e Log B7/Log B4.

2.2.2 Predição da Turbidez

A avaliação da qualidade da água foi conduzida por meio de estatísticas descritivas (como média, mediana e desvio médio) aplicadas aos dados de volume do reservatório nas datas correspondentes às coletas. Essa análise foi realizada tanto para o conjunto completo de dados quanto de forma segmentada por ano, com o objetivo de promover uma interpretação exploratória e compreender o padrão de distribuição temporal. A escolha do volume como variável de apoio se justifica por sua tendência a apresentar variações mais graduais e lineares ao longo do tempo, diferentemente da turbidez, cujos valores podem sofrer oscilações abruptas em resposta a eventos pontuais, como chuvas intensas ou aumento da carga de sedimentos.

A partir do tratamento estatístico dos dados, foi possível identificar o período que melhor representa as condições limnológicas do açude Quixeramobim em relação ao parâmetro turbidez. O ano de 2021 foi selecionado por apresentar o menor desvio médio observado (0,158) e uma média volumétrica (2,5975 hm³) bastante próxima da média geral do conjunto de dados analisado (3,1424 hm³). Essa proximidade estatística reforça sua adequação como referência para a predição do referido parâmetro ao longo da série temporal.

Na etapa seguinte, foi construído um gráfico de dispersão com linha de tendência em escala exponencial, representando a variação dos valores de turbidez obtidos nas campanhas de campo em função do volume armazenado no reservatório, tomando como referência os dados do ano de 2021. A partir dessa nova estimativa, foi possível estabelecer a correlação com os volumes registrados nas datas das cenas de satélite. Esta etapa abrangeu todo o período analisado, compreendido entre os anos de 2013 e 2023.

Após definir o ano representativo e estimar os valores de turbidez, construiu-se um gráfico de dispersão para correlacionar esses valores com a reflectância média de diferentes combinações das bandas do satélite Landsat 8. Das 15 variáveis analisadas, duas se destacaram pelo melhor desempenho estatístico. Com base nelas, elaborou-se um gráfico relacionando as estimativas por sensoriamento remoto com o volume do reservatório nas datas das cenas do ano selecionado. Por fim, calculou-se o erro quadrático médio (RMSE) para avaliar a acurácia das estimativas e identificar a banda espectral mais adequada à recuperação da turbidez.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

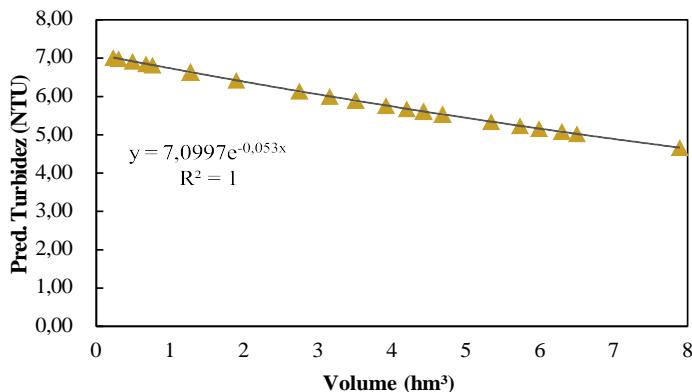
A Equação 1, obtida da correlação entre os dados de turbidez e o volume do reservatório nas datas de amostragem, foi aplicada para ajustar as estimativas de turbidez nas datas das imagens capturadas pelo satélite Landsat 8. O volume do reservatório em cada cena foi utilizado como a variável preditora (x), permitindo o cálculo das previsões de turbidez para essas datas. Essa abordagem possibilitou uma análise quantitativa da relação entre a dinâmica hidrológica do açude e a variação do parâmetro em estudo ao longo do período analisado.

$$\text{Pred. Turbidez} = -7,0997 \cdot e^{0,053(X)} \quad (1)$$

Dessa forma, com base na Equação 1 obtida e no coeficiente de determinação alcançado ($R^2 = 0,7505$), que indica um nível satisfatório de correlação entre o volume do reservatório e os valores estimados de turbidez, foi realizado o ajuste das concentrações desse parâmetro para as datas correspondentes às cenas do sensor Landsat 8. Esse procedimento permitiu adequar os dados às condições hidrológicas específicas de cada imagem, conferindo maior coerência temporal às análises realizadas.

Com base no desempenho da equação aplicada para a estimativa dos valores de turbidez a partir das imagens do satélite Landsat 8, no período de 2013 a 2023, foi possível correlacionar os resultados obtidos com os volumes do reservatório registrados nas respectivas datas das cenas, conforme apresentado na Figura 2. Observa-se, a partir dessa análise, uma linha de tendência exponencial inversa, indicando que o aumento do volume do reservatório está associado à diminuição da turbidez estimada por sensoriamento remoto, com um coeficiente de determinação $R^2 = 1$, evidenciando uma correlação perfeita entre as variáveis.

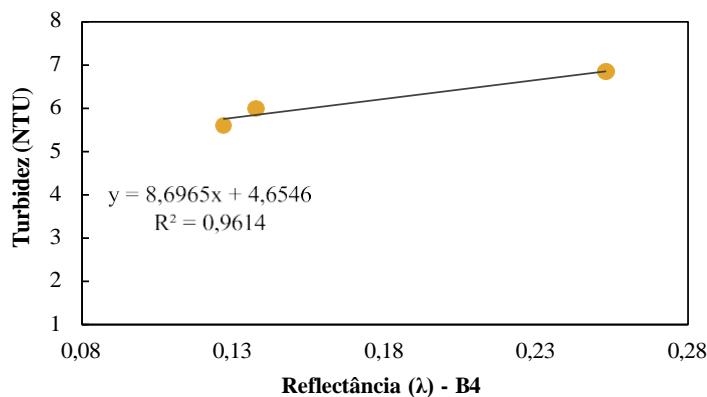
Figura 2 - Correlação entre os valores de turbidez preditos e o volume do açude Quixeramobim nas datas das cenas (2013-2023).



Martins *et al.* (2019), ao avaliarem a variação da água superficial e variabilidade da turbidez do reservatório de Sobradinho, no Nordeste Brasileiro, utilizando o sensoriamento remoto, verificaram a sazonalidade da turbidez, com valores elevados (acima de 50 NTU) na estação chuvosa e uma diminuição na estação seca (valores inferiores a 10 NTU). Ahmadi *et al.* (2025) enfatizam que o aumento da vazão pode modificar o transporte e a movimentação de partículas em suspensão na água. Isto pode explicar valores elevados de turbidez na água conforme o aumento da vazão.

Dentre as 15 variáveis analisadas para estimativa da turbidez, os resultados demonstraram correlações estatisticamente significativas para todas as datas analisadas do ano de 2021. Destacaram-se, nesse contexto, as bandas isoladas B3 e B4, cujos coeficientes de determinação (R^2) superaram 0,8, evidenciando forte relação entre a reflectância e os valores de turbidez observados em campo. A banda do vermelho (B4) apresentou o melhor desempenho, alcançando um coeficiente de determinação de $R^2 = 0,9614$, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Regressão em escala linear da reflectância da banda B4 em relação à predição dos valores de turbidez (2021).



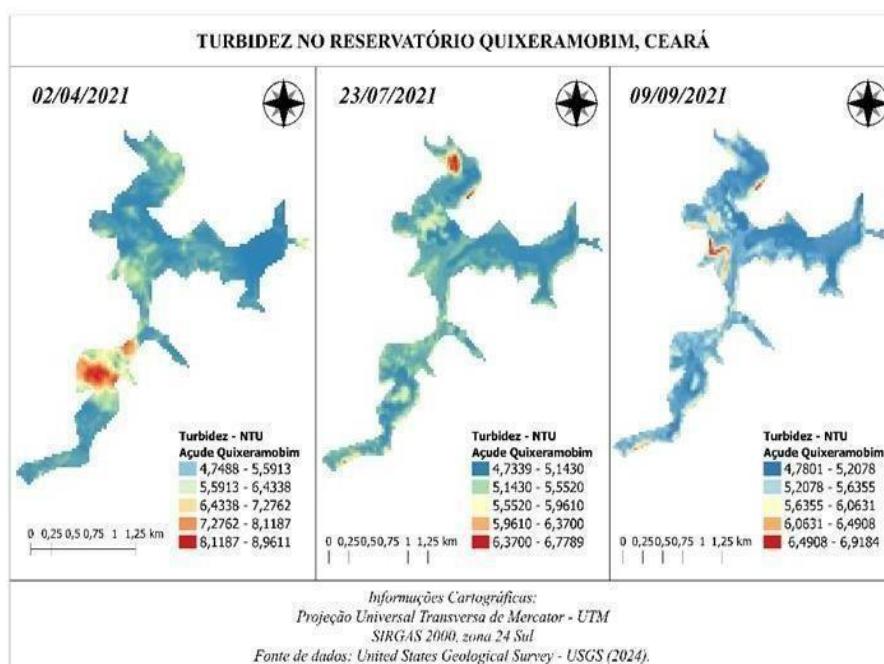
Conforme ilustrado na Figura 3, observa-se uma relação direta entre a reflectância espectral da banda B4 (vermelho) e os valores de turbidez no reservatório em questão. À medida que os valores de reflectância aumentam, também se verifica um acréscimo na turbidez, indicando uma tendência de comportamento proporcional. Essa correlação positiva reflete a sensibilidade da banda do vermelho à presença de partículas em suspensão na coluna d'água, resultado semelhante ao identificado no estudo de Maimouni *et al.* (2022) ao identificarem que a banda do vermelho apresentou melhor eficácia para a previsão da turbidez com boa precisão de validação ($R^2= 0,87$).

Com as equações de regressão geradas, conforme exemplificado na Figura 3, para a banda B4, que teve o melhor ajuste com os dados de referência deste parâmetro da qualidade de água, apresentando $R^2 = 0,9614$ e menor erro RMSE = 0,106 NTU, foi possível estimar com precisão os valores de turbidez a partir da reflectância capturada via sensoriamento remoto. Essa abordagem metodológica segue princípios semelhantes aos aplicados por Prasad *et al.* (2017) e Maimouni *et al.* (2022), que também empregaram modelos baseados na reflectância espectral para prever este parâmetro.

Hossain *et al.* (2021) obtiveram melhor desempenho do modelo para estimar a turbidez no Rio Tennessee utilizando a banda do vermelho, com um valor R^2 de 0,95. Já no estudo de Martins *et al.* (2019), a reflectância da superfície encontrada para estimar a turbidez foi bastante similar para as bandas verde (B3) e vermelha (B4), com coeficiente de correlação (R^2) de 0,961 e 0,98, respectivamente.

A Figura 4 apresenta o mapa espacial da distribuição da turbidez, estimada por meio da aplicação da reflectância da banda do vermelho. Com base nessa representação, observa-se que, no ano de 2021, os valores mínimos e máximos de turbidez foram de 4,7488 NTU e 8,9611 NTU, respectivamente. Destaca-se o mês de abril, inserido no período chuvoso da região, no qual há uma notável predominância de áreas com elevada turbidez ao longo do espelho d'água, possivelmente associada ao aumento do escoamento superficial e à suspensão de sedimentos no reservatório.

Figura 4 - Mapa da variação espacial dos valores de turbidez estimados pela banda B4 (Landsat 8).



4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da turbidez por meio de imagens de satélite mostrou-se uma ferramenta eficaz para o monitoramento da qualidade da água no açude Quixeramobim, no semiárido cearense. Com base nos dados de campo fornecidos pela COGERH, foi possível calibrar e validar modelos de estimativa de turbidez utilizando imagens do satélite Landsat 8.

Um dos principais desafios enfrentados no estudo foi a limitação na coincidência temporal entre as imagens e as coletas *in situ*, devido à escassez de cenas com baixa cobertura de nuvens. Ainda assim, os resultados obtidos foram satisfatórios, permitindo mapear a variação espacial e temporal da turbidez ao longo do período analisado.

A banda B4 (vermelho) destacou-se como a mais sensível às variações de turbidez, corroborando estudos anteriores que apontam sua eficácia na detecção de partículas em suspensão. Esses resultados reforçam o potencial do sensoriamento remoto como uma ferramenta estratégica para o monitoramento de recursos hídricos, com possibilidade de aplicação a outros indicadores de qualidade da água e reservatórios em contextos climáticos similares.

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. Também agradeço à Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH) e à Fundação Cearense de Meteorologia (FUNCENAME), por meio do Projeto MMCQual (Chamada Universal CNPq - Processo No: 409204/2023-4).

REFERÊNCIAS

- AHMADI, Milad *et al.* *Integrating river discharge and Sentinel-2 satellite imagery for enhanced turbidity mapping in arid region rivers: A machine learning approach.* **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 138, p. 103869, 2025.
- AMARAL, Julyanne B.C. *Estimativa de parâmetros de vegetação e de qualidade de água usando sensoriamento remoto.* 2022.
- ADJOVU, Godson Ebenezer *et al.* *Overview of the application of remote sensing in effective monitoring of water quality parameters.* **Remote Sensing**, v. 15, n. 7, p. 1938, 2023.
- BEZERRA, José Sávio; SOUSA, Antonia Letícia Paiva de; MESQUITA, Janine Brandão de Farias.(2024). *Estimativa da Concentração de Clorofila-a no Açude Quixeramobim, Sertão Central do Ceará, utilizando Sensoriamento Remoto.* **XVII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste.**
- CEARÁ. *Inventário Ambiental do Açude Quixeramobim.* Volume único. Fortaleza, Ceará. Dezembro, 2011.
- DA SILVA GOMES, Patrícia *et al.* *Avaliação espaço-temporal de constituintes opticamente ativos e caracterização espectral das águas de um reservatório no cerrado brasileiro.* **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 5, p. 2654-2670, 2022.

ESSAMLALI, Ismail; NHAILA, Hasna; EL KHAILI, Mohamed. *Advances in machine learning and IoT for water quality monitoring: A comprehensive review*. **Helyon**, 2024.

FRANÇA, Josefa Marciana Barbosa de et al. *Qualidade da água em um sistema de reservatórios em cascata—um estudo de caso no semiárido brasileiro*. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n. 1, p. 113-123, 2022. HOSSAIN, AKM Azad; MATHIAS, Caleb; BLANTON, Richard. *Remote sensing of turbidity in the Tennessee River using Landsat 8 satellite*. **Remote Sensing**, v. 13, n. 18, p. 3785, 2021.

HOSSAIN, A. A., Mathias, C., & Blanton, R. (2021). Remote sensing of turbidity in the Tennessee River using Landsat 8 satellite. *Remote Sensing*, 13(18), 3785.

KUMAR, D. Senthil; ASKARUNISA, A.; KUMAR, R. Mohan. *Embedded processor based automated assessment of quality of the water in an IoT background*. **Microprocessors and Microsystems**, v. 77, p. 103167, 2020.

LI, Sijia et al. *Remote quantification of the trophic status of Chinese lakes*. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 27, n. 19, p. 3581-3599, 2023.

MAMUN, Md; YANG, Xiao. Advancing lakes algal chlorophyll estimation in the contiguous USA: A comparative study of machine learning models and satellite data. *Ecological Informatics*, v. 87, p. 103087, 2025.

MAIMOUNI, Soufiane et al. *Spatiotemporal monitoring of low water turbidity in Moroccan coastal lagoon using Sentinel-2 data*. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 26, p. 100772, 2022.

MARTINS, Vitor S. et al. *Remote sensing of large reservoir in the drought years: Implications on surface water change and turbidity variability of Sobradinho reservoir (Northeast Brazil)*. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 13, p. 275-288, 2019.

MAMUN, Md; HASAN, Mahmudul; AN, Kwang-Guk. *Advancing reservoirs water quality parameters estimation using Sentinel-2 and Landsat-8 satellite data with machine learning approaches*. *Ecological Informatics*, v. 81, p. 102608, 2024.

MELO, Amanda et al. *Estimação da concentração de clorofila nos lagos Bolonha e Água Preta através do uso de sensoriamento remoto*. **XXI Simpósio de Recursos Hídricos**, Brasília, p.8, 2015.

PRASAD, Satish; SALUJA, Ridhi; GARG, J. K. *Modeling chlorophyll-a and turbidity concentrations in river Ganga (India) using Landsat-8 OLI imagery*. In: **Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications VIII**. SPIE, p. 356-373, 2017.

SERBETO, Larissa Ferreira et al. *Determinação da Concentração de Clorofila-a por Sensoriamento Remoto no Reservatório de Chapéu d'Uvas (Mg), Brasil*. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 6, p. 3561-3576, 2021.

ZHOU, Qu et al. *Remotely sensed water turbidity dynamics and its potential driving factors in Wuhan, an urbanizing city of China*. **Journal of Hydrology**, v. 593, p. 125893, 2021.