DINÂMICA DA VEGETAÇÃO AQUÁTICA POR SENSORIAMENTO REMOTO NA ÁREA DE INFLUÊNCIA DAS USINAS LUIZ GONZAGA E PAULO AFONSO IV

Silmayko Gomes da Silva[1]; Erik Eduardo Honorio Pereira[2]; Eduarda Pinheiro Barbosa da Silva[3]; Alysson Matheus Pimentel de Morais[4]; Bianca Maria Lima Cruz Pereira[5]; Geraldo Arthur Teodozio Boia[6] & Manoel Mariano Neto[7]

RESUMO – O estudo analisou a dinâmica da vegetação aquática na área de influência das Usinas Hidrelétricas Luiz Gonzaga e Paulo Afonso IV por meio dos índices NDVI e NDCI obtidos por sensoriamento remoto no período de 2019 a 2025. Os dados foram processados na plataforma Google Earth Engine e relacionados à precipitação por meio da correlação de Pearson. Os resultados evidenciaram predominância de valores positivos para ambos os índices, indicando a presença de cobertura vegetal ativa e variações na concentração de clorofila-a. A precipitação apresentou correlação positiva moderada com o NDVI (r = 0,45) e o NDCI (r = 0,38), enquanto a maior associação foi observada entre os índices (r = 0,50). Os resultados demonstram a influência das condições climáticas sobre a dinâmica da vegetação e da clorofila na área de estudo, evidenciando o potencial do sensoriamento remoto para o monitoramento ambiental de reservatórios.

ABSTRACT– This study analyzed the dynamics of aquatic vegetation in the area influenced by the Luiz Gonzaga and Paulo Afonso IV Hydroelectric Power Plants using the NDVI and NDCI indices derived from remote sensing data between 2019 and 2025. The data were processed on the Google Earth Engine platform and related to precipitation through Pearson's correlation analysis. The results showed a predominance of positive values for both indices, indicating the presence of active vegetation cover and variations in chlorophyll-a concentration. Precipitation exhibited a moderate positive correlation with NDVI (r = 0.45) and NDCI (r = 0.38), while the strongest association was observed between the indices themselves (r = 0.50). The findings demonstrate the influence of climatic conditions on vegetation and chlorophyll dynamics in the study area, highlighting the potential of remote sensing for environmental monitoring of reservoirs.

Palavras-Chave – Sensoriamento remoto; Índices espectrais; Reservatórios.

INTRODUÇÃO

[1]) Universidade Federal de Alagoas (UFAL), E-mail: silmayko.silva@delmiro.ufal.br
[2]) Universidade Federal de Alagoas (UFAL), E-mail: erik.pereira@arapiraca.ufal.br
[3]) Universidade Federal de Alagoas (UFAL), E-mail: eduarda.silva@delmiro.ufal.br
[4]) Universidade Federal de Alagoas (UFAL), E-mail: alysson.morais@ctec.ufal.br
[5]) Universidade Federal de Alagoas (UFAL), E-mail: bianca.pereira@ceca.ufal.br
[6]) Universidade Federal de Alagoas (UFAL), E-mail: geraldo.arthur.boia@gmail.com
[7]) Universidade Federal de Alagoas (UFAL), E-mail: manoel.mariano@ctec.ufal.br

A qualidade e a disponibilidade da água em reservatórios têm sido progressivamente afetadas pela eutrofização, fenômeno associado ao aporte excessivo de nutrientes em sistemas aquáticos, especialmente nitrogênio (N) e fósforo (P). Esse processo pode ocasionar impactos adversos à saúde humana, ao meio ambiente, à sociedade e à economia, configurando-se como um dos principais desafios relacionados à gestão dos recursos hídricos (Cortez et al., 2022; Dodds et al., 2009).

Entre outros fatores, a eutrofização é favorecida pela modificação de ecossistemas aquáticos decorrente da construção de barragens e usinas hidrelétricas, as quais impõem barreiras físicas que alteram a dinâmica do ambiente, convertendo o sistema aquático de um regime lótico para um estado lêntico (Beghelli *et al*., 2016; Ogura *et al*., 2022).

O aporte abundante de nutrientes em reservatórios cria condições favoráveis para a proliferação de macrófitas aquáticas e fitoplâncton, os quais, embora desempenhem papel fundamental no ecossistema, podem recobrir parcelas significativas da superfície aquática, resultando no incremento do consumo de oxigênio dissolvido, no bloqueio da luz solar e, consequentemente, em prejuízos à vida aquática, além da degradação da paisagem e da diminuição da qualidade da água (Coladello *et al*., 2020; Henny *et al*., 2026; Igwaran *et al*., 2024; Mishra *et al*., 2022; Ogura *et al*., 2022).

Nesse contexto, o sensoriamento remoto tem sido amplamente utilizado como ferramenta de suporte ao monitoramento ambiental, por meio da aplicação de índices espectrais como o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e o NDCI (*Normalized Difference Chlorophyll Index*), associados, respectivamente, à avaliação do estado da vegetação terrestre e à estimativa da concentração de clorofila em ambientes aquáticos. A adoção dessas métricas tem se mostrado uma alternativa viável para subsidiar a tomada de decisão voltada à preservação da integridade do ecossistema fluvial e da biota aquática (Luz *et al*., 2022; Mishra; Mishra, 2012; Roy; Bari, 2022; Salls *et al*., 2024).

A partir dessa perspectiva, o presente estudo teve por objetivo analisar a dinâmica sazonal da vegetação aquática em trecho da bacia do Rio São Francisco influenciado pelas Usinas Hidrelétricas Luiz Gonzaga e Paulo Afonso IV, por meio dos índices NDVI e NDCI e sua relação com variáveis de precipitação e temperatura.

METODOLOGIA

Área de estudo

A área de estudo compreende um trecho da bacia hidrográfica do rio São Francisco, delimitado entre a Usina Hidrelétrica Luiz Gonzaga e a Usina Paulo Afonso IV (Figura 1). O trecho abrange municípios de três estados, Alagoas, Pernambuco e Bahia: Delmiro Gouveia (AL), Paulo Afonso (BA), Glória (BA) e Jatobá (PE).

O reservatório inserido nesse trecho do rio São Francisco possui relevância estratégica para a região Nordeste, contribuindo para a geração de energia hidrelétrica, o abastecimento hídrico e o desenvolvimento das atividades econômicas locais. Além de sua importância para o sistema energético nacional, o reservatório exerce influência sobre a dinâmica ambiental e socioeconômica dos municípios circunvizinhos, dando suporte a atividades como irrigação, pesca, turismo e demais usos múltiplos da água.

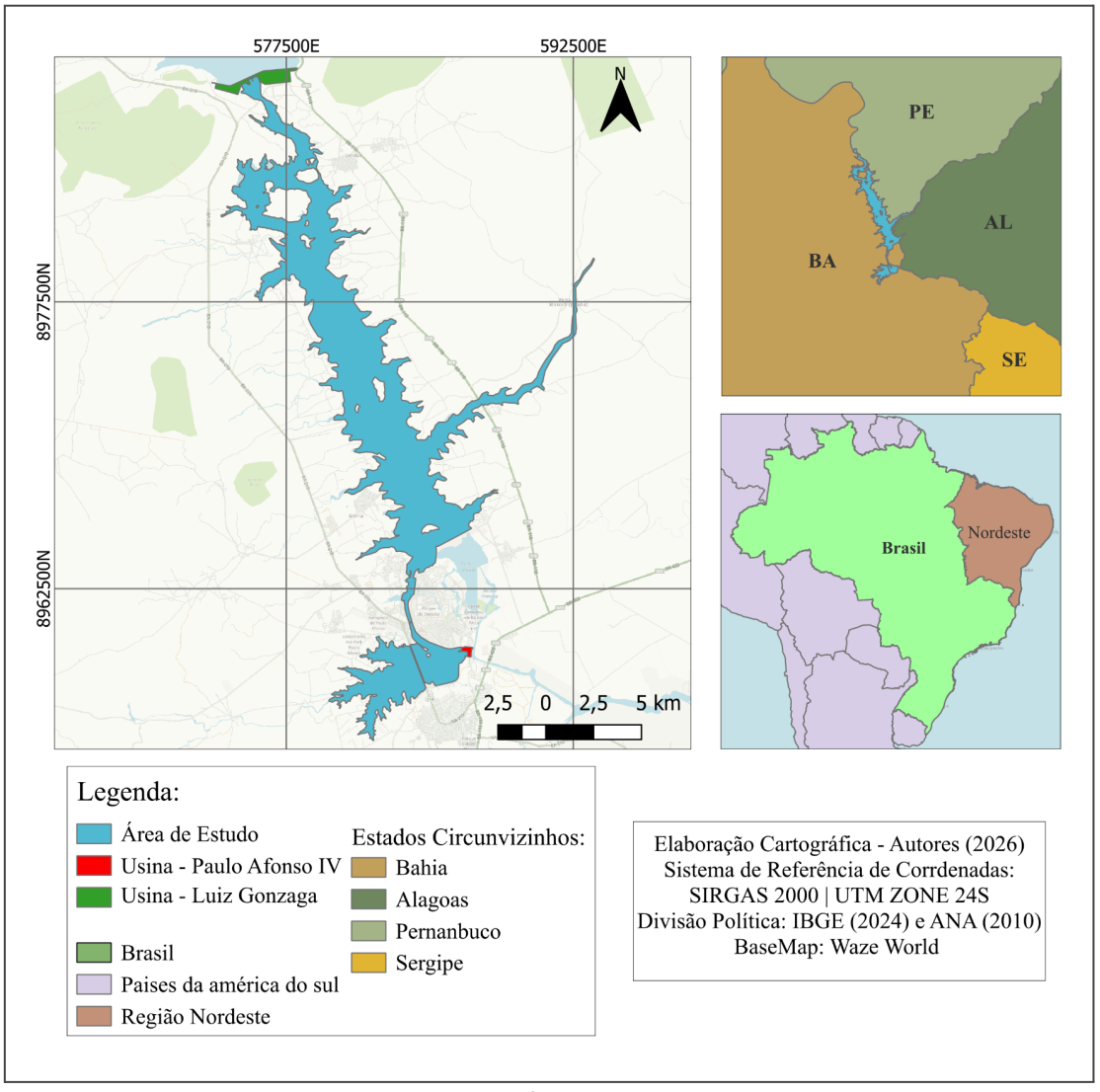


Figura 1 - Área de estudo.

A região está inserida na porção do semiárido nordestino, caracterizado por elevada insolação, temperaturas relativamente altas e regime pluviométrico marcado pela escassez, irregularidade e concentração das chuvas em um curto período do ano. A precipitação anual máxima é de 800 mm,

as temperaturas médias anuais variam entre 23 °C e 27 °C, e a umidade relativa do ar apresentou média em torno de 50% (Silva *et al.*, 2010).

Procedimentos Metodológicos

Foram utilizadas imagens do satélite Sentinel-2, disponibilizadas pelo programa Copernicus e previamente corrigidas atmosféricamente. As imagens correspondem ao período de 1º de janeiro de 2019 a 31 de dezembro de 2025, sendo selecionadas aquelas com cobertura de nuvens inferior a 20%, totalizando 101 imagens.

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é calculado a partir da diferença entre as reflectâncias das bandas do vermelho e do infravermelho próximo, conforme apresentado na Fórmula 1, sendo amplamente utilizado na avaliação da atividade fotossintética e do desenvolvimento vegetativo. Com base no mesmo princípio do NDVI, Mishra e Mishra (2012) propuseram o Índice de Clorofila por Diferença Normalizada (NDCI) como um indicador da concentração de clorofila-a em águas turvas produtivas de ambientes estuarinos e costeiros, sendo seu cálculo apresentado na Equação 2.

$$NDVI = \frac{(NIR-Red)}{(NIR+Red)} \quad (1)$$

$$NDCI = \frac{(RE-Red)}{(RE+Red)} \quad (2)$$

Sendo,

NIR, reflectância no infravermelho próximo, referente à banda 8;

Red, reflectância na faixa do vermelho, referente à banda 4;

RE, reflectância da banda Red Edge 1, referente à banda 5.

Os dados pluviométricos foram obtidos no Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), por meio da plataforma HidroWeb da ANA, a partir de duas estações pluviométricas: Quixaba (ANA_938029), localizada em Glória (BA), e Delmiro Gouveia (ANA_937013), localizada em Delmiro Gouveia (AL). As estações foram selecionadas em função da disponibilidade de dados para a série histórica analisada, correspondente ao mesmo período das análises de satélite. Os dados foram processados no software Hidro, desenvolvido pela ANA, para a obtenção das médias mensais de precipitação na região.

O Google Earth Engine (GEE) consiste em uma plataforma de computação em nuvem voltada ao processamento e à análise de dados geoespaciais e imagens de satélite em larga escala. A plataforma reúne um amplo acervo de dados orbitais e permite a aplicação de algoritmos e modelos em diferentes contextos de análise ambiental. Neste estudo, os índices NDVI e NDCI foram obtidos por meio de scripts desenvolvidos no ambiente da plataforma.

A correlação de Pearson foi utilizada para avaliar a associação linear entre as variáveis analisadas, por meio de um coeficiente que varia de −1 a +1, indicando a direção e a intensidade da relação. As análises foram realizadas na linguagem R, utilizando os dados organizados em um data frame

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da análise da série temporal apresentada no gráfico da Figura 2, observa-se que os índices NDCI e NDVI apresentaram predominância de valores positivos ao longo do período analisado (2019–2025), sugerindo a presença de cobertura vegetal ativa e condições moderadas de vigor vegetativo.

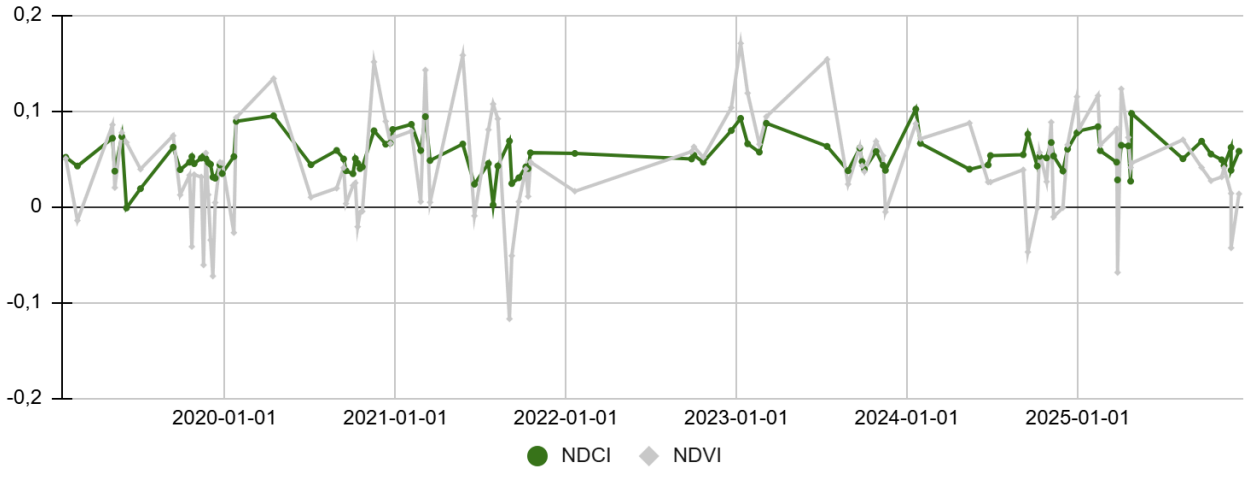


Figura 2 - Série temporal dos índices NDVI e NDCI no período de 2019 a 2025.

Para o NDCI, verificou-se oscilação entre aproximadamente -0,01 e 0,10 ao longo de todo o período, com picos superiores a 0,09 registrados em julho de 2020, março de 2021, setembro de 2022, janeiro de 2024 e abril de 2025. Observa-se ainda que o único valor próximo de zero ocorreu em torno de julho de 2019, sendo seguido por uma rápida recuperação dos valores do índice.

Em relação ao NDVI, foi observada maior amplitude de variação, com valores entre -0,12 e 0,17, apresentando picos nos meses de abril de 2020, março de 2021, maio de 2020 e janeiro de 2023. Além disso, valores negativos foram registrados com maior frequência, especialmente entre novembro e dezembro de 2019 e em setembro de 2021, quando foram observados valores mínimos próximos de -0,12.

Embora ambos os índices não apresentem tendência linear clara ao longo do período analisado, a avaliação conjunta das séries temporais evidencia padrões semelhantes, como as quedas acentuadas observadas em julho de 2019, setembro de 2021 e outubro de 2024 em ambas as curvas, sugerindo que os eventos ocorridos nesses períodos impactaram simultaneamente a cobertura vegetal e a concentração de clorofila monitoradas.

Observando a Figura 3, a série temporal dos valores pluviométricos entre 2019 e 2025 apresentou variação entre 0,7 mm e 167,4 mm. Os maiores índices de precipitação foram registrados nos meses de março de 2020 e 2023, novembro e janeiro de 2022, e fevereiro de 2024. Em contrapartida, os menores volumes pluviométricos ocorreram em fevereiro de 2021 e 2023, janeiro e outubro de 2019, e novembro de 2021. Observa-se um comportamento sazonal na distribuição da precipitação, com maiores acumulados concentrados principalmente entre os meses de janeiro e abril, enquanto os menores índices pluviométricos ocorreram predominantemente entre agosto e dezembro.

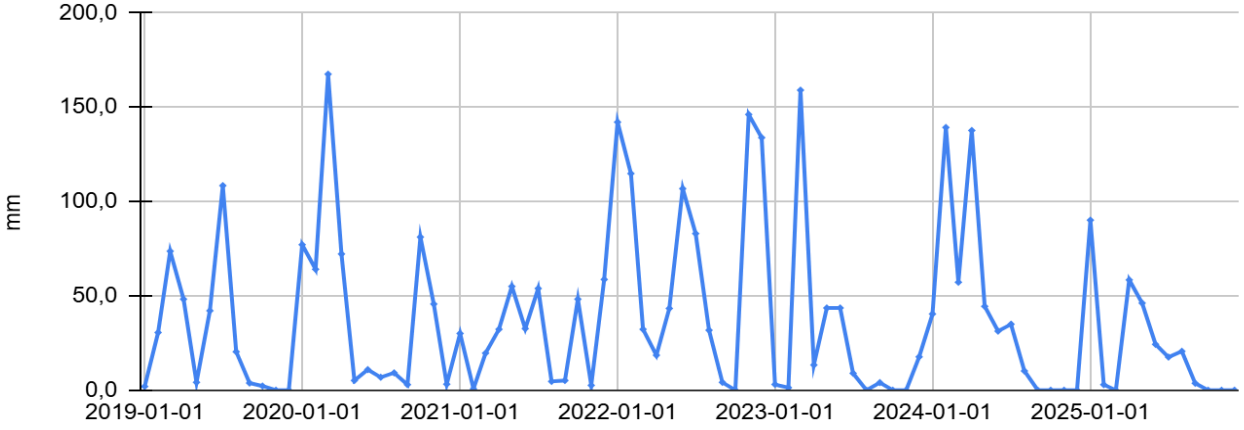


Figura 3 - Série temporal da precipitação e da temperatura no período de 2019 a 2025.

A partir do processamento dos dados no software R, foi possível gerar uma matriz de correlação com os conjuntos de dados obtidos, permitindo a construção do gráfico apresentado na Figura 4, no qual estão representados os resultados das correlações analisadas.

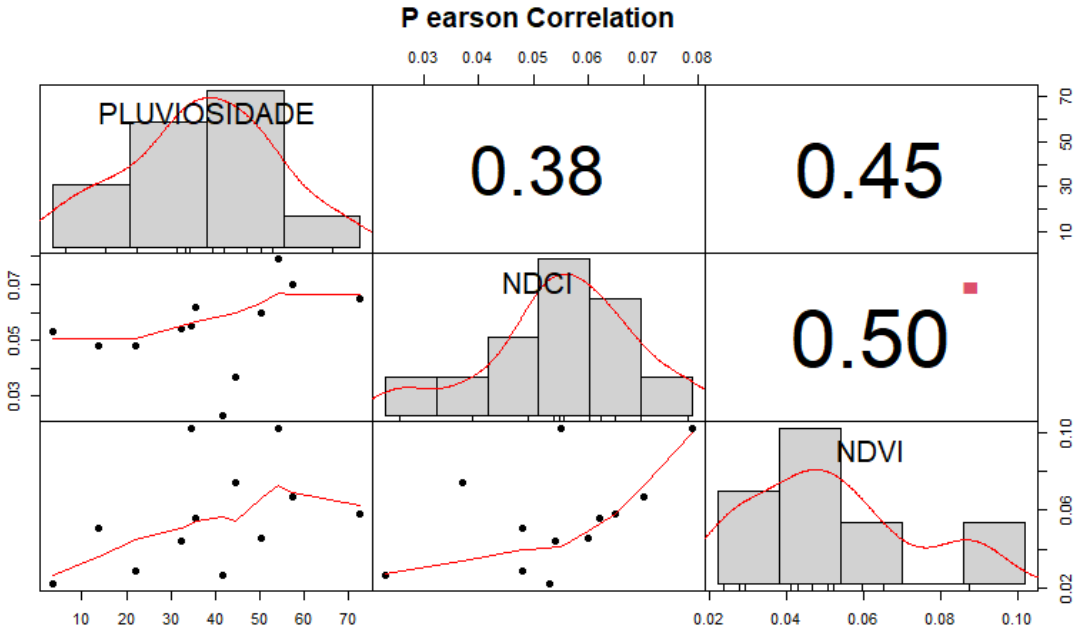


Figura 4 - Correlação de Pearson entre precipitação, temperatura, NDVI e NDCI.

Houve correlação positiva entre a precipitação e o NDCI (r = 0,38), sendo classificada como moderada. Esse resultado indica que maiores volumes de precipitação podem estar associados ao aumento dos valores de NDCI, possivelmente em decorrência do aporte de nutrientes, favorecendo o crescimento fitoplanctônico na área de estudo. Resultados semelhantes foram descritos por Honorato Silva et al. (2004), que observaram maiores concentrações de biomassa fitoplanctônica durante o período chuvoso, caracterizando o ambiente como eutrófico.

Para a relação entre precipitação e NDVI, foi observada uma correlação positiva moderada, com coeficiente de 0,45, indicando influência significativa da precipitação sobre o vigor da vegetação local. Tendência semelhante foi verificada por Nicácio et al. (2009), que identificaram correlação significativa entre NDVI e precipitação mensal na bacia do rio Coxim (MS), evidenciando a influência da precipitação sobre a dinâmica da vegetação.

Entre as correlações analisadas, a relação entre o NDCI e o NDVI foi a que apresentou maior intensidade, sendo classificada como moderada a forte, com coeficiente de 0,5. Esse resultado reforça o observado nas séries temporais, indicando que ambos os índices compartilham padrões semelhantes de variação temporal, respondendo de forma conjunta às mesmas condições ambientais.

CONCLUSÃO

A precipitação apresentou correlação positiva moderada com o NDVI (r = 0,45) e com o NDCI (r = 0,38), indicando que períodos mais chuvosos tendem a favorecer o desenvolvimento da vegetação e a elevação dos índices espectrais. Esse padrão é consistente com estudos que identificaram relações positivas entre precipitação e índices de vegetação em períodos de maior disponibilidade hídrica (Bai; Fan; Yue, 2023; Zhang *et al.*, 2018).

Entre os resultados obtidos, a maior correlação foi observada entre o NDCI e o NDVI (r = 0,50), indicando uma relação positiva moderada entre os índices, em que o aumento do NDVI tende a ser acompanhado pela elevação do NDCI.

Esse comportamento sugere similaridade espectral entre os índices, associada ao aumento da cobertura e do vigor vegetativo. Resultados semelhantes foram observados em estudos anteriores, nos quais índices espectrais relacionados à vegetação apresentaram correlações positivas moderadas a fortes com variáveis ambientais e biofísicas. Tal comportamento é corroborado pela aplicação do NDCI na detecção de florações de algas e na inferência qualitativa das concentrações de clorofila-a, de forma análoga ao uso do NDVI em estudos relacionados à vegetação terrestre (Mishra, 2012).

De maneira geral, os resultados evidenciam a interação dinâmica entre as variáveis climáticas e os índices de vegetação, podendo contribuir para a tomada de decisões e a avaliação de riscos ambientais, por meio da compreensão do desenvolvimento da biomassa vegetal e da concentração de clorofila-a, permitindo a identificação de padrões ambientais e a análise da resposta dos ecossistemas.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas (FAPEAL).

REFERÊNCIAS

BAI, X.; FAN, Z.; YUE, T. (2023). *"Dynamic pattern-effect relationships between precipitation and vegetation in the semi-arid and semi-humid area of China"*. CATENA 232, p. 107425.

COLADELLO, L.F.; DE LOURDES BUENO TRINDADE GALO, M.; SHIMABUKURO, M.H.; IVÁNOVÁ, I.; AWANGE, J. (2020). *"Macrophytes' abundance changes in eutrophicated tropical reservoirs exemplified by Salto Grande (Brazil): Trends and temporal analysis exploiting Landsat remotely sensed data"*. Applied Geography 121, p. 102242.

CORTEZ, F.; et al. (2022). *"Effects of prolonged drought on water quality after drying of a semiarid tropical reservoir, Brazil"*. Limnologica 93, p. 125959.

DE SOUZA BEGHELLI, F.G.; FRASCARELI, D.; POMPÊO, M.L.M.; MOSCHINI-CARLOS, V. (2016). *"Trophic State Evolution over 15 Years in a Tropical Reservoir with Low Nitrogen Concentrations and Cyanobacteria Predominance"*. Water, Air, & Soil Pollution 227(3), p. 95.

DODDS, W.K.; et al. (2009). *"Eutrophication of U.S. Freshwaters: Analysis of Potential Economic Damages"*. Environmental Science & Technology 43(1), pp. 12-19.

HENNY, C.; JULZARIKA, A.; SULASTRI; et al. (2026). *"Recurring struggle in managing water hyacinth invasion and water quality in a tropical lake: Case study of Lake Rawa Pening, Indonesia"*. Journal of Environmental Management 397, p. 128210.

IGWARAN, A.; KAYODE, A.J.; MOLOANTOA, K.M.; KHETSHA, Z.P.; UNUOFIN, J.O. (2024). *"Cyanobacteria Harmful Algae Blooms: Causes, Impacts, and Risk Management"*. Water, Air, & Soil Pollution 235(1), p. 71.

LUZ, A.G. DA; BLENINGER, T.B.; POLLI, B.A.; LIPSKI, B. (2022). *"Spatio-temporal variation of aquatic macrophyte cover in a reservoir using Landsat images and Google Earth Engine"*. RBRH 27.

MISHRA, S.; KUMARI, N.; HÄDER, D.-P.; SINHA, R.P. (2022). *"Cyanobacterial Blooms and Their Implications in the Changing Environment"*. Advances in Environmental and Engineering Research 3(1), pp. 1-41.

MISHRA, S.; MISHRA, D.R. (2012). *"Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters"*. Remote Sensing of Environment 117, pp. 394-406.

NICÁCIO, R.M.; ARAUJO, L.L.; GONZAGA, E.P.; LIBOS, M.I.P.C.; OLIVEIRA, L.M.T. (2009). *"Relação NDVI e precipitação na bacia do rio Coxim - MS"*. Geografia, Rio Claro 34 (Número Especial), pp. 667-680.

OGURA, A.P.; PINTO, T.J. DA S.; DA SILVA, L.C.M.; et al. (2022). *"Environmental analysis of the eutrophication and spread of aquatic macrophytes in a tropical reservoir: a case study in Brazil"*. Environmental Science and Pollution Research 29(59), pp. 89426-89437.

ROY, B.; BARI, E. (2022). *"Examining the relationship between land surface temperature and landscape features using spectral indices with Google Earth Engine"*. Heliyon 8(9), p. e10668.

SALLS, W.; SCHAEFFER, B.; PAHLEVAN, N.; et al. (2024). *"Expanding the Application of Sentinel-2 Chlorophyll Monitoring across United States Lakes"*. Remote Sensing 16(11), p. 1977.

SILVA, M.H.; et al. (2004). *"Distribution spatial and sazonal of phytoplankton biomass and the hydrologycal paramets of the Formoso river estuary (Rio Formoso, Pernambuco, Brazil)"*. Tropical Oceanography, Recife 32(1), pp. 89-106.

ZHANG, Y.; et al. (2018). *"NDVI dynamics under changing meteorological factors in a shallow lake in future metropolitan, semiarid area in North China"*. Scientific Reports 8(1), p. 15971.