SENSORIAMENTO REMOTO DA TURBIDEZ: ANÁLISE DO NDTI NO RESERVATÓRIO DE RETIRO BAIXO APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DA MINA DO CÓRREGO DO FEIJÃO, EM BRUMADINHO – MG

Hugo Henrique Cardoso de Salis[1], Lauro Magalhães Fráguas[2], Ramon Neto Rodrigues[3]

[1]Núcleo de Assessoria às Comunidades Atingidas por Barragens - NACAB, hugo.atir3@nacab.org.br; [2]Núcleo de Assessoria às Comunidades Atingidas por Barragens - NACAB, lauro.atir3@nacab.org.br; [3]Núcleo de Assessoria às Comunidades Atingidas por Barragens - NACAB, ramonrodrigues.atir3@nacab.org.br

RESUMO

Este estudo avaliou as variações de turbidez no reservatório de Retiro Baixo após o rompimento da barragem de rejeito de minério de ferro da mina do córrego do Feijão em, Brumadinho - MG, em janeiro de 2019, utilizando o Índice de Diferença Normalizada de Turbidez (NDTI). Foram analisadas 81 imagens de satélite Sentinel-2 entre 2019 e 2023. O NDTI indicou um aumento da turbidez em março de 2019, com valores superiores a 0,3, comparado a valores negativos de até -0,2 em janeiro. Nos anos seguintes, a turbidez estabilizou, mas cheias em 2020 e 2022 continuaram a impactar a qualidade da água. A validação com dados in situ do Instituto resultou em correlação de R = 0,85 e R^2 = 0,72.

Palavras-chave — Qualidade da água, Análise espaço-temporal, NDTI, Monitoramento hídrico.

ABSTRACT

This study evaluated turbidity variations in the Retiro Baixo reservoir following the Mine Córrego do Feijão dam collapse in January 2019, using the Normalized Difference Turbidity Index (NDTI). A total of 81 Sentinel-2 satellite images from 2019 to 2023 were analyzed. The NDTI indicated an increase in turbidity in March 2019, with values exceeding 0.3, compared to negative values of up to -0.2 in January. In the following years, turbidity stabilized, but floods in 2020 and 2022 continued to impact water quality. Validation with in situ data resulted in a correlation of R = 0.85 and R^2 = 0.72. Monitoring stations within the water body are needed for more accurate estimates.

Key words *— Water quality, Spatio-temporal analysis, NDTI, Water monitoring.*

1. INTRODUÇÃO

A Usina Hidroelétrica de Retiro Baixo, situada no baixo curso do rio Paraopeba, em Minas Gerais, é uma infraestrutura importante para a geração de energia, com capacidade de produção de 82 MW. Seu reservatório, além de ser utilizado para armazenamento da água, também é utilizado para o fornecimento de água para agricultura, indústria e lazer [1].

Com o rompimento da barragem da mina do córrego do Feijão em Brumadinho em 2019, a bacia do rio Paraopeba sofreu um impacto severo devido à liberação de toneladas de rejeitos de minério de ferro dentro do rio Paraopeba [2]. Esse evento aumentou a pressão sobre os recursos hídricos e a incerteza sobre a qualidade da água, afetando ecossistemas e comunidades ribeirinhas, incluindo a área do reservatório de Retiro Baixo [3].

Diante da incerteza sobre a qualidade da água e a ausência de estações suficientes de monitoramento ao longo do rio Paraopeba, o monitoramento espaço-temporal contínuo dos cursos d'água tornou-se um desafio. Técnicas convencionais de monitoramento in situ são limitadas, em termos financeiros e operacionais, para lidar com a abrangência espacial e temporal dos danos [4]. Com isso, alternativas precisam ser oferecidas para lidar com as questões inerentes a identificação de impactos e danos relacionados à qualidade da água decorrentes do rompimento [5].

Técnicas de sensoriamento remoto, como o Índice de Diferença Normalizada de Turbidez (NDTI) [6], permite estimar a turbidez de forma periódica, fornecendo dados estratégicos para gestão da qualidade da água em áreas como a bacia do Paraopeba [7].

Este estudo utiliza o NDTI para calcular variações na turbidez do reservatório de Retiro Baixo após o rompimento da barragem, destacando o potencial do sensoriamento remoto como ferramenta complementar às técnicas de medições tradicionais e fornecer uma visão temporal e espacial dessas mudanças.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A área de estudo abrange a região do espelho d'água do reservatório de Retiro Baixo e está localizada entre as coordenadas 518200 e 527760 metros de *Easting* e 7897540 e 7914510 metros de *Northing*, no sistema de projeção UTM

(*Universal Transverse Mercator*, fuso 23S), entre os municípios de Curvelo e Pompéu, em Minas Gerais. O reservatório da UHE Retiro Baixo, por sua vez, possui uma altura máxima do barramento de 45 m de altura com uma área inundada de aproximadamente 22 km² (Figura 1).

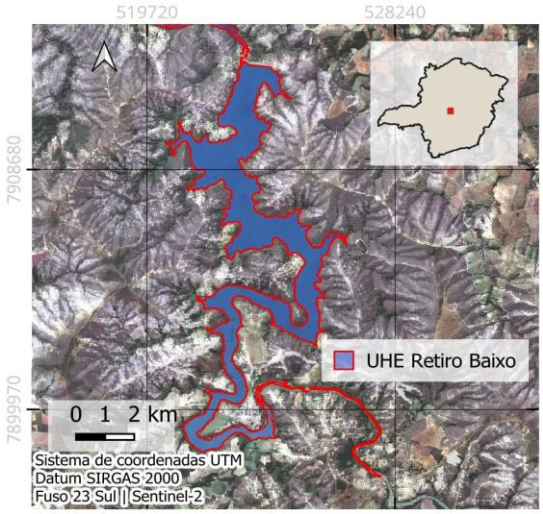


Figura 1. Localização da área de estudo referente ao Reservatório de Retiro Baixo, localizado na porção central de Minas Gerais.

2.2. Aquisição e processamento das imagens de satélite

As imagens do satélite Sentinel-2 foram obtidas no *Google Earth Engine*. Escolhe-se imagens com menos de 5% de cobertura por nuvens entre 2019 e 2023. Foram usadas 81 imagens das bandas verde (B3), vermelha (B4) e infravermelho próximo (B8).

O NDWI foi calculado para isolar corpos d'água por meio das bandas B3 e B8 [8]: NDWI = (B3 – B8) / (B3 + B8). O NDWI varia de -1 a 1, sendo que valores positivos indicam a presença de corpos hídricos [9]. Após a aplicação da máscara referente ao limite do reservatório, foi realizado o cálculo do NDTI, por meio da seguinte expressão [6]: NDTI = (B4 – B3) /(B4+B3). O NDTI varia de -1 a 1, onde valores mais altos indicam maior turbidez.

Os dados foram processados no *software Rstudio* para calcular estatísticas zonais e realizar análises temporais discretizadas por ano. Um modelo de regressão polinomial foi usado para correlacionar turbidez observada e modelada.

Para validar os resultados obtidos, foram utilizados os dados de medições de turbidez in situ fornecidas pelas estações de monitoramento do Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM divulgadas trimestralmente nos boletins informativos do cidadão [10]. Os dados escolhidos foram os coletados em duas estações de monitoramento à montante do reservatório de Retiro Baixo, no município de Curvelo: BP078 (-19,17; -44.71) e BP087 (-19,02; -44.73).

Os valores obtidos por sensoriamento remoto foram comparados com os dados do órgão ambiental, agrupando-os pela média mensal, utilizando coeficientes de correlação e de determinação R e R². Para avaliar a precisão dos modelos ajustados às variáveis explicativas, utilizou-se a Raíz do Erro Médio Quadrático (RMSE, do inglês *Root Mean Square Error*).

3. RESULTADOS

A regressão linear resultou em correlação de R = 0,85, com R² = 0,72, sugerindo que 72% da variabilidade da turbidez pode ser explicada pelo NDTI. O RMSE indicou um desvio médio de 17 Unidades de Turbidez (do inglês, NTU – *Nephelometric Turbidity Unit*) entre os valores observados e estimados. A Figura 2 apresenta a relação polinomial entre os valores de NDTI e a turbidez observada no reservatório de Retiro Baixo.

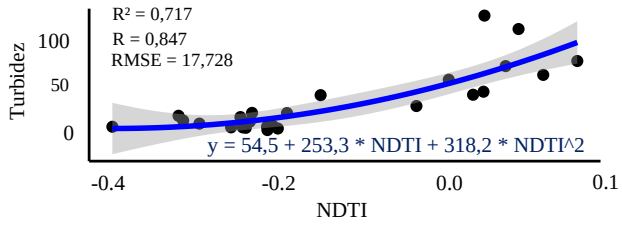


Figura 2. Relação entre a Turbidez Observada e valores do NDTI no reservatório de Retiro Baixo.

Nesta figura, observa-se a relação polinomial entre o NDTI (variável preditora) e a turbidez observada em campo por meio das estações do IGAM. A equação da reta é apresentada com seu respectivo intervalo de confiança (95%) e sugere que o NDTI tem um bom potencial para prever a turbidez em condições semelhantes às estudadas.

Os resultados dos *boxplots* e suas estatísticas descritivas associadas indicam uma variação no índice NDTI (*Normalized Difference Turbidity Index*) ao longo dos anos de 2019 a 2023. Destaca-se o ano do rompimento, de 2019, que apresentou a maior variabilidade nos dados, com uma média de -0,228 e um desvio padrão de 0,130, além de outliers positivos que atingem valores acima de 0,1, sugerindo maior heterogeneidade nas condições de turbidez da água em comparação com os demais anos (Figura 3).

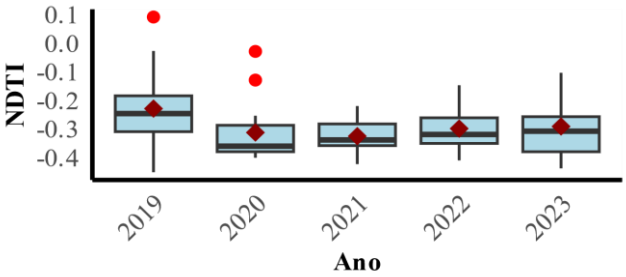


Figura 3. Variações do NDTI entre os anos de 2019 e 2023 no reservatório de Retiro Baixo.

A Figura 3 mostra que entre os anos de 2022 e 2023, os dados mantiveram uma tendência similar, com médias

próximas (-0,298 e -0,291, respectivamente), e uma variação ligeiramente maior em 2023. A presença de outliers nos primeiros anos, especialmente em 2019 e 2020, anos do rompimento e da primeira cheia do rio Paraopeba após a tragédia, contrasta com a tendência de homogeneidade dos resultados observada a partir de 2021.

Em termos de distribuição espacial da turbidez é possível observar, por meio da Figura 4, que o rompimento e os grandes eventos hidrológicos de 2020 e 2022, tiveram efeito significativo no quantitativo de sólidos suspensos que chegaram ao reservatório, e consequentemente, na turbidez da sua água.

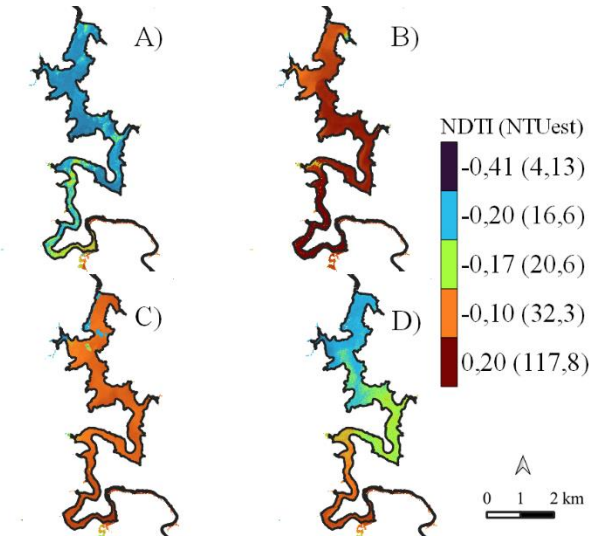


Figura 4. Distribuição espacial do NDTI e da Turbidez estimada (NTUest) antes (A), em janeiro de 2019, e após o rompimento da barragem (B), em março de 2019 e após a primeira e segunda cheia do rio Paraopeba (C e D), em 2020 e 2022.

A Figura 4 ilustra que em 22 de janeiro de 2019 (A), antes do rompimento, a turbidez era relativamente baixa, com valores de NDTI predominantemente negativos, indicando menores valores de turbidez. No entanto, após o rompimento, na data de 08 de março de 2019 (B), houve um aumento acentuado na turbidez, especialmente nas regiões de entrada, centrais e marginais do corpo hídrico, onde os valores subiram para próximo de 0,01, representando um crescimento da quantidade de sólidos em suspensão.

Nas imagens que retratam os períodos de cheia (C e D), de 2020 e 2022 respectivamente, observa-se que o NDTI pode não ter retornado aos níveis mínimos pré-rompimento. Em 2020 (C), há uma predominância de turbidez elevada em toda a área do espelho d'água, enquanto em 2022 (D), o padrão é mais distribuído e tem maior concentração na primeira metade mais à montante do reservatório. Isso sugere que, mesmo anos após o evento, a turbidez continua elevada em comparação ao cenário inicial, com variações espaciais ligadas a fatores como as cheias e o carreamento de sedimentos com aporte de rejeitos.

4. DISCUSSÃO

4.1. Impacto do rompimento da barragem da mina do Córrego do Feijão na turbidez da água do reservatório

Os resultados obtidos confirmam que o rompimento da barragem da mina do Córrego de Feijão em Brumadinho, ocorrido em janeiro de 2019, gerou um aumento substancial na distribuição espacial da turbidez da água no reservatório de Retiro Baixo, confirmando os dados obtidos pelo monitoramento feito pelo órgão ambiental e por outros estudos realizados no reservatório [3]. A análise do NDTI, realizada por meio de imagens de satélite, evidenciou essa mudança, mostrando uma clara diferenciação nos padrões de turbidez antes e após o rompimento da barragem de rejeitos (Figura 4A e 4B), indicando que esse índice pode ser utilizado para acompanhar tecnicamente essa situação de necessidade de avaliações mais precisas da turbidez e sedimentos suspensos em todo espelho d'água.

4.2. Variação da turbidez ao longo dos anos e o impacto das cheias subsequentes

Além do rompimento da barragem, as cheias subsequentes no rio Paraopeba, especialmente as que ocorreram nos anos de 2020 e 2022 (Figura 4C e 4D), tiveram um papel importante na permanência da alta turbidez no reservatório de Retiro Baixo. Os dados estatísticos e as informações geoespaciais calculadas reforçam essa influência contínua, demonstrando que o ano de 2019 apresentou a maior variabilidade nos valores de NDTI, com outliers sugerindo eventos extremos de turbidez. Nos anos subsequentes, embora a turbidez tenha mostrado uma estabilização relativa, as cheias provocaram a remobilização e o carreamento contínuo de sedimentos com aporte de rejeitos para o reservatório, o que manteve níveis de turbidez elevados, principalmente na sua porção inicial à montante (Figura 4D).

Essa situação evidencia a natureza prolongada do impacto do rompimento e como fatores hidrológicos subsequentes, como vazões elevadas e enchentes, continuam a comprometer a qualidade da água na região, indicando o não retorno à situação pré-rompimento. Cabe destacar aqui, que a reparação socioambiental do rio Paraopeba e seu entorno, que está em execução, indica condições de esforços para a reparação.

4.3. Limitações do estudo

A possível limitação foi a ausência de estações de monitoramento com dados disponíveis na região do espelho d'água, o que pode ter influenciado a precisão do processo de validação. A inclusão de estações in situ no próprio reservatório poderia ter aumentado a precisão das estimativas do NDTI, chegando próximo à precisão de estudos baseados no próprio índice, como o de Pizzani e Maillard, 2021 [7] e Lizcano-Sandoval [11].

4.4. Perspectivas Futuras: Estações Virtuais de Monitoramento

A implementação de "estações virtuais de monitoramento", no contexto da “Hidrologia Espacial” [12] associadas a dados coletados in loco, apresenta-se como uma alternativa promissora para esse tipo de cenário. Essas estações virtuais vêm sendo aplicadas e utilizam dados obtidos a partir de sensoriamento remoto, como o NDTI, e algoritmos de modelagem para estimar a qualidade da água de forma contínua e precisa, especialmente em áreas onde não há infraestrutura física de monitoramento disponível ou não há recurso para instalação e operação eficiente [13].

5. CONCLUSÕES

O estudo demonstrou que o sensoriamento remoto, e os índices derivados, como o NDTI, é uma ferramenta capaz de monitorar a turbidez de grandes reservatórios de água, como é o caso do reservatório de Retiro Baixo. Imagens do Sentinel-2 revelaram um aumento significativo na turbidez logo após o evento, seguido de variações ao longo dos anos, impulsionadas por enchentes em 2020 e 2022. Isso evidencia o impacto contínuo do desastre ambiental na bacia do rio Paraopeba e consequentemente na qualidade de vida das pessoas que residem no entorno do rio Paraopeba e reservatório de Retiro Baixo.

Apesar da correlação entre os valores modelados e observados, a ausência de estações de monitoramento in situ no reservatório foi uma limitação. Estudos com base em dados coletados in loco, associados à implementação de estações virtuais de monitoramento de qualidade são sugeridos para aprimorar a presente pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

[1] RBE - Retiro Baixo Energética S.A. Usina Hidrelétrica Retiro Baixo. [Online]. Disponível em: https://www.rbe.com.br/. [Acesso em: 01-set-2024].

[2] Serviço Geológico do Brasil – CPRM, Relatório V: Monitoramento Hidrológico, Sedimentométrico e Geoquímico da Bacia do Rio Paraopeba. Belo Horizonte, novembro de 2020. Disponível em: http://www.cprm.gov.br/sace/index_rio_paraopeba.php. [Acesso em: 01-set-2024].

[3] Instituto Guaicuy. *Dossiê dos danos identificados nas regiões 4 e 5*, 2ª ed., Belo Horizonte: Guaicuy, 2022, 303 p.

[4] L. F. de Albuquerque, M. A. H. de Castro, and L. H. M. Costa, "Definição do nível de reservatórios a partir das imagens de satélite," *Escola Superior de Sustentabilidade*, vol. 13, no. 6, 2023.

[5] L. A. B. dos Santos, N. S. Gomes, K. S. Hugo, M. S. L. Amaral, and H. A. V. Rossoni, "Qualidade da água no Médio Paraopeba e seus impactos socioambientais após rompimento da Barragem da Mina do Córrego do Feijão, Brumadinho, Minas Gerais, Brasil," *Revista Brasileira de Geografia e Estatística*, volume (v.8), número (n.18), 2021

[6] J.P. Lacaux, Y.M. Tourre, C. Vignolles, J.A. Ndione, and M. Lafaye. Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley fever epidemics in Senegal. *Remote Sensing of Environment*, (v.106):(pp.66–74), 2007.

[7] F. M. C. Pizani and P. Maillard, Um Índice de Turbidez para Águas Relativamente Claras, in Anais do XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Belo Horizonte: Galoá Proceedings, 2021, (pp. 66–74).

[8] S.K. McFeeters. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, (v.17):(pp.1425–1432), 1996.

[9] G.H.A. Pereira, M. Lohmann, and R.F. Maganhotto. Proposta e avaliação de índices para delimitar e mapear corpos d’água utilizando imagens do satélite Landsat-8. *Revista Brasileira de Geografia Física*, (v.9):(pp.1956–1968), 2016.

[10] Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), Boletim Informativo do Cidadão sobre a Qualidade da Água no Rio Paraopeba. [Online]. Disponível em: http://repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/handle/123456789/3166. [Acesso em: 01-set-2024].

[11] L. Lizcano-Sandoval, C. Anastasiou, E. Montes, G. Raulerson, E. Sherwood, and F. E. Muller-Karger. Seagrass distribution, areal cover, and changes (1990–2021) in coastal waters off West-Central Florida, USA. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, (v.279):(pp. 108134), 2022.

[12] Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Monitoramento hidrológico por satélite, gov.br, [Online]. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/cooperacao-internacional/agua-no-mundo/monitoramento-hidrologico-por-satelite. [Acesso em: 29-set-2024].

[13] D. P. Sahoo, B. Sahoo, M. K. Tiwari, K. A. Singh, and A. Tarpanelli. Multi-mission virtual monitoring station for streamflow monitoring and hydrodynamic model calibration. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, (v.36):(pp.101330), 2024.