

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

Validação da estimativa do Dano Potencial Associado (DPA) a partir de modelagem HEC-RAS: Comparação com impactos reais no rompimento da barragem Nasa Park (MS)

Gabriela. G. Silva¹; Caroline M. Salido²; João Victor Pandino³; Igor O. A. R. Blum⁴; Leslie C. V. Chumbe⁵; Gabriel H. A. Pereira⁶ & Flávio. A. C. Deppe⁷

Abstract: The study evaluates the accuracy of hydrodynamic modeling using the HEC-RAS software in estimating the Potential Associated Damage (PAD) by comparing the simulated flood extent with the flood extent resulting from the failure of the Nasa Park dam (MS), which occurred in August 2024 in Jaraguari (MS). The observed flood extent was vectorized based on images from the CBERS 4A satellite, while the simulation was carried out according to ANA's simplified methodology, which employs topographic data and empirical hydrographs. The intersection between the simulated and observed flood extents was 93.76%, although the simulated area was 2.13 times larger, suggesting a tendency toward overestimation, which is partially explained by the time elapsed until the observed image was captured. Nevertheless, all vulnerable elements identified in the real flood extent were included in the simulation. Both scenarios resulted in the same classification of medium PAD. The results indicate that, despite limitations, HEC-RAS modeling is effective in identifying risk areas and validating simplified methodologies for dam safety management.

Resumo: O estudo avalia a precisão da modelagem hidrodinâmica com o software HEC-RAS na estimativa do Dano Potencial Associado (DPA) a partir da comparação entre a mancha simulada e a mancha real do rompimento da barragem Nasa Park (MS), ocorrida em agosto de 2024 em Jaraguari (MS). A mancha observada foi vetorizada com base em imagens do satélite CBERS 4A, enquanto a simulação foi realizada segundo a metodologia simplificada da ANA, que utiliza dados topográficos e hidrogramas empíricos. A interseção entre as manchas simulada e observada foi de 93,76%, embora a área simulada tenha sido 2,13 vezes maior, sugerindo uma tendência de superestimação, que é parcialmente explicada pelo tempo decorrido até a captação da imagem observada. Ainda assim, todos os pontos vulneráveis identificados na mancha real foram contemplados pela simulação. Ambos os cenários resultaram na mesma classificação de DPA médio. Os resultados indicam que, mesmo com limitações, a modelagem HEC-RAS é eficaz na identificação de áreas de risco e na validação de metodologias simplificadas de gestão de segurança de barragens.

Palavras-Chave – Segurança de Barragens, Dano Potencial Associado (DPA), HEC-RAS

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7} Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná - SIMEPAR. Av. Cel Francisco H. dos Santos, 100 - Curitiba/PR.

¹ Discente de Engenharia Ambiental - Universidade Federal do Paraná. gabriela.gomes@ufpr.br;

² Geógrafa pela Universidade Estadual de Londrina. caroline.salido@simepar.br;

³ Me. Engenharia de Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Paraná - UFPR. jvictorpandino@hotmail.com;

⁴ Engenheiro Civil e Ambiental. Faculdade Pitágoras e Unicuritiba. Igor.blum@simepar.br;

⁵ Engenheiro Ambiental pela National University José María Arguedas - UNAJMA, Peru. leslie.chumbe@simepar.br;

⁶ Ph.D. em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela UFPR. gabriel.pereira@simepar.br;

⁷ Ph.D. in Remote Sensing pela Cranfield University, Inglaterra. Flavio.deppe@simepar.br.

INTRODUÇÃO

As barragens são estruturas essenciais para múltiplas atividades humanas, incluindo irrigação, abastecimento de água potável, geração de energia elétrica e processos industriais. No entanto, sua eventual ruptura provoca a liberação abrupta do volume armazenado, gerando consequências graves em nível social, econômico e ambiental (Rolo et al., 2022). No Brasil, destacam-se eventos catastróficos como o rompimento da barragem de Fundão em Mariana (Minas Gerais, 2015), que liberou aproximadamente 32 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração, causando severos impactos socioeconômicos e ambientais na bacia do rio Doce (PALU; JULIEN, 2019). Três anos depois, no mesmo estado, especificamente em Brumadinho, outra falha estrutural provocou perdas humanas significativas e graves danos ao ecossistema regional (ZHU; ZHANG; PUZRIN, 2024). Esses episódios evidenciaram a urgência de reforçar a regulamentação do setor.

Em resposta, o marco legal brasileiro foi fortalecido com a Lei nº 12.334 que instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) em 2010, atualizada em 2020. Essa legislação estabeleceu um sistema integral de monitoramento e fiscalização coordenado pelo SNISB, atribuindo aos órgãos reguladores setoriais a responsabilidade primária pela supervisão (Brasil, 2010). A norma tornou obrigatórios os Planos de Segurança de Barragens (PSB), que incluem o Estudo de Ruptura Hipotética, ferramenta crucial para a identificação de riscos e proposição de medidas de mitigação. Esses estudos geram as chamadas manchas de inundação, que mapeiam visualmente as áreas potencialmente afetadas, servindo como base para ações preventivas e de gestão de desastres.

Para orientar a fiscalização, a Resolução nº241, de 10 de setembro de 2024, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), define critérios gerais de classificação de barragens por Dano Potencial Associado (DPA), no volume armazenado e na categoria de risco, em consonância com a PNSB (Brasil, 2024). A classificação do Dano Potencial Associado (DPA) considera a possibilidade de perdas humanas e os impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes de um eventual rompimento. Para isso, é fundamental identificar as populações, infraestruturas e as áreas de interesse que podem ser atingidas (Brasil, 2010).

Nesse contexto, o uso de modelos matemáticos capazes de gerar mapas de inundação se torna indispensável, pois delimita com maior precisão as áreas sujeitas a alagamento em caso de colapso. Entre as ferramentas disponíveis, o software HEC-RAS (River Analysis System) destaca-se pela robustez na simulação de inundações, com resultados consistentes em diversos estudos (MELO, 2013). Sua aplicação tem sido validada em análises específicas de rompimentos de barragens, como demonstrado em trabalhos recentes (DO NASCIMENTO et al., 2022; VAININI, 2016). Por outro lado, devido à complexidade, à demanda de dados e ao tempo computacional, a aplicação do HEC-RAS em escala nacional é limitada. Para contornar essas restrições, a Agência Nacional de Águas (ANA) desenvolveu uma metodologia simplificada, baseada em planilhas eletrônicas e sistemas de informação geográfica, que permite estimar manchas de inundação e classificar o Dano Potencial Associado (DPA) de forma mais ágil e replicável em todo o território brasileiro (ANA, 2023 e TSCHIEDEL, 2023). Essa metodologia utiliza as simulações do HEC-RAS como referência (baliza), calibrando seus resultados com base em modelos robustos.

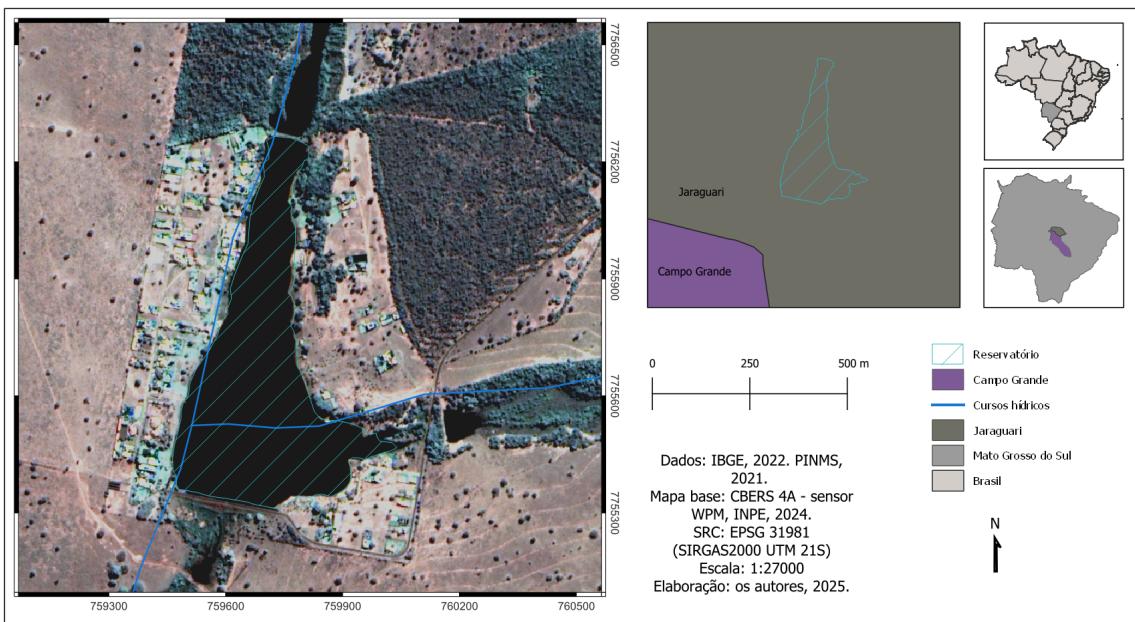
Portanto, avaliar a correspondência entre a mancha simulada no HEC-RAS e a mancha real observada em um evento de ruptura é uma oportunidade importante para validar a metodologia simplificada da ANA. Visando responder a esse desafio, este estudo tem como objetivo central avaliar a correspondência entre a mancha gerada no HEC-RAS e a mancha real observada no rompimento da barragem de Campo Grande. A seleção deste caso justifica-se duplamente: (1) pela ampla utilização do HEC-RAS como ferramenta consolidada em simulações de ruptura de

barragens no Brasil e (2) pela necessidade de validar abordagens simplificadas que apoiem a fiscalização e gestão de riscos no âmbito da Política Nacional de Segurança de Barragens.

MATERIAIS E MÉTODOS

A barragem analisada está localizada no condomínio Nasa Park, em Jaraguari (MS), região metropolitana de Campo Grande. A Figura 1 mostra sua localização geográfica e uma imagem de satélite disponibilizada pelo INPE, anterior ao rompimento.

Figura 1 - Área de estudo com delimitação do reservatório, Jaraguari – MS, Região Metropolitana de Campo Grande.



As informações técnicas da barragem foram obtidas no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), plataforma oficial da ANA. O órgão fiscalizador responsável pela barragem é o Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul (IMASUL).

A barragem Nasa Park (Código SNISB 34469), situada no condomínio de luxo Nasa Park I, em Jaraguari/MS, havia sido construída para fins recreativos, com 14 metros de altura e capacidade de 2,243 hm³. Seu rompimento ocorreu em 20 de agosto de 2024. Segundo o IMASUL, a estrutura não possuía licenciamento ambiental, autorização para uso de recursos hídricos nem plano de segurança (SEMADESC, 2024). Desde 2014, o Ministério Público apura a ocupação irregular de áreas de preservação permanente no loteamento, além de danos ambientais e processos erosivos nas margens da represa (MPMS, 2024).

Vetorização da Mancha Real

A imagem utilizada para comparação da mancha gerada no HEC-RAS com a mancha real faz parte do catálogo do INPE, satélite CBERS 4A, da câmera multiespectral regular (WPM). Esta possui cinco bandas: três na faixa do visível, uma no infravermelho (todas com 8 m de resolução) e uma pancromática com 2 m de resolução (INPE, 2022).

A imagem data do dia 07 de outubro de 2024, 48 dias após o dia do rompimento da barragem. Estas imagens foram tratadas, finalizadas e vetorizadas no software QGIS. O primeiro passo foi o recorte da área de estudo e a geração de uma composição multibanda colorida. Em seguida, a

ferramenta *pansharpening* da Orfeo Toolbox do QGIS foi utilizada para fusionar a banda pancromática, que possui melhor resolução, com a imagem RGB gerada. Assim, se obteve uma imagem com cores próximas das reais e resolução de 2 metros.

A vetorização da mancha real foi realizada por meio da comparação entre a imagem de 7 de outubro (após o rompimento), e uma imagem anterior, obtida pelo mesmo satélite e sensor, datada de 6 de agosto de 2024, ou seja, 15 dias antes do rompimento. Essa imagem passou pelo mesmo tipo de tratamento e, em seguida, foi utilizada uma análise comparativa “antes e depois” do evento, com foco nas áreas de solo exposto, o que permitiu delimitar os contornos da mancha real.

Modelagem da mancha hipotética com HEC-RAS

A simulação da mancha potencial de inundação seguiu a metodologia descrita em Tschiedel *et al* (2023). Foram utilizados como dados de entrada o Modelo Digital de Elevação (MDE) Copernicus DEM com resolução espacial de 30m (ESA, 2024), e o coeficientes de rugosidade de Manning, adotado como 0,035. As condições de contorno incluíram a de montante (CCM), que representa a entrada da vazão no sistema e corresponde ao hidrograma de ruptura estimado, e de jusante (CCJ), definida pela declividade média do trecho a jusante da barragem.

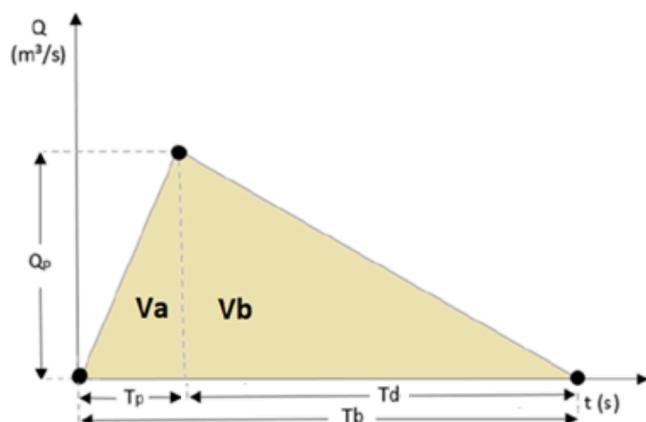
O hidrograma utilizado na simulação foi do tipo triangular (HTR), definido a partir da vazão de pico (Q_p), do tempo de pico (t_p) e do tempo de base (t_b) do rompimento. Os valores de Q_p (descarga máxima de água no evento de ruptura, em m^3/s) e t_p (tempo de formação da brecha, em segundos) foram calculados com base nas equações empíricas de Froehlich (1995), que relacionam a altura H e o volume máximo do reservatório (V_t) (Equações 1 e 2).

$$Q_p = 0,607 \cdot (V^{0,295} \cdot H^{1,24}) = 1196,42 m^3 \quad (1)$$

$$T_p = 63,2 \cdot \sqrt{\frac{V_t}{g H_w^2}} = 0,60h \quad (2)$$

A área do gráfico deve corresponder ao volume total no reservatório (V_t). Desta forma, por associação geométrica (Figura 2), o tempo de base (t_b), ou duração total do evento de ruptura, pode ser calculado pela soma do tempo de pico (t_p) com o tempo de recessão (t_d), conforme a equação 3.

Figura 2 - Exemplo de hidrograma triangular de ruptura. Fonte: adaptado de ANA, 2023.

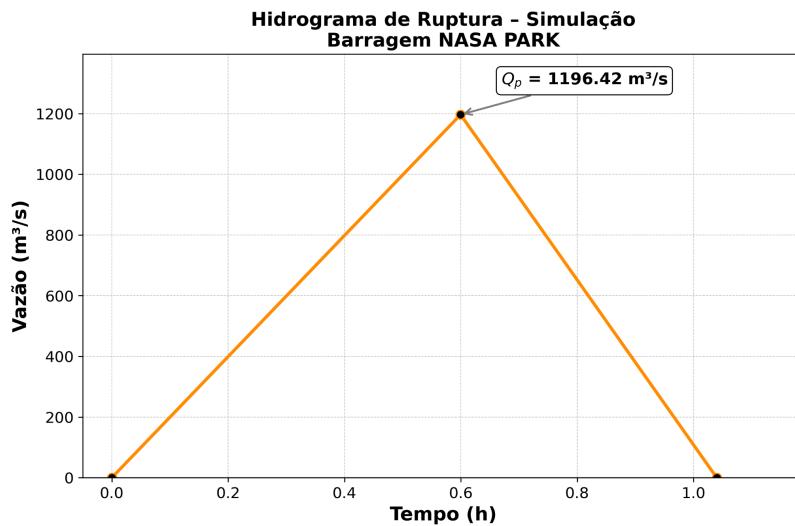


$$Tb = Tp + Td = Tp + \frac{2}{Q_p} \cdot Vb = Tp + \frac{2}{Q_p} \cdot (Vt - Va)$$

$$Tb = Tp + \frac{2}{Q_p} \cdot \left(Vt - \frac{Q_p \cdot Tp}{2} \right) = 1,04h \quad (3)$$

Da aplicação destas equações, decorre o hidrograma utilizado na simulação (Figura 3).

Figura 3 - Hidrograma de ruptura da mancha potencial.



A extensão dos cálculos foi definida com base na equação 4, apresentada pela ANA (2023), que estabelece a distância (D_{max} , em km) a ser considerada, de acordo com o volume do reservatório (V , em hm^3), para barragens com volume inferior a $1000 hm^3$.

$$D_{max} = 8,87 \cdot 10^{-8} \cdot V^3 - 2,602 \cdot 10^{-4} \cdot V^2 + 2,648 \cdot 10^{-1} \cdot V + 6,737$$

Para o volume do reservatório considerado ($V = 2,243 hm^3$), a distância calculada foi de 7,289 km, valor que foi arredondado para o número inteiro superior, neste caso, 8 km, adotando uma estimativa conservadora que visa contemplar cenários mais abrangentes e garantir uma margem de segurança na análise.

Procedimentos Aplicados na Comparação das Manchas

A comparação entre a mancha simulada no HEC-RAS e a mancha observada foi realizada por meio de análises espaciais em ambiente SIG. Foram calculadas as áreas de ambas as manchas e sua interseção, permitindo quantificar a interseção entre as duas e gerar mapas temáticos que evidenciam as regiões coincidentes e divergentes.

Com base nos elementos atingidos pelas manchas de inundação, foi calculado o Dano Potencial Associado (DPA) para cada cenário. Essa classificação considera os possíveis impactos sociais, econômicos e ambientais decorrentes do rompimento, de acordo com os elementos vulneráveis atingidos (ANA (2023), Tschiedel *et al* (2023)). Para identificar esses elementos, foram

utilizados shapefiles do IBGE, FUNAI, MMA e do Estado do Mato Grosso do Sul, abrangendo edificações, rodovias, estruturas agropecuárias, linhas de transmissão, entre outros. Além disso, a discussão sobre os impactos da ruptura da barragem foi complementada com informações qualitativas obtidas em notícias e relatórios oficiais, que auxiliaram tanto na validação dos pontos afetados quanto na análise de danos mais amplos, como perdas econômicas e impactos ambientais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 apresenta a comparação entre as manchas de inundações observadas, vetorizada a partir de imagens de satélite obtidas 48 dias após o rompimento da barragem, e a mancha simulada com o modelo hidrodinâmico HEC-RAS. Também são mostrados os pontos afetados identificados em ambas as manchas, como edificações, estradas, rodovias e infraestruturas.

Figura 4 - Mancha observada (a), obtida por imagem de satélite, e mancha simulada (b), gerada no HEC-RAS. Pontos representam elementos vulneráveis atingidos. Fonte: Os autores.



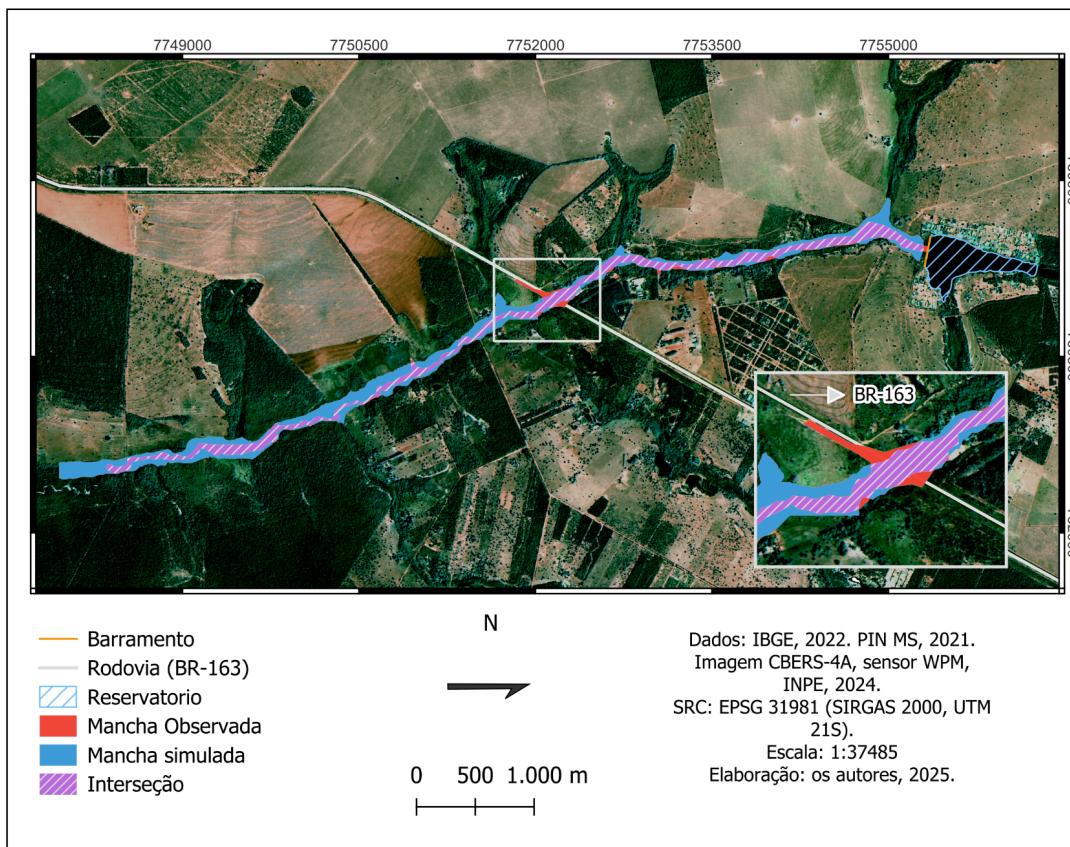
Na mancha observada (Figura 4a), foram identificados 16 pontos afetados, sendo estes: uma rodovia, três estradas, três edificações, uma rodovia e nove infraestruturas, com base em dados geoespaciais do IBGE e do Estado do Mato Grosso do Sul. Para validar esses pontos e obter informações mais detalhadas sobre os impactos, as informações obtidas nos relatórios oficiais e notícias, como os da SEMADESC (2024), corroboram esses achados, confirmando que diversas residências foram parcialmente ou indiretamente atingidas (exigindo isolamento), uma residência foi completamente atingida, houve danos em duas estruturas de criação de animais, e a BR-163 teve

sua estrutura comprometida e seu tráfego parcialmente interditado. Além do mais, o dano ambiental, embora ainda não quantificado, também foi apontado como significativo.

Os pontos afetados da mancha simulada (Figura 4b), foram obtidos a partir de uma imagem de satélite datada de 6 de agosto de 2024, ou seja, 15 dias antes do rompimento. Ela foi utilizada para facilitar a comparação e a visualização dos cenários anteriores e posteriores ao evento. Na simulação, foram identificados 18 pontos afetados, dois a mais que na mancha observada: uma estrada e uma infraestrutura. Observa-se que os pontos atingidos na área que abrange as duas manchas coincidem com os da mancha real, ou seja, nenhum ponto afetado na mancha real ficou de fora da simulação gerada pelo HEC-RAS.

A Figura 5 apresenta as áreas de inundação dos dois cenários analisados - simulado e observado - bem como a área de interseção entre eles. A mancha simulada possui uma área (A_s) de 950,54 km², enquanto a mancha observada possui uma área (A_o) de 446,49 km². A área comum entre ambas as manchas, ou seja, a interseção (A_i), corresponde a 418,65 km². Isso indica que 93,76% da mancha observada coincide com a simulada (A_i/A_o), mas apenas 47% da simulada está contida na observada (A_i/A_s), refletindo a maior extensão da simulação. A área simulada é aproximadamente duas vezes maior que a mancha observada ($A_s/A_o \approx 2,13$), indicando uma tendência da metodologia em superestimar a área afetada.

Figura 5: Análise espacial das manchas observada e simulada. Em vermelho, a área da mancha observada não contemplada pela simulação; em azul, a área simulada que extrapola a mancha observada; em roxo hachurado, a região de interseção entre ambas. Fonte: Os autores.



A área de abrangência maior da mancha simulada pode ser atribuída, principalmente, ao fato de que a vetorização da mancha observada foi feita a partir de imagens captadas 48 dias após o

rompimento do dia 20/agosto de 2024, quando o rastro de lama já havia sofrido retração, possivelmente subestimando sua extensão real. Um aspecto particular é observado na rodovia BR-163: embora presente como ponto afetado em ambas as manchas, a mancha observada se estende mais na direção leste da pista (recorte ampliado da Figura 5). Isso pode ser explicado à limitação do modelo simplificado da ANA (2023), que adota coeficiente de Manning uniforme para toda a área de simulação, não refletindo de forma adequada a menor rugosidade do asfalto. Na prática, a rugosidade no asfalto é menor que a das áreas vegetadas, o que favorece o espalhamento da água sobre a rodovia, como observado na mancha real.

Com base nos pontos afetados presentes nas áreas atingidas por cada mancha, foi calculado o Dano Potencial Associado (DPA) para os dois cenários. Ambos os cenários obtiveram 8 pontos na matriz de classificação, sendo enquadrados como DPA médio. Assim, embora haja divergências pontuais entre as manchas, especialmente quanto à abrangência espacial, a modelagem com HEC-RAS mostrou-se eficaz na identificação de elementos vulneráveis e na categorização do potencial de dano, cumprindo seu papel como ferramenta de apoio à tomada de decisão.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo avaliou a confiabilidade da simulação hidrodinâmica com o software HEC-RAS, conforme a metodologia descrita pela ANA (2023), para estimativa de manchas de inundação. Para isso, compararam-se os resultados da modelagem com dados observados do rompimento da barragem Nasa Park, ocorrido em agosto de 2024. A mancha simulada apresentou uma área cerca de duas vezes maior que a observada, indicando uma tendência de superestimativa. A comparação indicou que 93,76% da área observada está coberta pela simulação, mostrando que o modelo capturou quase toda a mancha real. Entretanto, apenas 47% da área simulada corresponde à área observada, evidenciando superestimação da extensão da mancha simulada. Essa diferença pode ser explicada, em parte, pelo intervalo entre o evento e a vetorização da mancha observada, quando a área real já havia se retraído. Apesar da superestimação, todos os pontos afetados na mancha real foram contemplados, evidenciando que o modelo é eficaz para representar a área de impacto e contribuindo para a validação de abordagens simplificadas de avaliação de risco, como a proposta pela ANA (2023).

A utilização do HEC-RAS demonstrou ser uma ferramenta confiável e adequada para a identificação de áreas de risco associadas ao rompimento de barragens. Apesar da tendência de superestimação da mancha simulada, não houve omissão de elementos vulneráveis, o que é fundamental no contexto da segurança de barragens, o que é crucial no contexto da segurança de barragens. Isto evidencia que, mesmo com metodologias simplificadas, é possível realizar uma gestão de risco eficiente, capaz de subsidiar decisões estratégicas relevantes para a proteção de vidas humanas, do meio ambiente e de patrimônios.

Ressalta-se a importância da validação de metodologias por meio da comparação com casos reais, o que confere maior confiança aos modelos aplicados na gestão de risco. Este trabalho destaca, ainda, que existe a necessidade de aprimoramentos metodológicos, como a adoção de parâmetros de rugosidade mais adequados para cada tipo de terreno, visando reduzir as incertezas e aumentar a acurácia das simulações. Nesse sentido, é fundamental que sejam aprimoradas continuamente as ferramentas utilizadas na Política Nacional de Segurança de Barragens, incluindo a metodologia simplificada, que pode contribuir para o desenvolvimento de sistemas de fiscalização mais eficientes e alinhados às reais dinâmicas dos eventos extremos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. (2023). “Avaliação e proposição de melhorias para a metodologia utilizada pela ANA para determinar o Dano Potencial Associado das barragens sob sua jurisdição”. Produto 03. Brasília – DF.

BRASIL. (2010, 20 de setembro). Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília. Disponível em:
http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.html. Acesso em: 25 nov. 2021.

BRASIL. (2024, 10 de setembro). Resolução nº 241, de 10 de setembro de 2024. Diário Oficial da União. Disponível em:
<https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/cnrh-no-241-2024.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2025.

DO NASCIMENTO E SILVA, J. P. et al. (2022). Simulação de Rompimento da Barragem São Bento do Una através do Software HEC-RAS. Revista Brasileira de Geografia.

ESA – AGÊNCIA ESPACIAL EUROPEIA. (2024). Copernicus Global Digital Elevation Model. Distribuído por OpenTopography. Disponível em: <https://doi.org/10.5069/G9028PQB>. Acesso em: 06 maio 2025.

FROEHLICH, C. (1995). Embankment Dam Breach Parameters Revisited. First International Water Resources Engineering Conference, EWRI, 14–18.

FUNDAÇÃO NACIONAL DOS POVOS INDÍGENAS – FUNAI. Terras Indígenas no Brasil – shapefile/KML/XLSX/CSV. Brasília: FUNAI. Disponível em:
<https://www.gov.br/funai/pt-br/atuacao/terras-indigenas/geoprocessamento-e-mapas>. Acesso em: 06 jun. 2025.

GOVERNO DO ESTADO DE MATO GROSSO DO SUL / AGRAER. (2024). Dados geoespaciais do Mato Grosso do Sul disponíveis no Portal PIN/MS. Disponível em:
<https://www.pinms.ms.gov.br/portal/home/gallery.html>. Acesso em: 01 jun. 2025.

INPE/MCTI – Arcanjo, Jeferson. (2022). Imagens WPM - CBERS 04A. Disponível em:
<https://data.inpe.br/geonetwork/srv/api/records/4a98cd06-5606-48d3-973e-384c37f7db28>. Acesso em: 5 jun. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. (2024). Malha de Setores Censitários – Censo 2022 (preliminar). Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em:
<https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 01 jun. 2025.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE – ICMBio. (2024). Limites das Unidades de Conservação Federais – shapefile (SIRGAS 2000). Rio de Janeiro: ICMBio. Disponível em:

<https://dados.gov.br/dados/conjuntos-dados/limites-oficiais-de-unidades-de-conservacao-federais>. Acesso em: 01 jun. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. (2022). Catálogo de imagens CBERS-4A – Sensor WPM. São José dos Campos: INPE. Disponível em: <https://data.inpe.br/geonetwork/srv/api/records/4a98cd06-5606-48d3-973e-384c37f7db28>. Acesso em: 5 jun. 2025.

MELO, L. P. R. (2013). Análise comparativa de metodologias de previsão de inundação decorrente da ruptura de barragens de rejeitos: caso hipotético da Barragem Tico-Tico. 183 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – UFMG, Belo Horizonte. Acesso em: 20 ago. 2017.

MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DE MATO GROSSO DO SUL. (2024). MPMS promove reunião com famílias impactadas por rompimento de barragem. Campo Grande. Disponível em: <https://www.mpms.mp.br/noticias/2024/08/mpms-promove-reuniao-com-familias-impactadas-por-rompimento-de-barragem-e-reforca-acoes-de-inquerito-civil-em-jaraguari>. Acesso em: 12 maio 2025.

PALU, M. C.; JULIEN, P. Y. (2019). Modeling the sediment load of the Doce river after the fundão tailings dam collapse, Brazil. *Journal of Hydraulic Engineering*, 145(5), p. 05019002.

ROLO, R. M. et al. (2022). A Python implementation for the simplified dam-break flood modeling. *RBRH*, 27, e8.

SEMADESC; IMASUL. (2024). IMASUL realiza visita e inicia processo de autuação por danos ambientais após rompimento de barragem. Campo Grande: SEMADESC. Disponível em: <https://www.semadesco.ms.gov.br/nota-a-imprensa-semadesc-e-imasul-vistoriam-barragem-do-nasa-park-para-avaliar-danos-e-executar-acoes-necessarias/>. Acesso em: 5 jun. 2025.

TSCHIEDEL, A. et al. (2023). Novo método simplificado para estimativas de manchas de inundação associadas ao rompimento hipotético de barragens. In: *Anais do XXXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Foz do Iguaçu*. Comitê Brasileiro de Barragens, Tema 127.

VIANINI, L. (2016). Estudo de ruptura da barragem da Pampulha, em Belo Horizonte: Retroanálise da brecha do acidente de 1954 e ruptura hipotética nas condições atuais. 304 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – UFMG, Belo Horizonte.

ZHU, F.; ZHANG, W.; PUZRIN, A. M. (2024). The slip surface mechanism of delayed failure of the Brumadinho tailings dam in 2019. *Communications Earth & Environment*, 5(1).

AGRADECIMENTOS especiais ao SIMEPAR (Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná) pelo apoio institucional e pela infraestrutura disponibilizada, que contribuiu de forma significativa para o desenvolvimento desta pesquisa.