

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

INFLUÊNCIA DOS MÉTODOS DE SIMULAÇÃO E DOS MODELOS DIGITAIS DE TERRENO NA GERAÇÃO DE MANCHAS DE INUNDAÇÃO

*Natália Nor¹; Priscila Maria Kipper²; Renato Steinke Junior³; Fernando Oliveira Fraga⁴;
Cassiano Korndoerfer Tornin⁵; Daniela Guzzon Sanagiotto⁶; Luiz Augusto Magalhães Endres⁷;
Mauricio Dai Prá⁸ & Eder Daniel Teixeira⁹.*

Abstract: Accurate delineation of flood inundation areas is essential for risk management associated with dam failure, particularly for defining the Self-Rescue Zone and developing Emergency Action Plans. This study aims to evaluate the influence of different hydrodynamic simulation methods and digital terrain models (DTMs) on the generation of flood inundation maps. The two approaches compared were the two-dimensional HEC-RAS model and the simplified method LNEC, applied over two elevation models: FABDEM, an open access DTM with 30 m resolution, and LiDAR, a high-resolution DTM (0.3 m). The case study was conducted at the Salto Dam, located on the Caí River, in Rio Grande do Sul, Brazil. Results indicate that HEC-RAS 2D produces more conservative inundation extents due to its greater ability to represent hydraulic processes in detail. Conversely, the LNEC method proved satisfactory for preliminary analyses. Furthermore, despite its lower resolution, the FABDEM terrain exhibited coherent hydrodynamic behavior, making it a viable alternative in the absence of LiDAR data.

Resumo: A delimitação precisa de manchas de inundação é fundamental para a gestão de riscos associados à ruptura de barragens, especialmente na definição da Zona de Autossalvamento (ZAS) e na elaboração dos Planos de Ação de Emergência (PAE). Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência de diferentes métodos de simulação hidrodinâmica e modelos digitais de terreno (MDT) na geração de manchas de inundação. Foram comparados o método bidimensional HEC-RAS 2D e o método simplificado LNEC, aplicados sobre dois modelos de terreno: o FABDEM, de acesso livre e resolução de 30 m, e o LiDAR, de alta resolução (0,3 m). O estudo de caso foi realizado na barragem do Salto, localizada no Rio Caí, Rio Grande do Sul. Os resultados indicam que o HEC-RAS 2D apresenta manchas mais conservadoras, com maior abrangência, em função de sua capacidade de representar os processos hidráulicos com maior detalhamento. Por outro lado, o método LNEC demonstrou desempenho satisfatório para aplicações preliminares. Além disso, mesmo com menor resolução, os resultados com o terreno FABDEM apresentou comportamento hidrodinâmico coerente, configurando-se como uma alternativa viável na ausência de informações de modelo de terreno de maior precisão.

Palavras-Chave – Mancha de Inundação; HEC-RAS 2D; Método LNEC.

¹1) Graduanda em Engenharia Hídrica (IPH/UFRGS): natalianorr@gmail.com

²2) Mestranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (IPH/UFRGS); priscila_kipper@hotmail.com

³3) Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (IPH/UFRGS); renato.steinkejunior@gmail.com

⁴4) Mestrando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (IPH/UFRGS); fernandodof@ufrgs.br

⁵5) Graduando em Engenharia Hídrica (IPH/UFRGS); cassianoktornin@outlook.com

⁶6) Professora Doutora DHH/IPH/UFRGS: dsanagiotto@ufrgs.br

⁷7) Professor Doutor DHH/IPH/UFRGS: endres@ufrgs.br

⁸8) Professor Doutor DOH/IPH/UFRGS: mauricio.daipra@ufrgs.br

⁹9) Professor Doutor DOH/IPH/UFRGS: eder.teixeira@ufrgs.br

INTRODUÇÃO

A regulamentação da segurança de barragens no Brasil foi estabelecida com a promulgação da Lei nº 12.334/2010, que instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) (BRASIL, 2010). Esta legislação representou um avanço normativo significativo ao consolidar diretrizes técnicas e administrativas anteriormente baseadas predominantemente em julgamento profissional, conferindo-lhes respaldo jurídico por meio de norma federal (FERLA, 2018). Com o propósito de prevenir acidentes e mitigar os impactos decorrentes de eventuais rupturas, a legislação passou a exigir a elaboração de dois instrumentos fundamentais: o Plano de Segurança da Barragem (PSB) e o Plano de Ação de Emergência (PAE).

A Lei nº 12.334/2010 foi posteriormente alterada pela Lei nº 14.066/2020 (BRASIL, 2020), que introduziu aprimoramentos relevantes, incluindo o endurecimento dos critérios para obrigatoriedade do PAE, ampliando, assim, o número de empreendimentos passíveis de enquadramento nessa exigência. Para a definição da classificação de risco da barragem e a consequente necessidade de elaboração do PAE, é imprescindível a análise dos danos potenciais associados (DPA) à ruptura da estrutura (BRASIL, 2020). O PAE deve contemplar, entre outros elementos, a delimitação da Zona de Autossalvamento (ZAS), definida como o trecho a jusante da barragem no qual o tempo de resposta é insuficiente para a atuação eficaz das autoridades competentes.

Dessa forma, torna-se essencial o conhecimento prévio acerca da possível mancha de inundação associada à ruptura de barragens. Nesse cenário, as modelagens conhecidas como análises de *Dam-Break* consistem na simulação hidrodinâmica do escoamento decorrente de uma falha estrutural hipotética, permitindo a estimativa de parâmetros hidrológicos e hidráulicos críticos, tais como o tempo de chegada da onda de cheia, as profundidades máximas, as velocidades de escoamento e a delimitação das áreas potencialmente afetadas. Essas informações são fundamentais para o mapeamento de zonas de risco e para o planejamento de medidas emergenciais eficazes. A determinação da mancha de inundação resultante de uma possível ruptura pode ser realizada por meio de modelos hidrodinâmicos detalhados ou, alternativamente, por métodos simplificados. Contudo, Melo (2015) sugere que os métodos simplificados sejam utilizados como uma alternativa para subsidiar a classificação de risco da estrutura, visto que a elaboração do PAE exige análises mais rigorosas e detalhadas.

Assim, o presente estudo tem como objetivo realizar uma análise comparativa entre o método simplificado LNEC (MELO, 2015) e a modelagem computacional bidimensional por meio do *software* HEC-RAS 2D, com o intuito de avaliar a concordância entre os resultados obtidos por ambos os métodos no que se refere à delimitação da área de inundação resultante de uma provável ruptura de barragem. Ressalta-se que o método simplificado representa uma alternativa de menor complexidade e maior acessibilidade operacional, enquanto o HEC-RAS 2D configura uma ferramenta mais robusta e detalhada para a simulação hidrodinâmica. Para entender o comportamento das manchas de inundação utilizando os diferentes métodos, foi adotada, como estudo de caso, a barragem do Salto.

METODOLOGIA

O estudo de caso desenvolvido neste trabalho refere-se à barragem do Salto, localizada no município de São Francisco de Paula, no estado do Rio Grande do Sul, e instalada no rio Caí. O empreendimento é de propriedade da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN Energia) / Companhia Estadual de Geração de Energia Elétrica (CEEE-G). A barragem é do tipo gravidade em concreto e

possui altura de 10 m, comprimento de 600 m e reservatório com volume total de 14 hm³. A extensão longitudinal avaliada considera o trecho do rio entre a barragem do Salto até o início do reservatório da barragem do Toca, totalizando 11,7 km de extensão (Figura 1 e Figura 2).

Figura 1 – Localização da barragem do Salto.

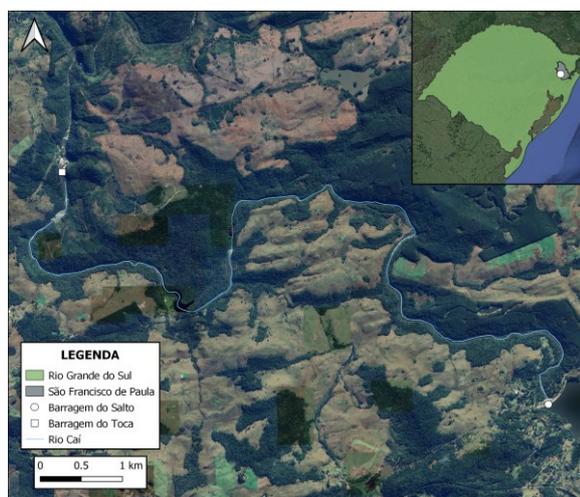


Figura 2 – Barragem do Salto.



Para a simulação da ruptura hipotética da barragem do Salto, foi utilizado o *software* de modelagem hidrodinâmica HEC-RAS (versão 6.1), desenvolvido pelo USACE, no módulo bidimensional (2D). A malha utilizada considerou uma geometria de 10 m X 10 m em toda a extensão do rio. Na condição de contorno de montante, considerou-se o hidrograma de ruptura por galgamento estabelecido através do *software* HEC-RAS 2D, com vazão máxima de 10.246 m³/s e tempo de pico igual a 15 minutos. Além disso, optou-se por utilizar como condição de contorno de jusante a profundidade normal do escoamento, associada à ocorrência do regime uniforme.

O método simplificado utilizado foi o *Simplified Dam-break Flood Modeling*, denominado aqui como método LNEC, que consiste em uma metodologia desenvolvida por parte da equipe do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC/Portugal) entre 2013 e 2014, como parte integrante do estudo designado de “Produto 6” do contrato N° 051/ANA/2012, firmado pela Agência Nacional da Água e Saneamento Básico (ANA) em parceria com o Banco Mundial, no âmbito do qual o LNEC foi contratado para um conjunto de estudos. Na página eletrônica do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), a ANA disponibiliza um curso sobre classificação do DPA de barragens, no qual o método simplificado LNEC é a abordagem utilizada no estabelecimento da mancha de inundação. O método foi posteriormente publicado por Melo (2015). Para a aplicação do método, é necessário definir seções transversais ao eixo do rio em todo o vale a jusante estudado. Assim foram consideradas 20 seções transversais.

A fim de avaliar se há paridade nas manchas de inundação resultante das metodologias utilizadas, escolheu-se aplicar os mesmos dados de entrada para os dois métodos. Assim, foram utilizados dois MDTs. O primeiro deles (1) FABDEM (*Forest and Buildings removed Copernicus DEM*), que possui resolução espacial de 30 m. Essa base topográfica consiste em uma remodelação a partir de uma versão do COPERNICUS DEM. Trata-se de um MDT representado a partir de um Modelo Digital de Superfície (MDS) e, para isso, foram realizados reprocessamentos para retiradas de árvores e áreas urbanas do MDT de origem (HAWKER et al., 2022). O segundo MDT utilizado

(2) é o sendo o LiDAR (*Light Detection and Ranging*) que se trata de um MDT gerado por meio de aerolevantamento LiDAR juntamente com dados de batimetria, elaborado por uma empresa terceirizada. O MDT LIDAR possui resolução espacial de 0,3 m.

No estudo apresentado por Kipper et al. (2023), foram comparadas as áreas das manchas de inundação, também usando a barragem de Salto como caso de estudo, para três coeficientes de Manning: 0,035, 0,06 e 0,11. A área para $n=0,06$ foi 4% maior que a área para $n=0,035$, enquanto a área para $n = 0,11 \text{ s.m}^{-1/3}$ foi 12% maior do que para $n = 0,035 \text{ s.m}^{-1/3}$. Então, considerando as análises realizadas por Kipper et al (2023) e as recomendações sugeridas por Melo (2015) se optou por utilizar neste trabalho o coeficiente de rugosidade de Manning de $n = 0,06 \text{ s.m}^{-1/3}$.

Dessa forma, utilizando os dois modelos de terrenos e os dois métodos previamente descritos, foram realizadas duas abordagens comparativas. A primeira consiste em uma análise visual, complementada pela comparação das áreas em hectares. Para essa análise, foi realizada a extração das manchas e, posteriormente, o cálculo das respectivas áreas.

A segunda abordagem corresponde a uma análise comparativa da largura superficial da mancha de inundação ilustrada pela Figura 3, na qual foram selecionadas cinco seções específicas (1, 3, 5, 8 e 10). A escolha dessas seções foi intencional, com o objetivo de evidenciar as discrepâncias tanto nas extremidades da mancha quanto em pontos onde as diferenças entre os métodos se mostraram mais expressivas na análise anterior. As demais seções (2, 4, 6, 7 e 9), foram selecionadas de forma arbitrária, distribuídas entre as seções anteriormente definidas, a fim de proporcionar uma avaliação mais abrangente do comportamento dos métodos e dos terrenos ao longo de todo o traçado.

Figura 3 – Seções utilizadas na comparação da largura superficial da mancha de inundação.



RESULTADOS

As manchas de inundação obtidas a partir dos modelos de terrenos FABDEM e LiDAR, por meio dos métodos LNEC e HEC-RAS 2D, são apresentadas, respectivamente, nas Figuras 4 e 5. Em cada figura é apresentada uma visão geral e três ampliações, sendo elas os detalhes 1, 2 e 3, que possibilitam a análise comparativa entre as manchas geradas por cada método. Essa abordagem permite identificar, com maior precisão, as diferenças espaciais nas áreas inundadas em função da metodologia de modelagem hidrodinâmica e da fonte de dados altimétricos utilizada.

Figura 4 – Manchas de Inundação – Comparação entre os métodos utilizando o terreno FABDEM.

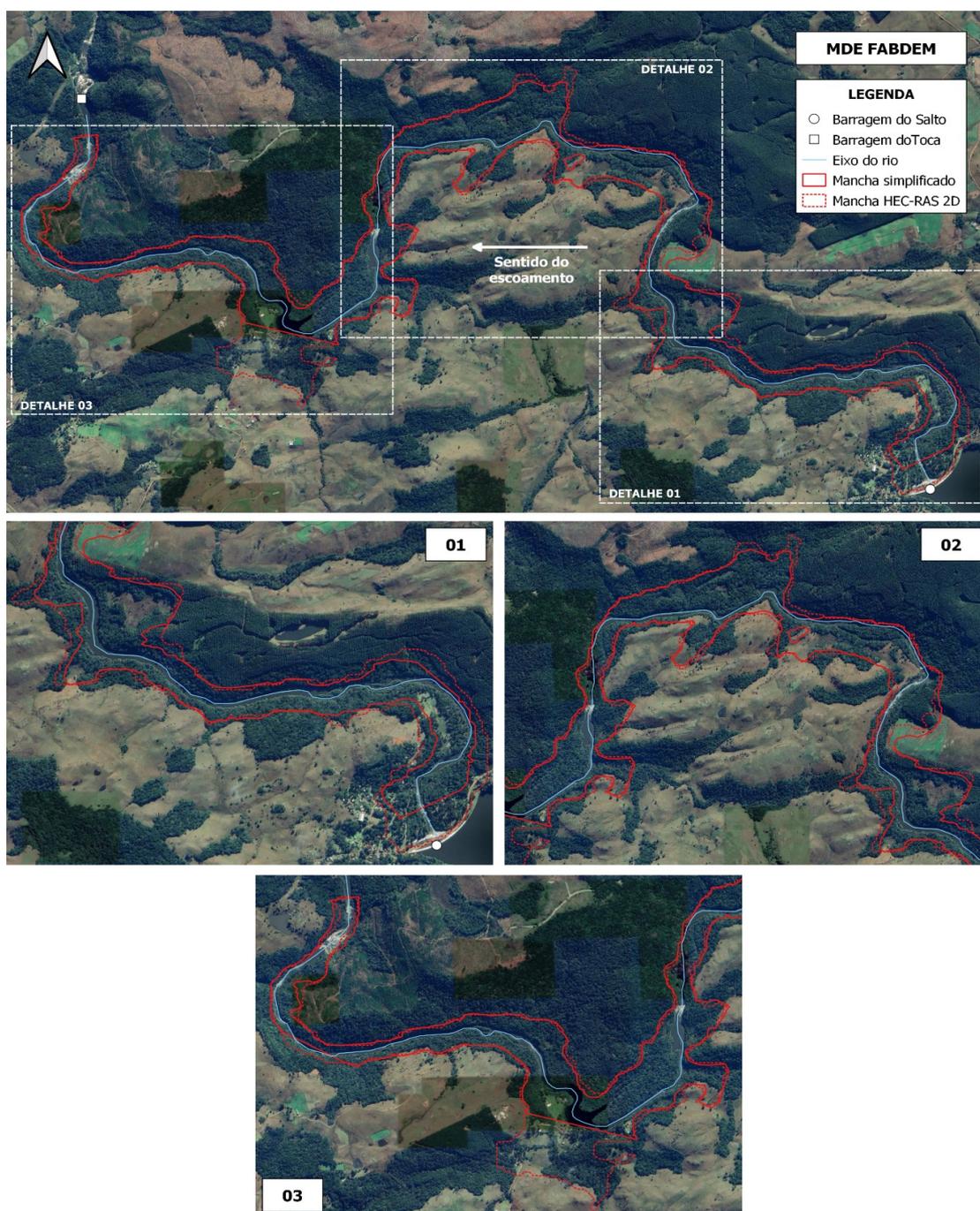
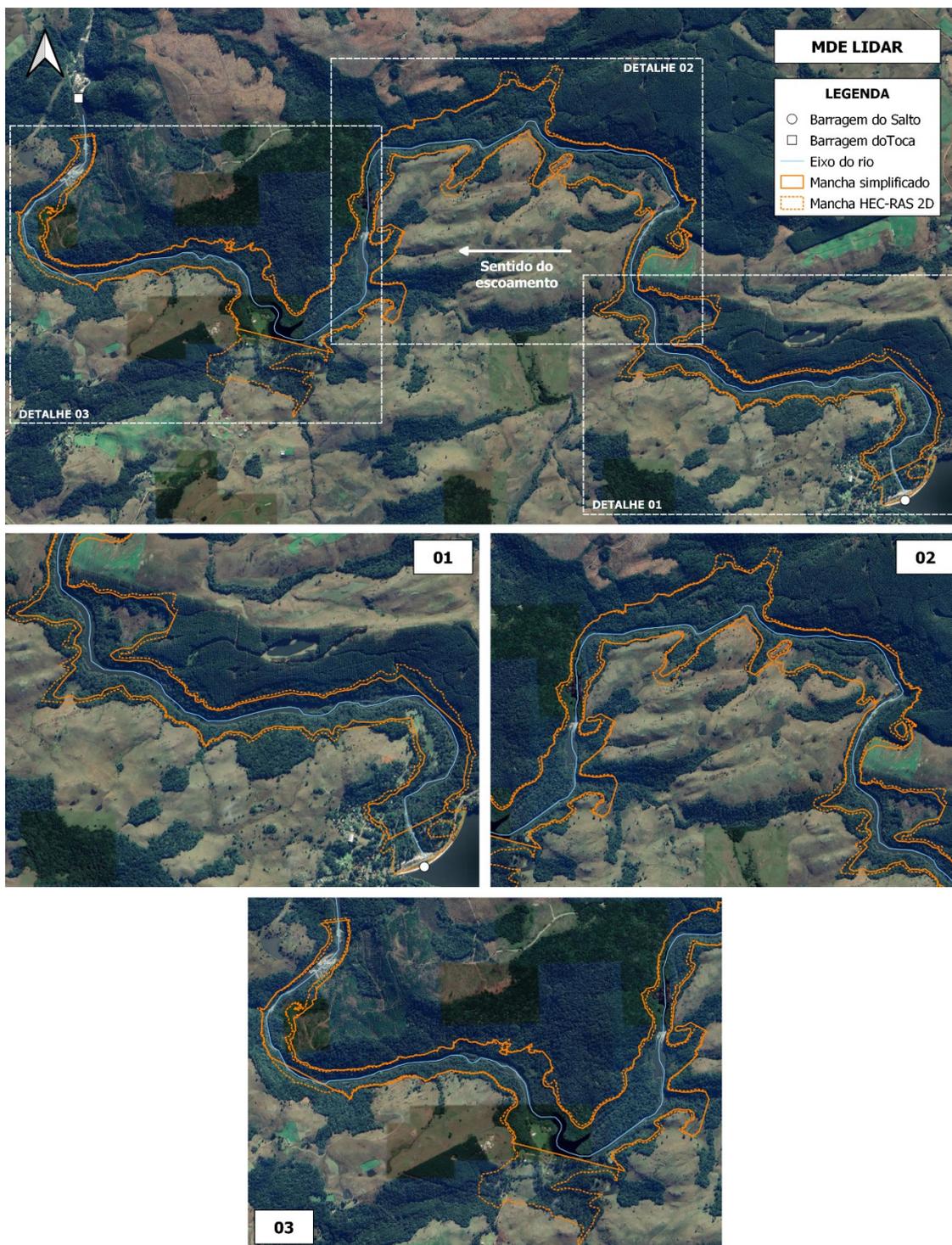


Figura 5 – Manchas de Inundação – Comparação entre os métodos utilizando o terreno LiDAR.



Pode-se notar que, para os dois métodos analisados, o comportamento das manchas é semelhante ao longo do trecho estudado, porém, quanto à abrangência da área inundada, usando o método computacional HEC-RAS 2D como referência, nota-se uma diferença de 18% para o modelo de terreno FABDEM e de 16% para o modelo de terreno LiDAR, conforme representado na Tabela 1. Já comparando a abrangência da mancha de inundação, usando os resultados do MDT LiDAR

como referencial, nota-se diferenças de 0,8% para o método simplificado LNEC e de 3,3% para o método computacional HEC-RAS 2D. Essas diferenças, quando comparadas pelos detalhes das manchas mostrados nas Figuras 4 e 5 de cada terreno, provêm, em grande parte, da evidência de uma planície de inundação que não foi identificada no método LNEC. Isso ocorre, possivelmente, pois o algoritmo desenvolvido por Oliveira e Martins (2015) para extração da mancha de inundação a partir dos resultados de elevação do nível d'água obtidos pelo método LNEC, determina o traçado da mancha por meio da intersecção entre duas superfícies: o MDT e a superfície formada pela união das elevações máximas do escoamento atingidas em cada seção. Este resultado acaba se limitando ao contorno das 20 seções, onde se pode notar a maior divergência entre os métodos. Vale destacar que esta não é uma falha do método LNEC, uma vez que isto pode ser corrigido mudando o ângulo e/ou a posição das seções transversais estabelecidas.

Tabela 1 – Comparação dos resultados de área inundada obtidos no método LNEC e HEC-RAS 2D.

Terrenos	Métodos		Diferença
	LNEC	HEC-RAS 2D	
	Área Inundada (ha)		
FABDEM	257	314	18 %
LiDAR	255	304	16 %
Diferença	0,8 %	3,3 %	

Na segunda abordagem comparativa, foram definidas 10 seções transversais distintas daquelas previamente utilizadas na aplicação do método LNEC, com o objetivo de avaliar a largura superficial entre os limites das manchas de inundação anteriormente apresentadas nas Figuras 4 e 5. As seções para esta comparação, ilustradas na Figura 3, foram classificadas em dois grupos: seções específicas, posicionadas estrategicamente em locais onde as manchas apresentam comportamentos discrepantes em função dos modelos de terreno e dos métodos adotados; e seções aleatórias, distribuídas entre as seções específicas, com a finalidade de assegurar uma análise isenta de vieses e garantir a representatividade dos resultados.

Tabela 2 – Comparação dos resultados da largura superficial das margens das áreas inundadas.

Seção	Distância até a barragem (m)	Métodos					
		LNEC			HEC-RAS 2D		
		Terrenos					
		FABDEM	LiDAR	Diferença	FABDEM	LiDAR	Diferença
		Largura Superficial (m)					
1	1.052	170	140	17.65%	281	243	13.52%
2	2.218	210	220	4.76%	187	235	25.67%
3	3.166	513	498	2.92%	632	580	8.23%
4	4.403	241	280	16.18%	241	272	12.86%
5	5.739	437	391	10.53%	509	504	0.98%
6	6.456	225	244	8.44%	232	249	7.33%
7	7.618	286	309	8.04%	300	308	2.67%
8	8.671	207	229	10.63%	422	600	42.18%
9	9.591	209	206	1.44%	215	208	3.26%
10	11.259	106	202	90.57%	175	120	31.43%

Observa-se que, de modo geral, o comportamento das manchas geradas pelos métodos HEC-RAS 2D e LNEC apresenta semelhanças, no entanto, as análises quantitativas revelam diferenças tanto entre os modelos de terrenos quanto entre os métodos, conforme apresentado na Tabela 2. No que se diz respeito às diferenças entre os modelos de terrenos para o método de simulação HEC-RAS 2D observa-se que o MDT LiDAR apresenta valores em média 12,5 m maiores que os apresentados no MDT FABDEM. Já para o método LNEC, a diferença média resultante da comparação entre os dois modelos de terrenos foi de 11,5m maiores para o MDT LiDAR.

Quando se comparam os métodos de simulação em um mesmo terreno, verifica-se que, para o MDT FABDEM, a diferença média é de 60 m maiores para os resultados simulados através do método HEC-RAS 2D. E no MDT LiDAR os resultados são bem semelhantes aos do MDT FABDEM, tendo como resultado médio 59 m maiores para os resultados apresentados pelo método HEC-RAS 2D.

CONCLUSÃO

De maneira geral, verificou-se que o método HEC-RAS 2D, por adotar uma abordagem bidimensional, apresenta maior sensibilidade na representação dos processos hidráulicos, resultando em manchas de inundação mais abrangentes quando comparado ao método LNEC. Essa tendência se manteve consistente independentemente do MDT adotado, com diferença percentual de 18% para o FABDEM e de 16% para o LiDAR, embora os valores absolutos das diferenças sejam mais expressivos no modelo de terreno gerado a partir do LiDAR, cuja resolução mais elevada potencializa tanto a captura das variações topográficas quanto o reflexo das limitações dos métodos empregados.

Apesar de o MDT FABDEM apresentar menor resolução espacial, seus resultados mostraram-se satisfatórios, com comportamento hidrodinâmico coerente ao longo de todo o trecho analisado. Este desempenho se torna especialmente relevante considerando que se trata de um modelo de terreno livre, de acesso público e disponível, configurando-se, portanto, como uma alternativa viável para regiões que não dispõem de dados LiDAR de alta resolução.

Adicionalmente, os resultados obtidos com o *software* HEC-RAS 2D demonstram maior aderência às condições hidráulicas do escoamento, proporcionando resultados mais robustos e conservadores. Dessa forma, o HEC-RAS 2D se apresenta como uma ferramenta mais alinhada aos princípios de segurança que norteiam a elaboração do PAE. Por outro lado, os resultados também reforçam que o método LNEC, apesar de sua simplicidade operacional e baixo custo computacional, é capaz de fornecer estimativas satisfatórias, podendo ser aplicado em etapas preliminares da elaboração do PAE, especialmente em cenários onde se busca agilidade na análise, priorização de ações ou em locais com restrição de dados e recursos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio dos financiadores e facilitadores: CSN-ENERGIA/CEEE-G pelo financiamento da pesquisa e pelo fornecimento de dados ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS), ao CNPq (Brasil) e à CAPES-Brasil pelo apoio financeiro parcial.

REFERÊNCIAS

BRASIL. **Lei nº 12.334**, de 20 de setembro de 2010. Presidência da República. Casa Civil. Brasília, DF, 20 de setembro de 2010.

BRASIL. **Lei nº 14.066**, de 30 de setembro de 2020. Presidência da República. Casa Civil. Brasília, DF, 30 de setembro de 2020.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. **Análise do Rompimento hipotético da barragem de Ernestina**. RBRH, Revista Brasileira de Recursos Hídricos. 1997.

DAMS SECTOR. **Estimating Loss of Life for Dam Failure Scenarios**, U. S. Department of Homeland Security. 2011.

FERLA, R. **Análise de aspectos hidráulicos de métodos simplificados envolvendo rompimento de barragens**. 223 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS, Porto Alegre, 2018.

KIPPER, P.; STEINKE JUNIOR, R.; FERLA, R.; TEXEIRA, E.D.; MELO, J.F.; ROSSI, C.L.C.U.; ENDRES, L.A.; BRUNE, T.C.; SMIDERLE, C.S.; SANAGIOTTO, D.G.; DAI PRÁ, M. **Influência do Coeficiente de Rugosidade de Manning no Estudo de Ruptura de Barragens: Estudo e Caso da Barragem do Salto**. SBRH. 2023.

MELO, J. F. Dam-Break Flood Risk Assessment, **Second International Dam World Conference**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa. 2015.

OLIVEIRA, M.; MARTINS, T. (2015) – “**Dam-break flood-prone areas delineation and characterization**”. Second International Dam World Conference, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa. 2015.

USACE. **Using HEC-RAS for Dam Break Studies**. Davis CA: USACE, 2014.

USBR. **Investigation of the Failure Modes of Concrete Dams - Physical Model Tests**. Denver: USBR, 2002.

U. S. BUREAU OF RECLAMATION. **Policy and Procedures for Dam Safety Modification Decisionmaking**, Department of Interior, Denver. 1989.

USACE – U. S. Army Corps of Engineers. **HEC-RAS River Analysis System. Hydraulic Reference Manual. Version 5**. Davis: 2016.

VIEIRA, A. – **Barragem do salto, São Francisco de Paula**, Caminhos do Sul. Disponível em: <oscaminhosdosul.blogspot.com>, Acesso em: 19 de maio de 2025.