



## Mapa de risco hidrodinâmico: diferenças observadas entre simulações hidrodinâmicas com MDE livre e levantado em campo

Renato Steinke Junior<sup>1</sup>, Priscila Maria Kipper<sup>2</sup>, Fernando de Oliveira Fraga<sup>3</sup>, Rute Ferla<sup>4</sup>, José Falcão de Melo<sup>5</sup>, Camila de Souza Dahm Smiderle<sup>6</sup>, Cassiano Korndorfer Tornin<sup>7</sup>, Daniela Guzzon Sanagiotto<sup>8</sup>, Luiz Augusto Magalhães Endres<sup>9</sup>, Marcelo Giulian Marques<sup>10</sup>, Mauricio Dai Prá<sup>11</sup>, Eder Daniel Teixeira<sup>12</sup>

**Resumo:** O risco hidrodinâmico é um parâmetro hidráulico que pode ser associado à capacidade destrutiva do escoamento, de modo que mapas indicativos desta grandeza costumam ser um dos produtos dos estudos de ruptura hipotética de barragens. Este trabalho avalia resultados de risco hidrodinâmico, profundidades e velocidades máximas do escoamento, obtidos a partir de simulações hidrodinâmicas no software HEC-RAS, em estudo de caso de ruptura hipotética da barragem Capigui I. Visando avaliar a variabilidade dos valores de risco hidrodinâmico a depender da origem dos dados de terreno, foram utilizadas duas bases topográficas, sendo uma delas de abrangência global e de livre acesso (FABDEM) e outra coletada em campo (por meio de sensor LIDAR e ecobatímetro). Como resultados, observou-se que as profundidades máximas na simulação com o terreno FABDEM foram aproximadamente 25% maiores do que as do terreno cujos dados foram coletados em campo, principalmente no trecho mais afastado da barragem. Já as velocidades máximas e os riscos hidrodinâmicos apresentaram resultados semelhantes para os dois terrenos avaliados. Contudo, a mancha de inundação e as áreas associadas às classificações mais críticas do risco hidrodinâmico foram aproximadamente 17% maiores na simulação feita com o FABDEM.

**Abstract:** The flood hazard is a hydraulic quantity that can be associated with the destructive capacity of the flow, such that flood hazard maps are often a byproduct of dambreak studies. This study assesses the flood hazard, as well as maximum flow depths and velocities yielded from hydrodynamic simulations carried out in the software HEC-RAS, in a case study of the hypothetical dambreak of Capigui I dam. Aiming mainly in assessing the variability of the flood hazard values depending on the source of the terrain data, two digital elevation models were used: one of them being of global coverage and free access (FABDEM) and the other built with field data (by means of LIDAR and echo sounder). The results showed that the maximum depths in the FABDEM simulation were roughly 25% greater than those of the terrain whose data was collected *in situ*, especially in the region furthest downstream of the dam. The maximum velocity and flood hazard results were similar for both terrains. However, the flood map and the areas associated with the most critical flood hazard classifications were approximately 17% larger in the FABDEM simulation.

**Palavras-Chave:** risco hidrodinâmico, estudos de *dambreak*, modelos digitais de elevação.

**Keywords:** flood hazard, dambreak studies, digital elevation models.

- 
- 1) Laboratório de Obras Hidráulicas, IPH/UFRGS, Porto Alegre, RS ([renato.steinke@ufrgs.br](mailto:renato.steinke@ufrgs.br))
  - 2) Laboratório de Obras Hidráulicas, IPH/UFRGS, Porto Alegre, RS ([priscila\\_kipper@hotmail.com](mailto:priscila_kipper@hotmail.com))
  - 3) Laboratório de Obras Hidráulicas, IPH/UFRGS, Porto Alegre, RS ([fernando\\_oliveira\\_fraga@hotmail.com](mailto:fernando_oliveira_fraga@hotmail.com))
  - 4) Laboratório de Obras Hidráulicas, IPH/UFRGS, Porto Alegre, RS ([rute.ferla@ufrgs.br](mailto:rute.ferla@ufrgs.br))
  - 5) Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal ([jfmelo@lnec.pt](mailto:jfmelo@lnec.pt))
  - 6) Coordenadora de Segurança de Barragens, CSN ([camila.dahm@csn.com.br](mailto:camila.dahm@csn.com.br))
  - 7) Laboratório de Obras Hidráulicas, IPH/UFRGS, Porto Alegre, RS ([cassianoktornin@outlook.com](mailto:cassianoktornin@outlook.com))
  - 8) Laboratório de Obras Hidráulicas, IPH/UFRGS, Porto Alegre, RS ([dsanagiotto@ufrgs.br](mailto:dsanagiotto@ufrgs.br))
  - 9) Laboratório de Obras Hidráulicas, IPH/UFRGS, Porto Alegre, RS ([endres@ufrgs.br](mailto:endres@ufrgs.br))
  - 10) Laboratório de Obras Hidráulicas, IPH/UFRGS, Porto Alegre, RS ([mmarques@iph.ufrgs.br](mailto:mmarques@iph.ufrgs.br))
  - 11) Laboratório de Obras Hidráulicas, IPH/UFRGS, Porto Alegre, RS ([mauricio.daipra@ufrgs.br](mailto:mauricio.daipra@ufrgs.br))
  - 12) Laboratório de Obras Hidráulicas, IPH/UFRGS, Porto Alegre, RS ([eder.teixeira@ufrgs.br](mailto:eder.teixeira@ufrgs.br))



## INTRODUÇÃO

O rompimento de uma barragem muitas vezes está associado a inestimáveis danos sociais, ambientais e econômicos. Apesar dos significativos avanços no tema de segurança de barragens, acidentes e incidentes ainda são comuns na atualidade, como é o exemplo da ruptura da barragem Kakhovka, na Ucrânia, que ocorreu em junho de 2023, supostamente devido ao conflito militar em andamento, deixando mortos e milhares de desabrigados (VYSHNEVSKYI et al., 2023). Em setembro de 2023, na Líbia, duas barragens romperam devido às chuvas intensas, deixando mais de 5.000 mortos (MOTAMED, 2023). Também devido a fortes precipitações, o maciço da UHE 14 de Julho, localizada no Rio Grande do Sul, sofreu um rompimento parcial, no dia 02/05/2024. Acertadamente, um dia antes do incidente, foi ativado o protocolo de segurança de evacuação dos moradores próximos à estrutura, valendo-se de sistemas de alertas e sirenes. Estes exemplos de rompimentos ajudam a elucidar a importância dos estudos de *dambreak*, bem como de se dispor de um plano de ação em caso de emergências.

O Plano de Ação de Emergência (PAE) é um documento que faz parte do Plano de Segurança da Barragem (PSB) e descreve os procedimentos a serem seguidos pelo empreendedor em caso de emergência envolvendo a barragem. A obrigatoriedade de elaboração do PAE depende das características do barramento e do vale a jusante, bem como do órgão fiscalizador responsável pelo empreendimento. Também, a depender destes elementos, alguns itens que frequentemente devem estar presentes no PAE e/ou no PSB são: a mancha de inundação decorrente da ruptura hipotética, delimitando a Zona de Autossalvamento (ZAS) e a Zona de Salvamento Secundária (ZSS); os tempos para a chegada da onda de cheia e os tempos para o atingimento da vazão máxima; as profundidades e cotas máximas atingidas; as velocidades e vazões máximas; e o mapa de risco hidrodinâmico (ANA, 2022; ANEEL, 2023; ANM, 2022; BRASIL, 2010).

O risco hidrodinâmico  $RH$  é comumente definido como sendo o produto direto entre a profundidade  $y$  e a velocidade  $V$  do escoamento (MARANZONI et al., 2022), e representa o perigo e o potencial de destruição que uma onda de cheia oferece às pessoas e às edificações (BALBI, 2008). Campos (2020), Mayor et al. (2022) e Alves Jr. et al. (2023) são exemplos de trabalhos que contêm análises envolvendo o risco hidrodinâmico. Dentre os trabalhos encontrados na literatura, nenhum discorre sobre as diferenças, no risco hidrodinâmico, advindas de se utilizar diferentes modelos digitais de elevação (MDEs). Assim, este artigo tem como objetivos contribuir para o tema do risco hidrodinâmico, ao avaliar a influência da utilização de diferentes MDEs na análise desta grandeza, de forma aplicada em um estudo de caso.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A barragem de acumulação de água Capigui I, localizada no município de Passo Fundo, RS, e instalada no rio Capingui, foi escolhida como o estudo de caso para a elaboração deste artigo. A barragem, de propriedade da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN Energia)/Companhia Estadual de Geração de Energia Elétrica (CEEE-G), é do tipo gravidade em concreto e possui altura equivalente a 20,5 m, comprimento de 233 m e reservatório com capacidade para o armazenamento de 46,2 hm<sup>3</sup> (Figura 1).

Para analisar o efeito do MDE no risco hidrodinâmico, foram utilizados dois terrenos diferentes: uma base topográfica de uso livre e uma cuja elaboração foi contratada especificamente para abranger esta barragem e o vale a jusante. A base topográfica de livre acesso é o FABDEM (*Forest And Buildings removed Copernicus DEM*), que possui resolução espacial de 30 metros e representa um mapa de elevação global. Para seu desenvolvimento, foram aplicadas técnicas de “*machine learning*” para a remoção de edifícios e florestas da base topográfica Copernicus DEM (HAWKER et al., 2022). A outra base topográfica utilizada, aqui chamada de LIDAR, foi elaborada



a partir de aerolevantamento com LIDAR e complementada com dados batimétricos medidos em campo, serviços estes que foram executados por uma empresa contratada pela proprietária da barragem.

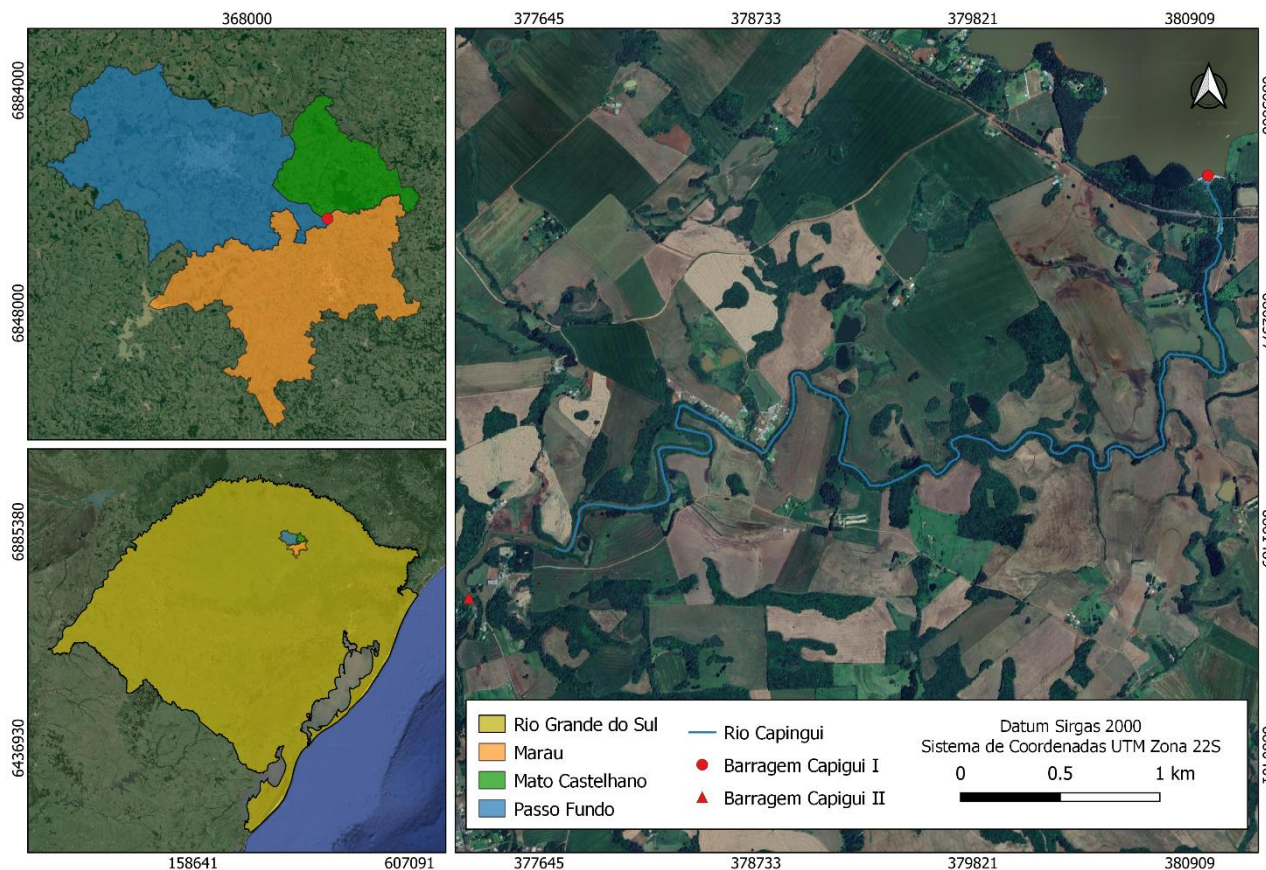


Figura 1 – Localização da barragem Capigui I

A simulação da propagação do hidrograma de ruptura da barragem Capigui I ao longo do vale a jusante foi feita com auxílio do módulo bidimensional (2D) do *software* de modelagem hidrodinâmica HEC-RAS (versão 6.1), desenvolvido pelo U.S. Army Corps of Engineers (USACE, 2016). A fim de se comparar os efeitos causados pelo uso de diferentes bases topográficas, foram utilizadas as mesmas condições de contorno de entrada e saída do modelo, para as duas simulações.

Como condição de contorno de montante, foi especificado um hidrograma associado à ruptura hipotética da barragem, estabelecido através da evolução da brecha de ruptura desenvolvida no *software* HEC-RAS, o qual estabelece a vazão máxima associada à ruptura e o formato e duração do hidrograma (Figura 2). Para a definição dos parâmetros geométricos da brecha e do tempo de ruptura, foram seguidas as recomendações da Eletrobrás (2003). A brecha especificada é de formato retangular, com largura igual à metade do comprimento da crista da barragem. O tempo de formação da brecha de ruptura adotado foi de 15 minutos e a causa da ruptura considerada foi galgamento. A condição de contorno de jusante utilizada foi a profundidade normal do escoamento. A extensão longitudinal avaliada considera o trecho do rio que inicia a jusante da barragem Capigui I e se estende até o início do reservatório da barragem Capigui II. Ao longo do domínio de simulação, especificou-se malha com geometria de  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  e coeficiente de rugosidade de Manning igual a  $0,06\text{ m}^{-1/3}\text{ s}$ .





Como definição de risco hidrodinâmico, adotou-se que este é o valor máximo, ao longo do tempo, do produto entre a velocidade  $V$  e a profundidade  $y$ , tomadas instante a instante, resultantes da passagem do hidrograma da Figura 2 pelo vale a jusante da barragem, isto é,  $RH = (y \times V)_{máx}$ . A avaliação do risco hidrodinâmico baseou-se em faixas definidas por Synaven et al. (2002) *apud* Balbi (2008), em um estudo que visou definir limites deste parâmetro para diferentes graus de consequências para pessoas e edificações. A Tabela 1 apresenta os danos associados a cada faixa do risco hidrodinâmico.

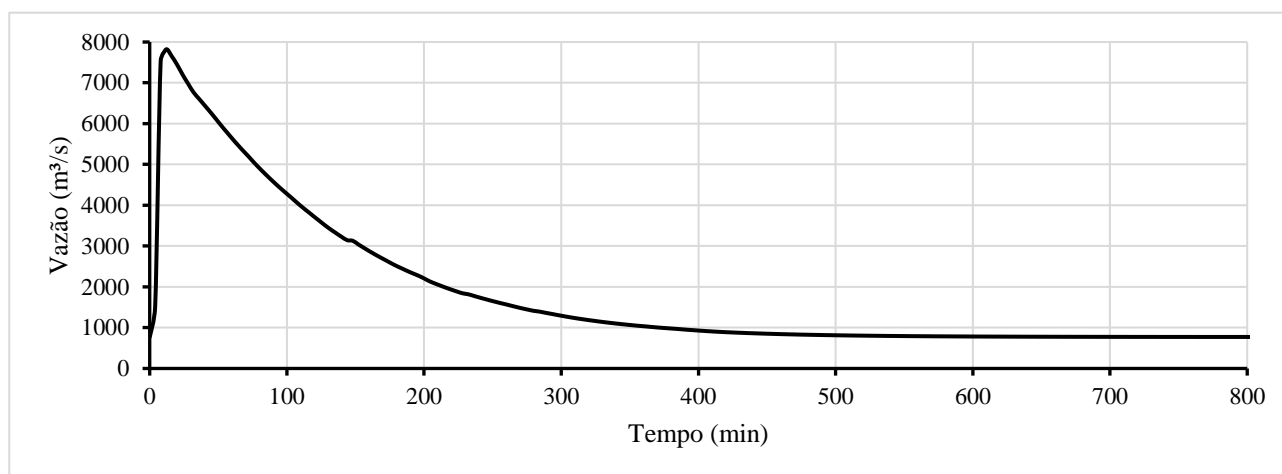


Figura 2 – Hidrograma de ruptura

Tabela 1 – Consequências em função do risco hidrodinâmico. Fonte: Synaven et al. (2002) *apud* Balbi (2008).

Risco hidrodinâmico $RH$ (m <sup>2</sup> /s)	Consequências
$RH < 0,5$	Crianças e pessoas com deficiência são arrastadas
$0,5 < RH < 1$	Adultos são arrastados
$1 < RH < 3$	Danos de submersão em edifícios e estruturais em casas fracas
$3 < RH < 7$	Danos estruturais em edifícios e possível colapso
$RH > 7$	Colapso de certos edifícios

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 3 a 5 contêm, respectivamente, comparações de resultados de profundidades máximas, velocidades máximas e riscos hidrodinâmicos obtidos a partir das simulações feitas com os terrenos FABDEM e LIDAR. Num primeiro momento, fica evidente a diferença entre a resolução de cada mancha de inundação, reflexo da resolução própria de cada MDE. A resolução do FABDEM é de aproximadamente 30 m por pixel, o que não difere muito da maioria das bases livres atualmente disponíveis. Isso implica que, caso haja a necessidade de avaliar o risco hidrodinâmico com informação mais detalhada do que a cada 30 m, deverá ser considerada a possibilidade de se contratar um MDE de maior resolução. Apesar disso, a comparação das manchas de inundação permite afirmar que a sua abrangência, em termos de regiões atingidas, apresentou forte semelhança para os dois terrenos avaliados.

Na Figura 3, são apresentadas as profundidades máximas encontradas para as duas simulações. Em direção aos taludes, no sentido transversal do eixo do rio, a simulação feita com o FABDEM apresentou profundidades significativamente maiores, principalmente para a porção mais a jusante da mancha. Já para o eixo do rio, a simulação LIDAR resultou nos maiores valores de profundidade. Isso ocorreu principalmente devido à presença da informação da calha do rio no terreno

LIDAR, ausente no terreno FABDEM. Também pelo fato de conter dados batimétricos, na mancha associada ao terreno LIDAR é possível visualizar, em vermelho mais escuro, o leito principal do rio, bem como outros contribuintes menores, o que não é visível para a mancha associada ao FABDEM, com a mesma escala de cores.

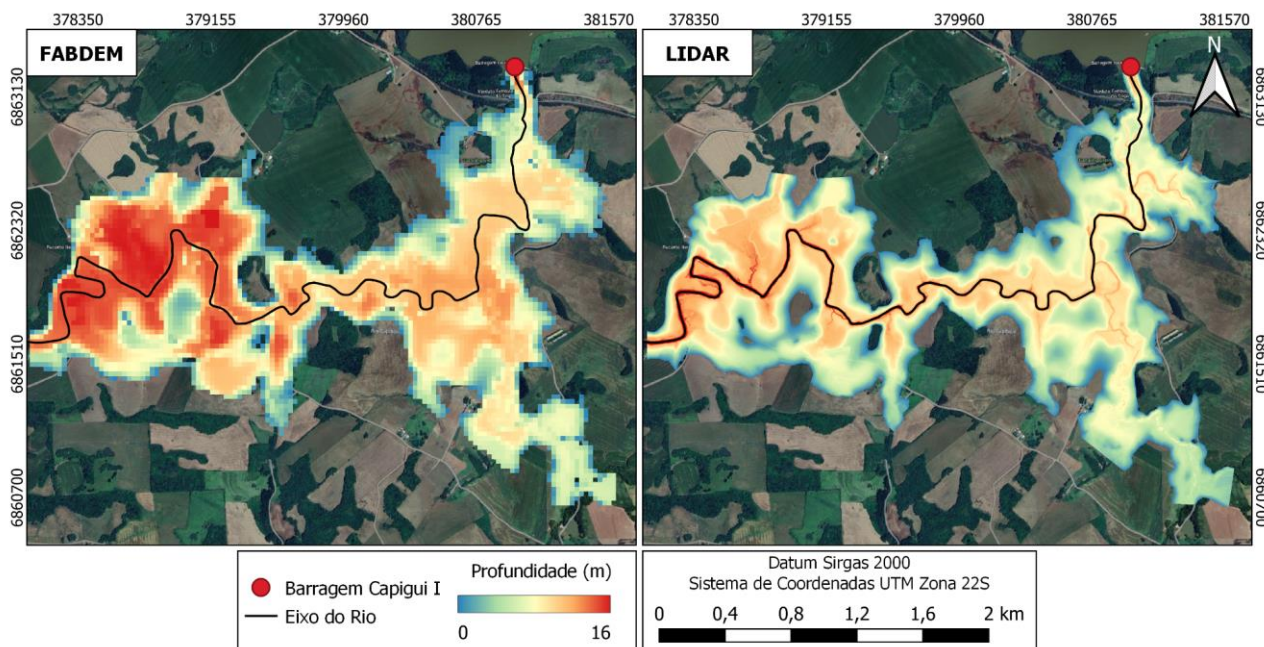


Figura 3 – Profundidades máximas encontradas para os dois terrenos avaliados.

As velocidades máximas são apresentadas na Figura 4. Para ambos os terrenos, as velocidades atingiram valores altos na região próxima à barragem, de até 14,5 m/s. Mais a jusante, as velocidades diminuem para valores entre 0 e 5 m/s. Foram observadas poucas diferenças entre as duas simulações, com os resultados do LIDAR apresentando escoamento levemente mais rápido em algumas regiões, particularmente em regiões próximas ao eixo do rio.

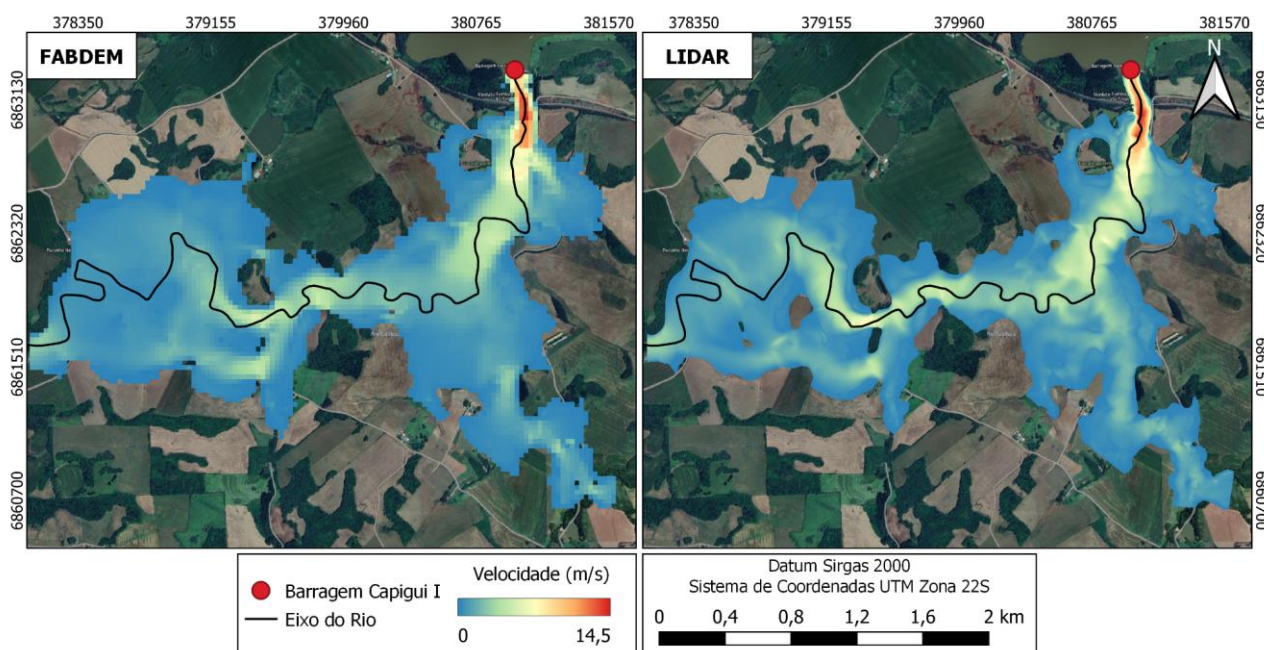


Figura 4 – Velocidades máximas encontradas para os dois terrenos avaliados.





Para a escala de cores adotada na Figura 5, que mostra  $RH \approx 140 \text{ m}^2/\text{s}$  na região imediatamente a jusante da barragem e  $RH \approx 5 \text{ m}^2/\text{s}$  na porção mais a jusante do trecho analisado, os riscos hidrodinâmicos obtidos a partir das duas simulações aparentam assumir valores similares. A Figura 6, na qual se apresentam os valores de  $RH$  discriminados por faixas, fornece uma maior sensibilidade na análise das diferenças entre as duas simulações. O somatório das áreas em cada uma das faixas resultou nos valores da Tabela 2.

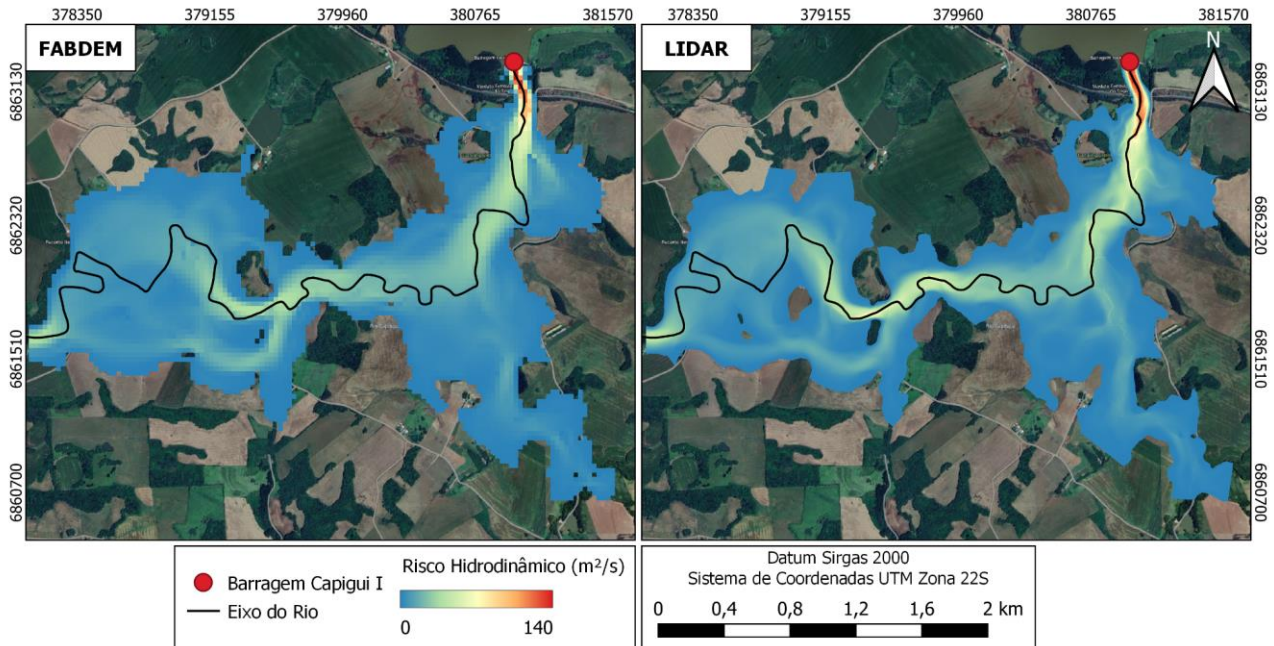


Figura 5 – Risco hidrodinâmico em escala de cores linear.

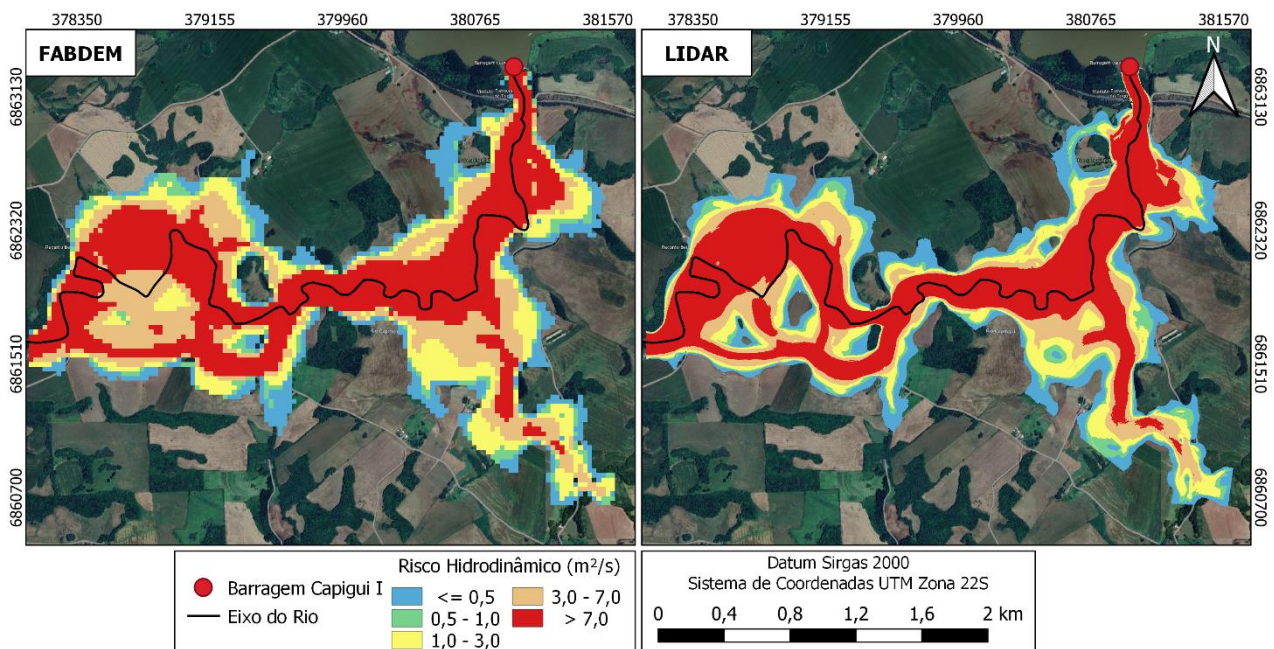


Figura 6 – Risco hidrodinâmico discriminado de acordo com as faixas definidas na Tabela 1.



A simulação feita com o FABDEM resultou em uma área inundada total 0,33 km<sup>2</sup> maior do que a simulação feita com o terreno LIDAR. Um dos motivos para isso é, possivelmente, a presença da calha do rio no LIDAR, a qual abriga uma parcela do volume escoado. Enquanto isso, no FABDEM, pelo fato de não haver calha, o escoamento propagado é forçado a avançar em direção aos taludes, o que, apesar de ser a favor da segurança, não é tão condizente com a realidade. De acordo com a Tabela 2, os valores das áreas enquadradas nas faixas em que as edificações passam a sofrer danos ( $RH > 1$ ) também são maiores na simulação com o FABDEM, em relação à simulação com o terreno LIDAR.

Tabela 2 – Somatório de áreas em cada faixa de  $RH$ .

Risco hidrodinâmico $RH$ (m <sup>2</sup> /s)	Área inundada (km <sup>2</sup> )	
	FABDEM	LIDAR
$RH < 0,5$	0,52	0,58
$0,5 < RH < 1$	0,20	0,24
$1 < RH < 3$	0,59	0,50
$3 < RH < 7$	0,82	0,53
$RH > 7$	1,49	1,44
<b>Total</b>	<b>3,62</b>	<b>3,29</b>

## CONCLUSÃO

Foram conduzidas duas simulações hidrodinâmicas, com diferentes MDEs, utilizando-se o HEC-RAS 2D para propagar o hidrograma de ruptura hipotética ao longo da área a jusante da barragem Capigui I. Os resultados foram comparados em termos de profundidades, velocidades e riscos hidrodinâmicos. Principalmente os resultados de profundidades da simulação com o terreno livre (FABDEM) apresentaram valores em média 25% maiores do que a simulação com o terreno levantado em campo (LIDAR), quando se avalia a totalidade da mancha. Estas diferenças possivelmente fizeram com que os riscos hidrodinâmicos para o terreno livre também assumissem valores maiores em relação ao terreno contratado. Atribuíram-se estas diferenças ao fato de que a calha principal do rio é bem representada no terreno contratado, por ter sido este elaborado também a partir de dados batimétricos coletados em campo. No terreno livre, por outro lado, a calha principal do rio não é representada de forma alguma. Apesar de esta diferença resultar em valores a favor da segurança para o terreno livre, tais resultados provêm de um modelo mais distante da realidade. De todo modo, deve-se destacar a relativa semelhança encontrada nos valores de risco hidrodinâmico nos dois terrenos testados, o que pode até sugerir que a base de dados FABDEM possa ser uma alternativa razoável para avaliação deste parâmetro, especialmente em estudos preliminares (definição de Dano Potencial Associado, PAE e PLANCON iniciais) ou quando da impossibilidade de coleta de dados mais precisos. Contudo, para melhor verificação e confirmação, é necessário conduzir mais estudos de caso, levando-se em conta outras barragens com diferentes características de vale a jusante, a fim de possibilitar uma generalização das conclusões.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Companhia Siderúrgica Nacional (CSN Energia)/Companhia Estadual de Geração de Energia Elétrica (CEEE-G), bem como ao Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) e ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS). Agradecimentos também ao CNPq e à CAPES.



## REFERÊNCIAS

- ALVES JR., F. M., KOBIYAMA, M., CORSEUIL, C. W. (2023). *Flood risk index mapping of an area downstream of a dam in case of a break*. Mercator (Fortaleza), 22, e22004.
- ANA – Agência Nacional de Águas. (2022). *Resolução ANA nº 121, de 09 de maio de 2022*.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. (2023). *Resolução Normativa ANEEL nº 1.064, de 2 de maio de 2023*.
- ANM – Agência Nacional de Mineração. (2022). *Resolução ANM nº 95, de 07 de fevereiro de 2022*.
- BALBI, D. A. F. (2008). *Metodologias para a elaboração de planos de ações emergenciais para inundações induzidas por barragens. Estudo de caso: Barragem de Peti - MG*. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG.
- BRASIL. *Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010*. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 21 set. 2010.
- CAMPOS, R. G. D. (2020). *Proposta de uma metodologia para obtenção de parâmetros de brechas em rupturas de barragens em cascata utilizando modelagem física*. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG.
- HAWKER, L.; UHE, P.; PAULO, L.; SOSA, J.; SAVAGE, J.; SAMPSON, C.; NEAL, J. (2022). *A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed*. Environmental Research Letters 17(2): 024016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>
- MAYOR, C. M. S., RODRIGUES, G. S. A., FONTES, M. M. M. (2022). *Modelagem hidrodinâmica na simulação de ruptura hipotética de barragem de reservação de água: estudo de caso*. Revista Brasileira de Engenharia de Barragens, 13, pp. 51-57.
- MOTAMEDI, Maziar. (2023). *Why did Derna's dams break when Storm Daniel hit Libya?* Al Jazeera, 13 set. 2023. Disponível em: <https://www.aljazeera.com/news/2023/9/13/why-did-dernas-dams-break-when-storm-daniel-hit-libya>. Acesso em: 05 jun. 2024.
- USACE - U.S. Army Corps of Engineers. (2021). *HEC-RAS River Analysis System (Version 6.1)* [Software]. Hydrologic Engineering Center. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/>
- VYSHNEVSKYI, V., SHEVCHUK, S., KOMORIN, V., OLEYNIK, Y., & GLEICK, P. (2023). *The destruction of the Kakhovka dam and its consequences*. Water International, 48(5), pp. 631-647. <https://doi.org/10.1080/02508060.2023.2247679>