

XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

EFEITOS DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO NA PREVISÃO DA ONDA DE RUPTURA DE BARRAGENS EM VALE ENCAIXADO

Renato Steinke Junior¹; Rute Ferla²; Priscila Maria Kipper³; Thiago Cepik Brune⁴; Cassiano Korndorfer Tornin⁵; Guilherme Santanna Castiglio⁶; Carlo Lucca Coutinho Ungaretti Rossi⁷; José Falcão de Melo⁸; Camila de Souza Dahm Smiderle⁹; Daniela Guzzon Sanagiotto¹⁰; Luiz Augusto Magalhães Endres¹¹; Mauricio Dai Prá¹² & Eder Daniel Teixeira¹³

Abstract: The Emergency Action Plan, a formal document which is mandatory depending on the risks and potential damage associated with a dam failure, must comprise dam break studies. The current Brazilian legislation and the manuals issued by the supervisory organs, however, do not contain specifications about the Digital Elevation Models (DEMs) that must be used in the hydrodynamic modeling of a dam failure. This paper sought to compare the effects of using different DEMs in the dam break study of a dam built in a V-shaped valley. Three DEMs were used: two of them (FABDEM and NASADEM) are open-access, generated from satellite imagery; and a third one was generated from in situ topography data. The hydrodynamic modelling software HEC-RAS was used for the numerical simulations of the flow. Results of peak discharges and the general aspect of the inundation area showed similarities among the three simulations, revealing that the open-access DEMs used may yield good estimates of these features. The comparison of peak discharge arrival time and the total flooded area, however, yielded differences of up to 17% and 38%, respectively, among the results associated with the three DEMs. It is recommended that, when possible, dam break studies comprise both open-access and custom-made DEMs.

Resumo: A elaboração do Plano de Ação de Emergência, documento formal cuja obrigatoriedade para barragens brasileiras decorre das características de risco e de dano potencial associado à barragem, passa necessariamente pela condução de estudos de inundação. A legislação vigente e os manuais emitidos por órgãos fiscalizadores, entretanto, não contêm orientações quanto ao modelo digital de terreno que deve ser utilizado na modelagem hidrodinâmica das ondas de ruptura, ferramentas muito úteis neste tipo de estudo. No presente artigo, buscou-se comparar os efeitos provenientes do uso de diferentes modelos digitais de elevação nos estudos de inundação de uma barragem situada em um vale encaixado, valendo-se, para isso, de três diferentes Modelos Digitais de Elevação: dois deles de acesso livre na internet, elaborados a partir de imagens de satélite

1) Doutorando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (IPH/UFRGS); tel: (51) 3308-6114; renato.steinkejunior@gmail.com

2) Doutora em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (IPH/UFRGS); rufeferla@hotmail.com

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

4) Graduando em Engenharia Civil (UFRGS); thiagocbrune@gmail.com

5) Graduando em Engenharia Hídrica (UFRGS); cassianoktornin@outlook.com

6) Doutorando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (IPH/UFRGS); guilhermecastiglio@gmail.com

7) Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental; rossi.carlolucca@gmail.com

8) Pesquisador Sênior do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC); jfmelo@lnec.pt

9) Coordenadora de Segurança de Barragens, CSN; camila.dahm@csn.com.br

10) Professora Doutora DHH/IPH/UFRGS; dsanagiotto@ufrgs.br

11) Professor Doutor DHH/IPH/UFRGS; endres@ufrgs.br

12) Professor Doutor DOH/IPH/UFRGS; mauricio.daipra@ufrgs.br

13) Professor Doutor DOH/IPH/UFRGS; eder.teixeira@ufrgs.br

(NASADEM e FABDEM); e um elaborado a partir de dados levantados em campo. Para as simulações numéricas do escoamento, foi utilizado o *software* de modelagem hidrodinâmica HEC-RAS. Os resultados das vazões máximas e o aspecto geral das manchas de inundação apresentaram semelhanças para as três simulações, revelando que os modelos digitais de elevação livres utilizados podem vir a resultar em estimativas adequadas destes parâmetros. Já a comparação dos tempos de pico e das áreas totais inundadas revelou diferenças de até 17% e 38%, respectivamente, entre os resultados dos três modelos. Recomenda-se que, sempre que possível, sejam feitos estudos envolvendo tanto modelos digitais de elevação dedicados quanto os de acesso livre.

Palavras-Chave: Rompimento de barragens; Modelos Digitais de Elevação; HEC-RAS.

INTRODUÇÃO

A Lei Federal 12.334 (BRASIL, 2010), de 20 de setembro de 2010, cuja publicação foi impulsionada pela ocorrência de um número significativo de acidentes em barragens brasileiras, materializa importantes avanços nesse âmbito: estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) e elenca diversos instrumentos para a fiscalização, cadastro e classificação deste tipo de estruturas no Brasil.

Um dos instrumentos da PNSB instituído pela Lei Federal 12.334 (BRASIL, 2010) é o Plano de Segurança da Barragem, documento que deve ser elaborado e implementado pelo empreendedor da barragem e os responsáveis técnicos por ele escolhidos. Este documento deve ser composto, entre outros elementos, pelo Plano de Ação de Emergência (PAE), para os casos previstos pelo Art. 11 da Lei 12.334/2010, que teve sua redação alterada pela Lei Federal 14.066 (BRASIL, 2020): barragens de médio e alto dano potencial associado ou de alto risco, bem como todas as barragens destinadas à acumulação ou à disposição de rejeitos de mineração.

Assim, com a publicação da Lei 12.334/2010 e posterior atualização dada pela Lei 14.066/2020, a elaboração do PAE passou a ser exigida para um elevado número de barragens. Este documento, por sua vez, estabelece as ações a serem executadas pelo empreendedor em caso de situação de emergência. Conforme o Guia de Orientação e Formulários do Plano de Ação de Emergência – PAE (Volume IV do Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens), publicado pela Agência Nacional de Águas – ANA (2016), a elaboração do PAE passa por um estudo de inundação constituído pela modelagem da cheia em caso hipotético de ruptura da barragem, tendo como um de seus produtos um mapa ilustrando a mancha de inundação e a identificação de pontos vulneráveis.

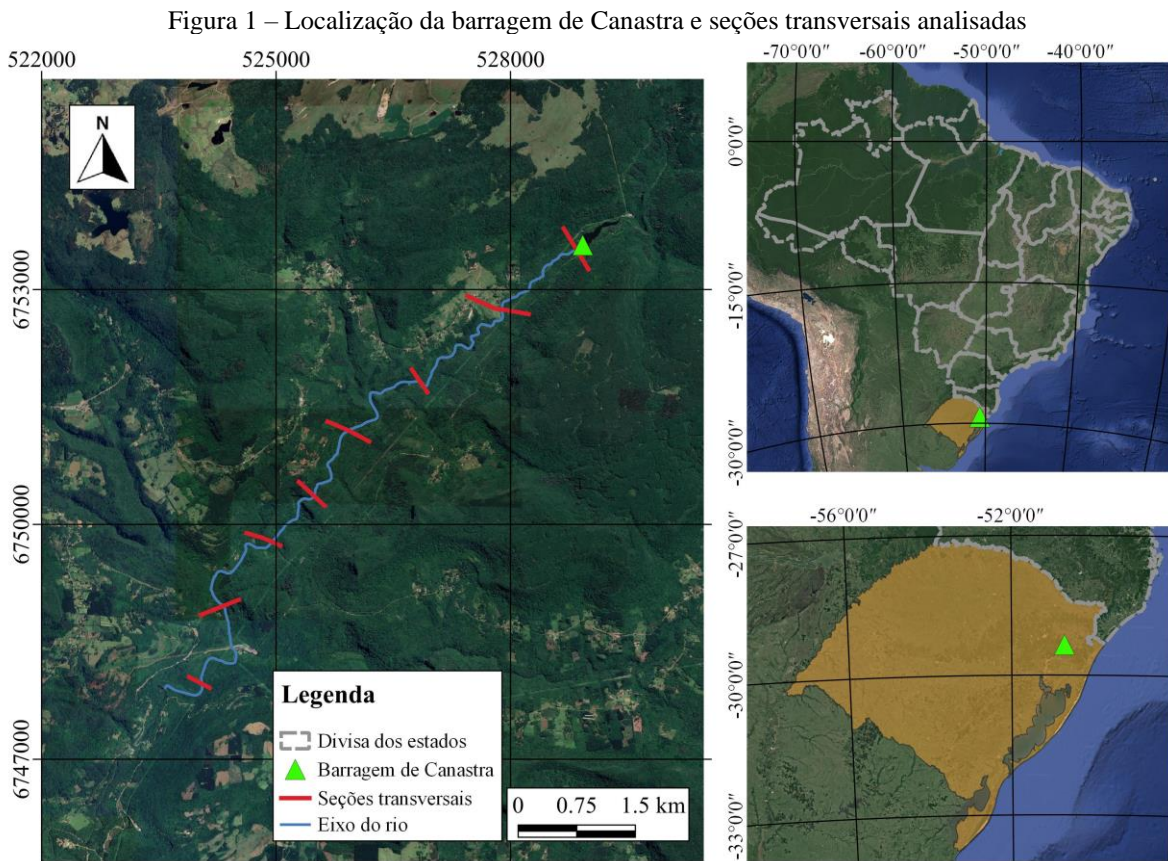
Conforme o Manual (ANA, 2016), duas abordagens distintas podem ser utilizadas para a condução do estudo de inundação, a depender do porte da barragem e das definições estabelecidas pelo agente fiscalizador: a metodologia simplificada (desenvolvida por Melo, 2015), aplicável somente em barragens com maciços menores que 15 m de altura e com reservatórios de volumes menores que 3 hm³; e os modelos hidrodinâmicos, que se valem da aplicação de métodos numérico-computacionais para a resolução discretizada das equações de Saint-Venant. Para a sua execução, os *softwares* de modelagem hidrodinâmica necessitam, como dado de entrada, de informações do terreno através do qual se deseja simular a propagação da onda de cheia, sejam estas informações na forma de seções transversais ou, ainda, na forma de Modelos Digitais de Elevação – MDEs. Não há nas Leis 12.344 (BRASIL, 2010) e 14.066 (BRASIL, 2020) nem no Manual publicado pela ANA (2016) qualquer menção ou recomendação quanto à fonte, ao nível de rigor ou à metodologia de elaboração do MDE a ser utilizado nos estudos de inundação. Sabe-se, entretanto, que existem MDEs globais de acesso livre na *internet*, desenvolvidos por diferentes órgãos a partir de imagens de seus satélites. Há também MDEs elaborados a partir da coleta de dados *in loco* por empresas de topografia

especializadas, para atender a demandas específicas. Quais os impactos de se usar um MDE em detrimento do outro?

Assim, o objetivo deste trabalho é investigar os efeitos da utilização de diferentes modelos digitais de elevação na aplicação de um *software* de modelagem hidrodinâmica para estudos de inundação proveniente da ruptura hipotética de barragens em vales encaixados. Neste sentido, tomou-se como estudo de caso a barragem de Canastra, avaliando-se a propagação das vazões máximas e os tempos de pico (isto é, os tempos associados às vazões máximas) ao longo do vale de jusante, bem como a análise visual da mancha de inundação.

METODOLOGIA

A Barragem de Canastra, no município de Canela – RS, foi escolhida como objeto de estudo do presente trabalho (Figura 1). Com altura $H_B = 26$ m, comprimento da crista $L = 179$ m e volume de reservatório $V_R = 0,425$ hm³, a barragem se encontra no vale do rio Santa Maria, o qual é acentuadamente encaixado e densamente vegetado.



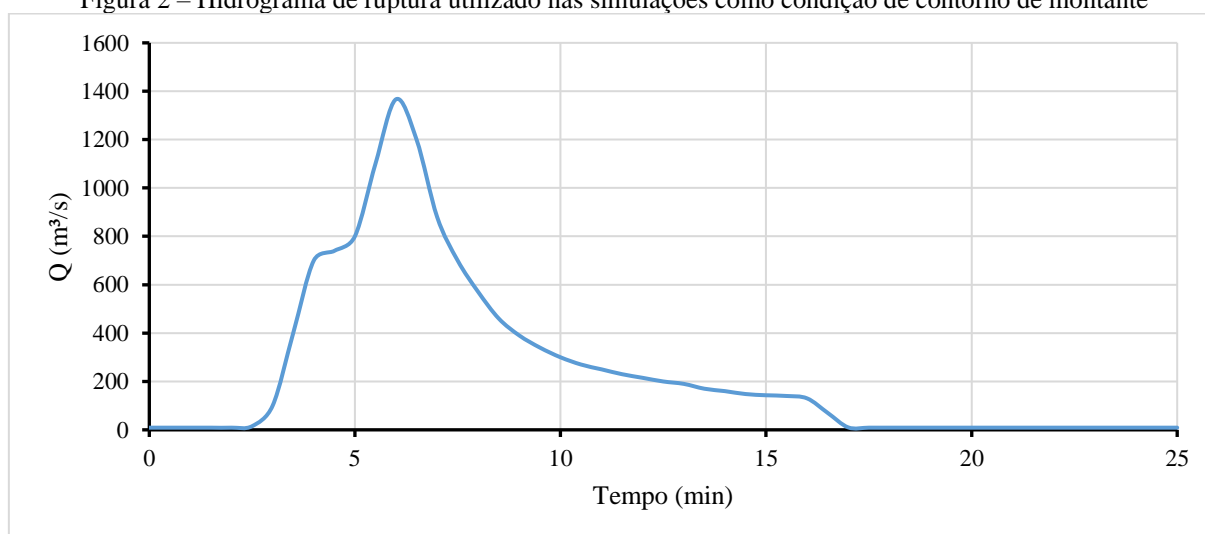
Três Modelos Digitais de Elevação foram utilizados nas simulações. O primeiro deles será aqui chamado de MDE Canastra, e foi desenvolvido por uma empresa de engenharia especificamente para fins de estudos de ruptura nessa barragem, com tamanho de pixel igual a 10 m. Para a sua elaboração, foram combinadas: a base topográfica do Exército Brasileiro, com curvas de nível a cada 20 m; uma base topográfica proveniente de uma restituição aerofotogramétrica com curvas de nível a cada 5 m na região mais próxima à barragem; e oito seções topobatimétricas levantadas em campo. Além do MDE Canastra, outros dois modelos digitais de elevação foram utilizados: o FABDEM (Hawker et

al., 2022) e o NASADEM (NASA, 2020), ambos de abrangência global, livre acesso e resolução espacial de 30 m. O FABDEM deriva do modelo digital de superfície Copernicus GLO-30, no qual foram aplicadas técnicas de *machine-learning* para a remoção dos efeitos de árvores e edificações, visando a representação das elevações do terreno propriamente dito (Hawker et al., 2022). O NASADEM consiste num reprocessamento completo do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) em combinação com dados de outras fontes e procedimentos de tratamento e melhoramento de dados (NASA, 2020). Cabe ressaltar que os modelos digitais de acesso livre não contemplam nenhuma representação de batimetria.

O módulo 2D do *software* de modelagem hidrodinâmica HEC-RAS (versão 6.1), desenvolvido pelo U.S. Army Corps of Engineers, foi utilizado para simular o rompimento da barragem de Canastra, empregando, para isso, os três modelos digitais de elevação supramencionados. Uma vez que a análise do rompimento em cascata foge ao escopo do presente trabalho, definiu-se a extensão longitudinal da simulação como sendo o desenvolvimento do vale compreendido entre a barragem de Canastra e o início do reservatório da barragem imediatamente a jusante, nomeadamente a barragem de Laranjeiras. Tal extensão corresponde, ao longo do caminhamento do rio, a uma distância de aproximadamente 10,3 km. Oito seções transversais, mostradas na Figura 1, foram escolhidas para análise.

Não se pretende, nesta análise comparativa de MDEs, incluir a influência da rugosidade, pelo que se admitiu para esta um valor constante, tendo sido considerado, com base em Melo (2015), o coeficiente de Manning $n = 0,06 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$. Em todo o domínio de simulação, a discretização espacial adotada foi uma malha com células de $10 \times 10 \text{ m}$. O intervalo de tempo computacional foi ajustado tendo como base o número de Courant. Nesse caso, assumiu-se valores mínimos e máximos de Courant de 0,5 e 5, respectivamente, perfazendo intervalos de tempo entre 1,88 s e 120 s. De todo modo, ao longo da quase totalidade do tempo de simulação, o intervalo de tempo computacional ajustado pelo programa foi o mínimo (1,88 s) e o número de Courant nunca excedeu o valor de 2,0. Os erros volumétricos ficaram sempre inferiores a 0,09%. O hidrograma de ruptura utilizado como condição de contorno de montante possui tempo de pico igual a 6 minutos, culminando numa vazão máxima de $1.366,57 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 2). Este hidrograma foi elaborado por uma terceirizada da proprietária da barragem e está associado à ruptura do barramento devido a um evento hidrológico extremo, com período de recorrência igual a 10.000 anos. Como condição de contorno de jusante, adotou-se a profundidade normal de escoamento (associada à ocorrência do regime uniforme).

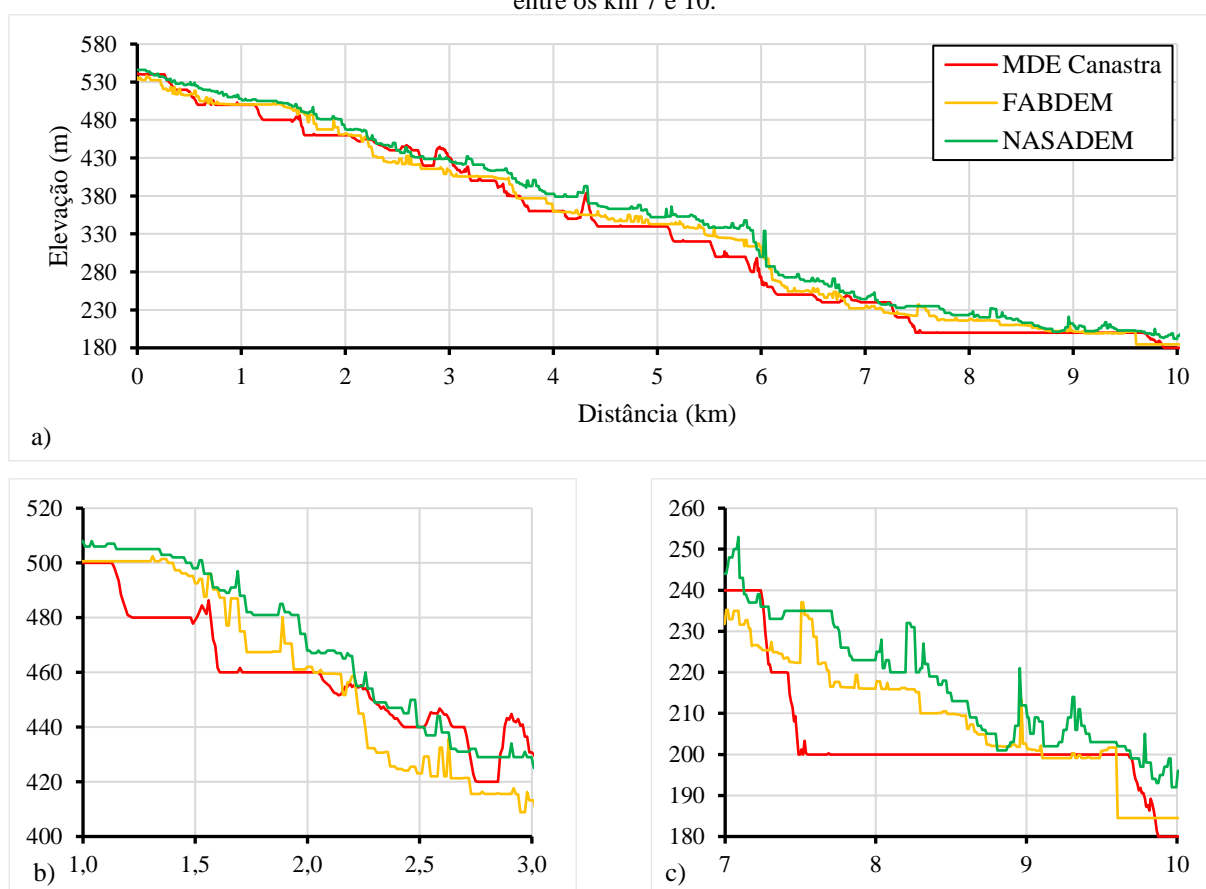
Figura 2 – Hidrograma de ruptura utilizado nas simulações como condição de contorno de montante



RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3a contém a representação dos perfis longitudinais para os três terrenos analisados, extraídos a partir de um mesmo caminho de rio, o qual, por sua vez, foi traçado a partir de uma ortofoto da região. De súbito, percebem-se acentuadas diferenças, principalmente do MDE Canastra em relação aos MDEs livres. O detalhe mostrado na Figura 3b mostra que o MDE Canastra se desenvolve em patamares e em alguns pontos difere até 25 m em altitude com relação aos outros MDEs. Na Figura 3c, percebe-se que a porção mais a jusante do trecho analisado (entre os quilômetros 7,5 e 10), o MDE Canastra se desenvolve praticamente sem declividade, diferentemente dos MDEs livres. Ressalta-se que estes diferentes comportamentos observados nos perfis longitudinais, combinados com outras diferenças perceptíveis na geometria das seções transversais (mostradas mais adiante), podem vir a ocasionar discrepâncias nas grandezas hidráulicas aqui analisadas para as simulações com as três representações do terreno.

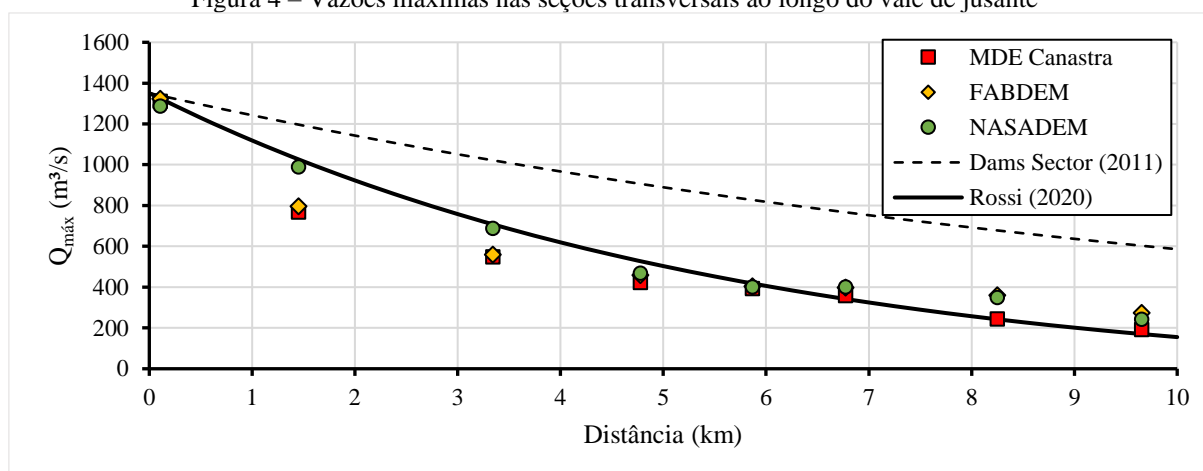
Figura 3 – a) Representação dos perfis longitudinais de cada MDE analisado; b) Detalhe entre os km 1 e 3; c) Detalhe entre os km 7 e 10.



A seguir, são apresentados os resultados das simulações para as 8 seções transversais ao longo do vale a jusante da barragem de Canastra, compreendendo métricas como vazões máximas e tempos de pico. Os resultados foram representados com respeito à distância longitudinal de cada seção transversal tomada a partir da barragem, percorrida através do desenvolvimento do rio.

Na Figura 4, apresenta-se o amortecimento das vazões máximas da onda de cheia para as simulações feitas com cada MDE. Como era esperado, as três simulações culminaram em resultados semelhantes de vazão máxima na primeira seção a jusante da barragem, assumindo valores próximos de $1.300 \text{ m}^3/\text{s}$ ($\pm 1\%$). Ademais, a concordância entre os valores se mantém para as demais seções, culminando em vazões em torno de $240 (\pm 60) \text{ m}^3/\text{s}$ na oitava seção transversal. Tschiedel e Paiva (2017), que conduziram um estudo semelhante, mas utilizando outros MDEs, encontraram diferenças de até $380 \text{ m}^3/\text{s}$ nas vazões máximas em uma seção transversal localizada a 7,2 km da barragem.

Figura 4 – Vazões máximas nas seções transversais ao longo do vale de jusante

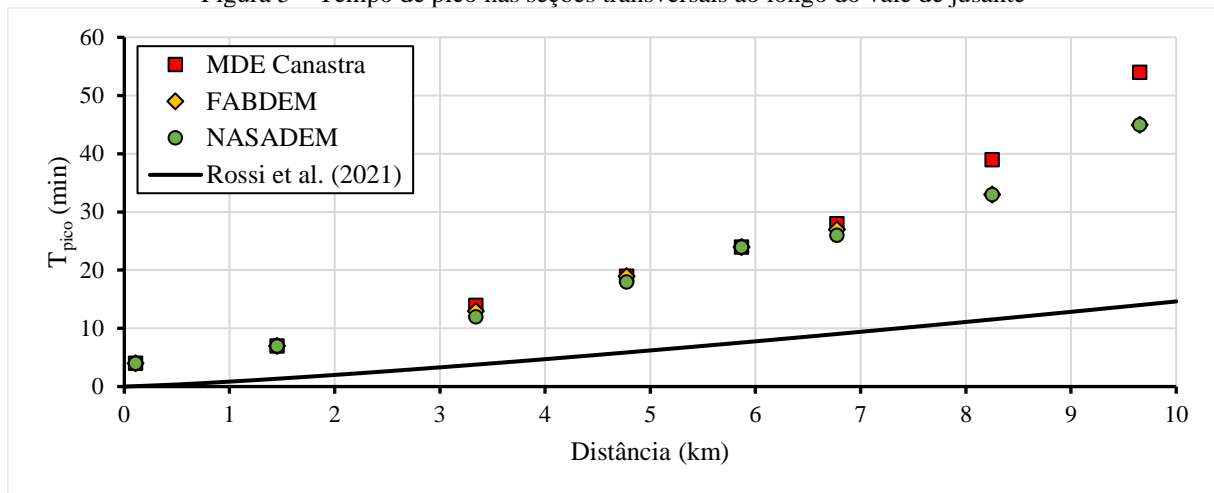


A Figura 4 também mostra o decaimento de vazões: conforme sugestão do Dams Sector (2011), recomendada por Melo (2015) na proposição de seu método simplificado; e conforme a correção da mesma equação, de acordo com uma proposta de Rossi (2020). Verifica-se um amortecimento muito mais acentuado para as vazões extraídas das simulações feitas no HEC-RAS, em comparação com o decaimento de vazão introduzido pelo Dams Sector (2011) e recomendado por Melo (2015), resultando este último em valores da ordem de 3 vezes maiores na porção mais de jusante do terreno analisado. Já para a equação corrigida conforme sugestão de Rossi (2020), o amortecimento de vazões máximas se mostrou adequado. Vislumbra-se que, a partir de um universo maior de simulações abrangendo diferentes faixas de alturas do maciço e volumes de reservatório, bem como, idealmente, de dados provenientes de casos reais de rompimentos, seja possível estabelecer uma nova equação que descreva adequadamente o amortecimento das vazões máximas.

Os tempos de pico são apresentados no gráfico da Figura 5, para os três MDEs e as 8 seções analisadas. Verifica-se uma elevada concordância entre os dados, especialmente entre os tempos de pico dos dois MDEs disponíveis gratuitamente, que resultaram em valores inferiores aos provenientes da simulação com o MDE Canastra, elaborado especificamente para a região em questão. Esse comportamento é consequente não só das características transversais do terreno, mas também da forma como se desenvolvem os perfis longitudinais dos MDEs (mostrados na Figura 3). Principalmente a partir dos 7,5 km, percebe-se uma declividade suave nos MDEs livres, enquanto o MDE Canastra apresenta declividade nula, possivelmente devido ao nível de precisão dos equipamentos e dados utilizados na sua construção. Esta declividade nula pode ser responsável pela criação de um efeito de “remanso” nesta região, ocasionando um atraso no avanço da onda de cheia bem como uma diminuição mais acentuada das vazões máximas (Figura 4), em comparação com as simulações feitas com os outros MDEs.

Frente aos resultados encontrados nas simulações, o ajuste proposto por Rossi et al. (2021) não se mostrou adequado para a estimativa dos tempos de pico, resultando este em tempos até 75% menores que aqueles. Isso se deu possivelmente pelas características peculiares da barragem de Canastra, a qual possui um reservatório de volume muito pequeno ($V_R = 0,425 \text{ hm}^3$) para a sua altura ($H_B = 26 \text{ m}$), bem como pelas premissas adotadas por Rossi et al. (2021), nomeadamente, a derivação do ajuste a partir da propagação de vazões em canais de seção fixa retangular, sem a representação de zonas de represamento encontradas em terrenos reais. A partir de uma compreensão mais genérica do comportamento dos tempos de pico para diferentes MDEs e diferentes características da barragem e do vale de jusante, vislumbra-se ser possível o ajuste de uma ou mais equações para a estimativa do tempo de pico, o que viria a suprir uma carência dos métodos simplificados que, hoje, em sua maioria, são incapazes de estimar de forma realista o tempo necessário para a chegada da onda de cheia em uma dada seção a jusante da barragem.

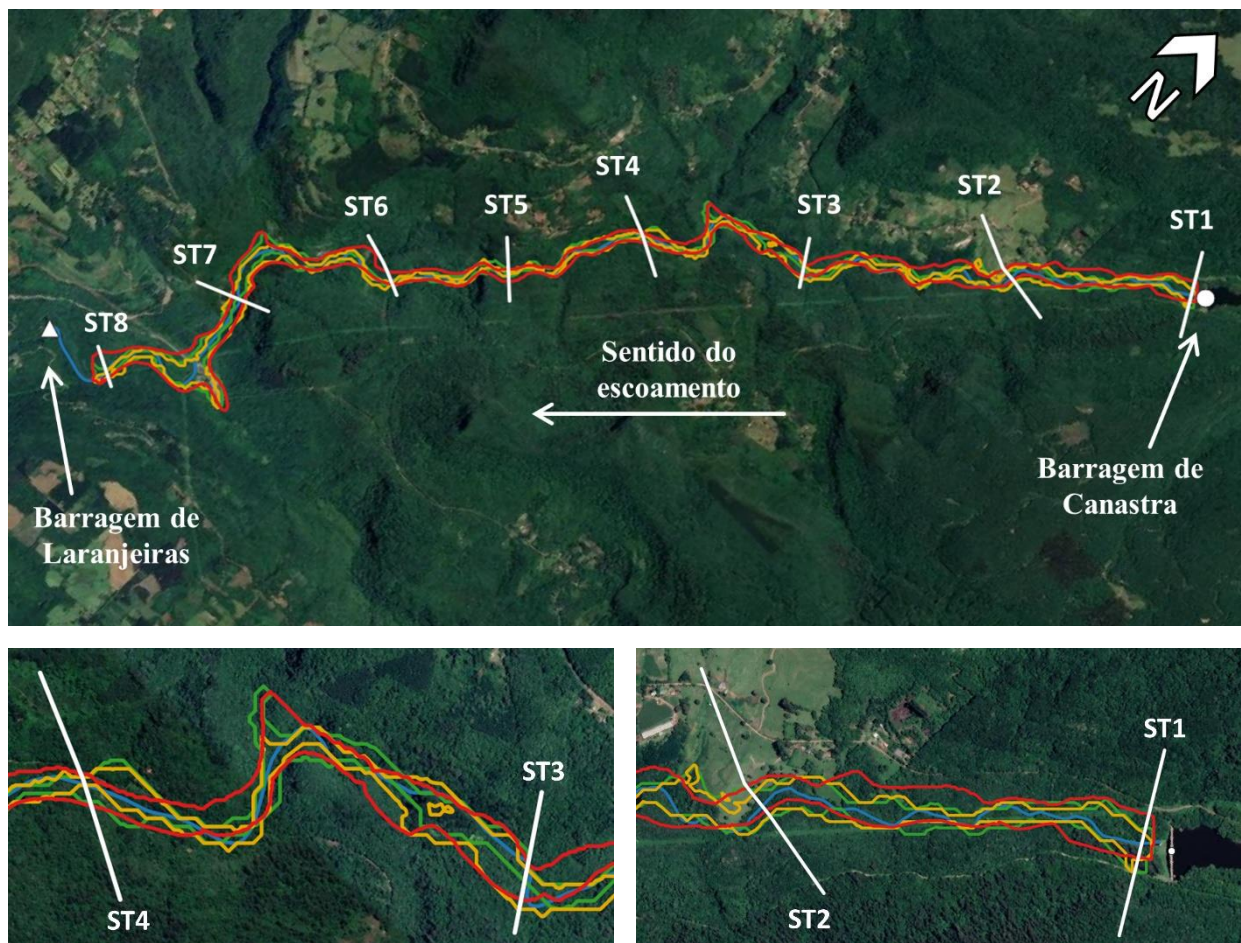
Figura 5 – Tempo de pico nas seções transversais ao longo do vale de jusante

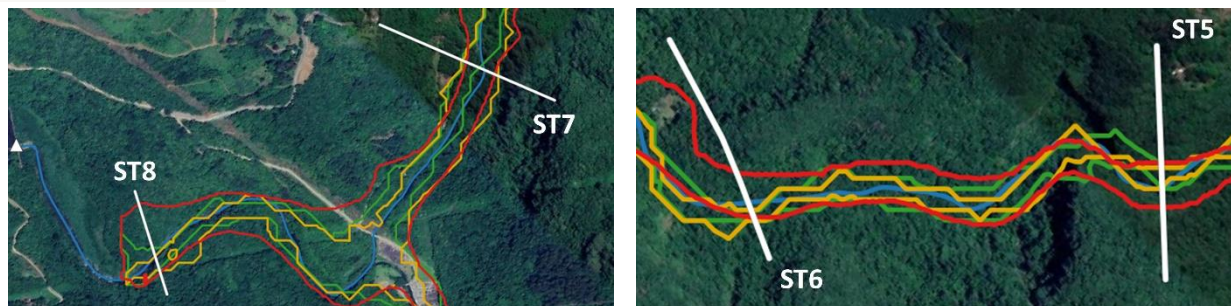


Em contraste com os resultados observados para o tempo de pico, a análise da mancha de inundação (Figura 6) revelou que o uso dos MDEs disponibilizados gratuitamente resultou em valores de área alagada total contra a segurança, isto é, menores que a área inundada obtida com o uso do MDE Canastra. Enquanto o uso do MDE Canastra resultou numa mancha com área alagada igual a 0,87 km², o FABDEM e o NASADEM resultaram em manchas com 0,54 km² e 0,60 km², respectivamente.

Figura 6 – Manchas de inundação (vista geral e detalhes) para os três MDEs e posição das seções transversais.

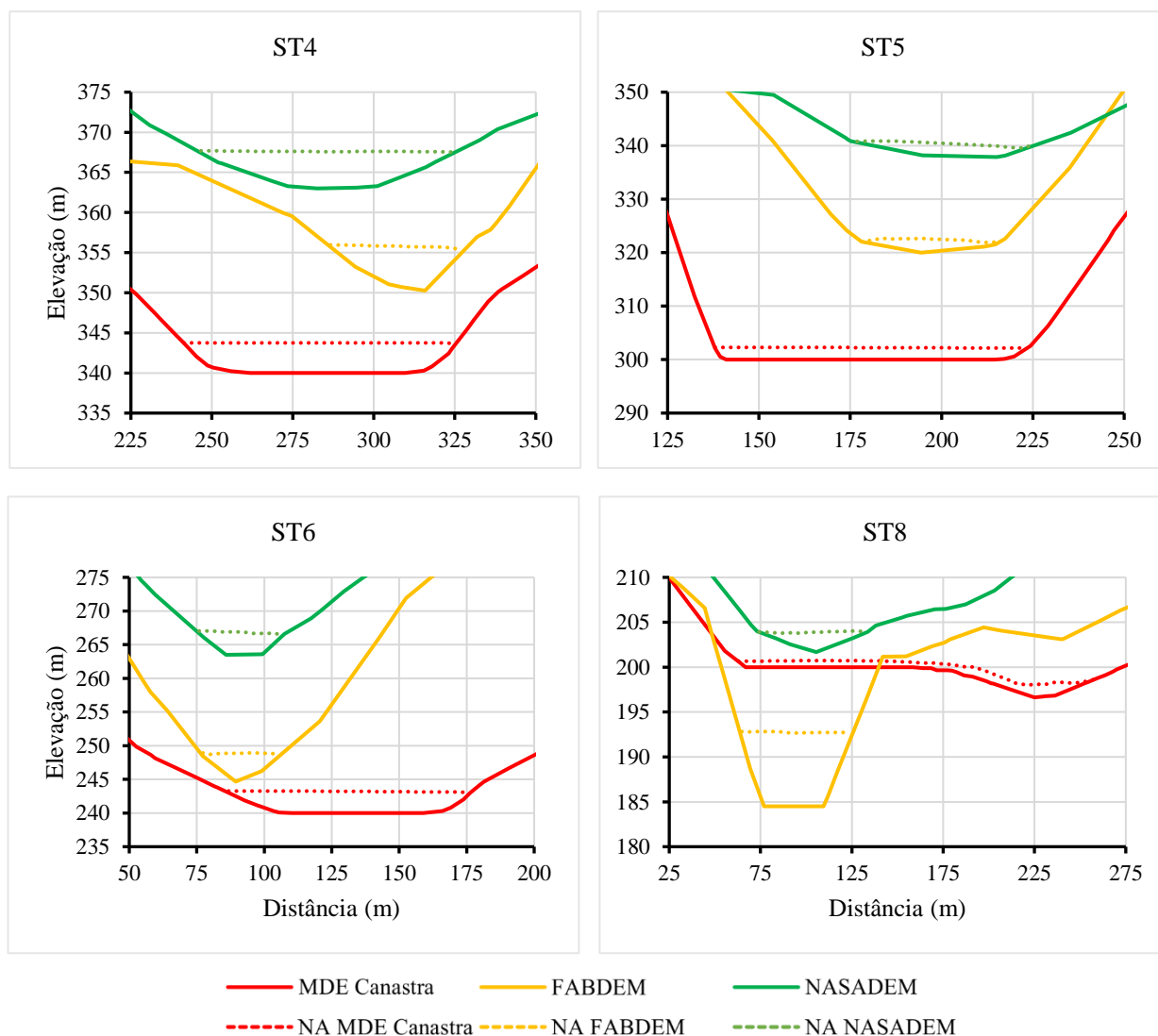
— MDE Canastra; — FABDEM; — NASADEM; — eixo do rio.





A visualização dos cortes transversais dos terrenos, associados aos níveis d'água máximos atingidos, auxilia na explicação desse comportamento. A Figura 7 mostra quatro seções transversais ao longo do vale de jusante para as quais o fundo do MDE Canastra é mais largo que o fundo dos modelos de elevação livres, o que implica, por conseguinte, em manchas mais abrangentes nessas regiões. Ferla et al. (2022) conduziram um estudo semelhante, porém para a barragem João Amado, também no Rio Grande do Sul, e com vale de jusante menos encaixado. Os autores verificaram que as manchas mais largas eram aquelas associadas ao uso dos modelos livres FABDEM e NASADEM. O contraste verificado entre aquele estudo e este leva a crer que cada situação deve ser avaliada individualmente, e mais estudos são necessários para se chegar a uma conclusão generalizada.

Figura 7 – Seções transversais e níveis d'água extraídos do HEC-RAS.



Outra diferença possível de se observar entre as três manchas (Figura 6) é que aquelas associadas aos MDEs livres apresentam uma conformação mais irregular e grosseira, de aspecto poligonal, enquanto a mancha proveniente do MDE Canastra apresenta um contorno mais suave e contínuo, conforme mostram os detalhes da Figura 6. Isso se deve à resolução da quadrícula dos MDEs livres. Apesar das diferenças observadas, entretanto, visualmente, as três manchas se desenvolvem muito semelhantemente, apesar de diferenças locais mais ou menos acentuadas. Ressalta-se, entretanto, que esta semelhança nas manchas pode advir de uma possível semelhança fortuita no desenvolvimento dos próprios MDEs utilizados nesta região.

CONCLUSÃO

A partir do uso de três modelos digitais de elevação, foram conduzidas simulações de rompimento da Barragem de Canastra (Canela – RS) com o módulo 2D do *software* HEC-RAS. Foram comparados os resultados de vazões máximas, tempos de pico e características associadas às manchas de inundação.

As análises aqui conduzidas permitem delinear as seguintes conclusões:

- 1) Os Modelos Digitais de Elevação livres utilizados (NASADEM e FABDEM), de resolução espacial igual a 30 m, culminaram em resultados muito semelhantes àqueles obtidos com o uso do MDE elaborado a partir de dados de campo, em termos de vazões máximas e do aspecto (em planta) das manchas de inundação, para o estudo de caso em questão (vale de jusante bem encaixado);
- 2) Para os tempos de pico, os resultados provenientes das simulações com os MDEs livres se mostraram a favor da segurança (ou seja, inferiores) em relação à simulação com o MDE elaborado a partir de dados de campo. Enquanto isso, na análise da área total inundada, observou-se o contrário, isto é, que as manchas de inundação associadas aos MDEs livres se mostraram menores que a mancha associada ao MDE Canastra. Estes comportamentos estão associados às diferenças observadas entre os MDEs, nomeadamente, fundos mais estreitos ou mais largos e a representação ou não das declividades suaves;
- 3) A condução de mais estudos semelhantes, considerando barragens e vales de jusante com diferentes características, bem como valendo-se de outros modelos digitais de elevação, são importantes para que se possa estabelecer conclusões mais abrangentes com respeito aos critérios estudados. Tais estudos podem também vir a trazer melhorias para as metodologias simplificadas, por meio da proposição de novos ajustes para o amortecimento das vazões máximas e novas equações para a estimativa do tempo de pico;
- 4) Recomenda-se que trabalhos futuros, desenvolvidos a partir de um universo maior de estudos de caso, venham a definir um ou mais critérios para a adoção de um MDE em detrimento de outro, com base nas suas resoluções espaciais ou mesmo nas metodologias utilizadas na sua elaboração.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CEEE-G pelo financiamento da pesquisa e pelo fornecimento do MDE Canastra, bem como ao IPH/UFRGS, ao CNPq e à CAPES pelo apoio.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA (2016). “*Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens: Guia de Orientação e Formulários do Plano de Ação de Emergência (Volume IV)*”. Brasília: ANA.
- BRASIL (2010). Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 21 jan. 2010.
- BRASIL (2020). Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 01 out. 2020.
- DAMS SECTOR. (2011). “*Estimating Loss of Life for Dam Failure Scenarios*”. United States Department of Homeland Security, 94 p.
- FERLA, R.; STEINKE JR., R.; BRUNE, T. C.; KIPPER, P. M.; TEIXEIRA, E. D.; DAI PRÁ, M.; ENDRES, L. A. M.; SANAGIOTTO, D. G.; MARQUES, M. G.; SMIDERLE, C. S. D. (2022). “*Uso de diferentes topografias na propagação de hidrograma associado à ruptura hipotética de barragem*” in Anais do XXX Congresso Latino-americano de Hidráulica, Foz do Iguaçu, nov. 2022, 2 p.
- 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(024016). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>
- MELO, J. F. (2015). “*Dam-break flood risk assessment*” in Anais do Second International Dam World Conference, Lisboa, Abr. 2015, pp. 47-64.
- NASA (2020). “*NASADEM: Creating a New NASA Digital Elevation Model and Associated Products*”. NASA's Jet Propulsion Laboratory. Disponível em: <https://go.nasa.gov/3wwfHEt>. Acesso em abr/2023.
- ROSSI, C. L. C. U.; MARQUES, M. G., TEIXEIRA, E. D., MELO, J. F., FERLA, R., DAI PRÁ, M. (2021). “*Dam-Break analysis: proposal of a simplified approach*”. *Brazilian Journal of Water Resources* 26(e02), pp. 1-15. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.262120200066>
- ROSSI, C. L. C. U. (2020). “*Proposta de abordagem simplificada para avaliação dos efeitos oriundos da ruptura de barragens*”. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS.
- TSCHIEDEL, A. F.; PAIVA, R. C. D. “*Uncertainty assessment in hydrodynamic modeling of floods generated by dam break*”. *Brazilian Journal of Water Resources* 23(e30), pp. 1-17. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.231820170074>