

AVALIAÇÃO DO USO DO SRTM NA SIMULAÇÃO DE ROMPIMENTO DE BARRAGENS

Sergio Ricardo Toledo Salgado^{1} & Wagner Fernando Silva² & Josimar Alves de Oliveira³ & Marcus Vinícius Araújo Mello de Oliveira⁴ & Frederico M. B. de Oliveira⁵ & Helber Nazareno de Lima Viana⁶ & Othon Fialho de Oliveira⁷ & Raimundo Quezado Fernandes⁸*

Resumo – A Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) definiu que os órgãos fiscalizadores devem classificar as barragens quanto a categoria de risco e por dano potencial associado (DPA) e volume, com base em critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). A classificação do DPA considera o potencial de perdas de vidas humanas e os impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura da barragem. Apenas 13% das barragens cadastradas estão classificadas quanto ao DPA no Brasil. Os modelos como o HEC-RAS que simulam propagação de hidrograma do rompimento de barragem são uma importante ferramenta nesse processo. No entanto, o uso de modelos depende da disponibilidade e qualidade do dado de entrada. A representação do relevo a jusante da barragem é um dos principais dados para simulação, porém em muitos casos não há disponibilidade desses dados. Uma opção para essa questão seria utilizar o modelo digital de superfície (MDS), o SRTM 1 Arc-Second Global. Dessa forma, foram propostos três cenários para a simulação de rompimento de uma barragem, que permitiram avaliar os resultados com dados de topografia e os resultados com os dados do SRTM.

Palavras-Chave – ruptura de barragens, propagação de ondas e mapas de inundação

EVALUATION OF THE USE OF SRTM IN THE DAMBREAK SIMULATION

Abstract – The National Dams Security Policy (NDSP) defined that the supervisory agency must classify the dams as to the category of risk and hazard potential association (HPA) and volume, based on general criteria established by the National Water Resources Council (NWRC). The HPA classification considers potential for loss of human life and economic, social and environmental impacts resulting from the rupture of the dam. Only 13% of the registered dams are classified as HPA in Brazil. Models such as the HEC-RAS that simulate hydrological dam breach propagation are an important tool in this process. However, the use of models depends on the availability and quality of the input data. The representation of the relief downstream of the dam is one of the main data for simulation, but in many cases, there is no availability of this data. One option for this issue would be to use digital surface model (DSM), the SRTM 1 Arc-Second Global. Therefore, three scenarios were proposed for the simulation of dam break to evaluate the results using topography data and the results with SRTM data.

Keywords – dam break, wave propagation, inundation map

¹ Agência Nacional de Águas:sergio.salgado@ana.gov.br

² Agência Nacional de Águas:wagner.silva@ana.gov.br

³ Agência Nacional de Águas:josimar.oliveira@ana.gov.br

⁴ Agência Nacional de Águas:marcus.oliveira@ana.gov.br

⁵ Agência Nacional de Águas:frederico.oliveira@ana.gov.br

⁶ Agência Nacional de Águas:helber.viana@ana.gov.br

⁷ Agência Nacional de Águas:Othon.oliveira @ana.gov.br

⁸ Agência Nacional de Águas:raimundo.fernandes@ana.gov.br

INTRODUÇÃO

A Lei 12.334, de 20 de setembro de 2010, estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), definiu os órgãos fiscalizadores de barragem e definiu as diversas obrigações relativas a essa atividade.

O citado normativo estabeleceu, em seu Art. 7º, que as barragens devem ser classificadas pelos agentes fiscalizadores por categoria de risco e por dano potencial associado e pelo seu volume, com base em critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). Esses critérios foram estabelecidos por meio da sua Resolução nº 143, de 10 de julho de 2012.

A classificação de dano potencial associado (DPA) deve ser feita em função do potencial de perdas de vidas humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura da barragem. Portanto, para essa classificação é necessário a identificação da população, infraestrutura e áreas de interesse que podem ser afetadas por um possível incidente com barragem.

A classificação do DPA tem forte impacto nas obrigações dos proprietários da barragem, sendo uma delas a elaboração do Plano de Ação de Emergência (PAE). No entanto, somente 13% das barragens cadastradas no Brasil possuem classificação quanto ao DPA e que para 93,70% das barragens cadastradas não há informação quanto a existência de PAE conforme apresentado no Relatório de Segurança de Barragens de 2015 (ANA, 2015).

Para realizar a classificação do DPA pode-se fazer uso de modelos matemáticos que produzem mapas de inundação provocado por um rompimento de barragem e que delimitam a área afetada em análise.

Os modelos matemáticos são uma importante ferramenta, porém sua utilização pode ser limitada devido disponibilidade dos dados de entrada. Em muitos casos, principalmente pequenos barramentos, não estão disponíveis informação sobre o barramento, reservatório e principalmente informações da topografia do talvegue a jusante das barragens.

A geometria do talvegue a jusante pode ser obtida por trabalhos de campo de topografia ou com o uso de Modelo de Digital de Terreno (MDT), ambos os casos demandariam grande custo por parte do órgão fiscalizador, que por determinação da PNSB deve realizar de classificação de todas as barragens por ele fiscalizado.

Encontra-se disponível, gratuitamente, para todo o globo terrestre os produtos adquiridos pela missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) no ano de 2000. Um desses produtos é o SRTM 1 *Arc-Second Global*, que é um Modelo Digital de Superfície (MDS) com 30 metros de resolução espacial.

O SRTM, devido sua acuraria, pode não representar adequadamente o terreno da área a jusante da barragem. O que pode influenciar nos resultados das simulações hidráulicas e conseqüentemente na geração dos mapas de inundação

Diante dessa questão, foi proposto realizar a simulação de rompimento com dados de levantamento topográfico e com dados proveniente do SRTM com intuito de comparar os resultados gerados e verificar a viabilidade de utilizar o SRTM 1 *Arc-Second Global* na elaboração de mapas de inundação.

METODOLOGIA

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A barragem, identificada pelo código 85, foi construída com a finalidade de reservação de água para irrigação e encontra-se localizada em área agrícola do município de Cristalina no estado de Goiás, figura 1. Trata-se de um barramento construído em terra com altura de 14,9 metros e o reservatório possui o volume de 3,03 hm³.

LEVANTAMENTO DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS

No ano de 2016 foi realizado o levantamento topográfico de seções transversais com comprimento de 700 metros na área de estudo. Para esse trabalho foi utilizado 13 seções transversais, o que totaliza o levantamento de 444 pontos com informação de cota altimétrica.

Para essas mesmas seções foi extraído o valor de cota altimétrica do SRTM 1 *Arc-Second Global*. Esse MDS possui 30 metros de resolução espacial com acurácia absoluta vertical de cerca de 6 metros e planimétrico próximo de 15 metros, utilizando um nível de confiança de 90%, de acordo com a *National Map Accuracy Standard (NMAS)* (FARR ET AL., 2007).

A localização das seções e o espaçamento foram definidas considerando o tamanho das barragens, o espelho d'água e a largura do rio à jusante. No total foram levantados tem-se aproximadamente 11,5 km de trecho de rio a jusante, conforme apresentado na figura 1.



Figura 1 – Localização da barragem (COD 85) e das seções transversais

MODELAGEM DE PROPAGAÇÃO DE CHEIA

Para a modelagem de propagação de cheia, optou-se pelo modelo HEC-RAS 5.0.3. O HEC-RAS é um software desenvolvido pelo Corpo de Engenharia do Exército Norte Americano (USACE) para a realização de estudos de escoamento em rios e canais.

O Software permite estudos de escoamento em regime permanente, não permanente, análise de sedimentos e análise de qualidade da água. Dentre suas aplicações, o HEC-RAS pode ser utilizados em análises e estudos de rompimento de barragens USACE(2014).

As simulações de rompimento de barragem foram realizadas considerando 3 cenários. O cenário 1 foi realizado simulação utilizando as seções transversais com dados do levantamento topográfico e os cenários 2 e 3 foram realizados com as seções transversais com as cotas extraídos do SRTM.

Para permitir a comparação entre o resultado dos cenários foi adotada as mesmas condições de simulação em todos os cenários, como por exemplo, mesmo volume inicial do reservatório, mesmo coeficiente de rugosidade, mesmo tempo de simulação, mesmos parâmetros da brecha entre outros.

Com a simulação no HEC-RAS foram obtidos as vazões e o nível da água nas seções transversais, com esses resultados foi realizado a comparação entre os cenários propostos nesse estudo.

Critérios para Formação da Brecha

Para determinar a formação da brecha, optou-se por utilizar equações de regressão paramétrica, trata-se de equações que foram desenvolvidas, empiricamente, com a utilização de informações de estudo de caso para estimar o tempo de formação e a geometria da brecha na barragem (FEMA, 2013). Uma das principais vantagens para o uso dessas equações é a possibilidade de ter controle sobre os parâmetros de formação da brecha WAHL (2010).

Optou-se por utilizar as equações do autor Froehlich (1995). O autor utilizou dados históricos de rompimento de 63 barragens de terra e enrocamento para desenvolver um conjunto de equações para estimar a largura da brecha e o tempo de formação da brecha. As equações de regressão são apresentadas a seguir:

$$T_f = 0.00254 \times (V_w^{0.53}) \times h_b^{-0.90} \quad (1)$$

$$B_{avg} = 0.1803 \times k_0 \times (V_w^{0.32}) \times h_b^{0.19} \quad (2)$$

Onde :

H_b – Altura final da brecha (m)

T_f – tempo de formação brecha (h)

V_w – Volume do reservatório no momento da ruptura (m³)

B_{avg} – Largura média da brecha (m)

K_0 = constante (1.4 para galgamento, 1.0 para erosão interna).

Coefficientes de Rugosidade

Para o coeficiente de rugosidade foi adotado o valor 0,03 para o leito principal e 0,05 para as margens.

RESULTADOS

Comparativos dos valores das cotas do levantamento Topografia e do SRTM

Em momento anterior a simulação de rompimento, foi realizado uma análise entre os valores de cotas obtidos por levantamento topográfica e os valores de cota obtidos pelo SRTM. Os valores

das cotas obtidas do SRTM encontram-se em média 9,02 metros superiores, sendo a maior diferença 15,98 metros e a menor diferença 4,05 metros, considerando como referência os valores de topografia.

Essa diferença pode ser visualizada nas figuras 3 e 4, as quais apresentam o perfil de duas seções transversal com os dados de cotas obtidas do levantamento topográfico e dados das cotas obtidas pelo SRTM. Ressalta-se que, em algumas das seções, existe semelhança no perfil da seção transversal, porém os valores das cotas obtidas pelo SRTM sempre foram superiores.

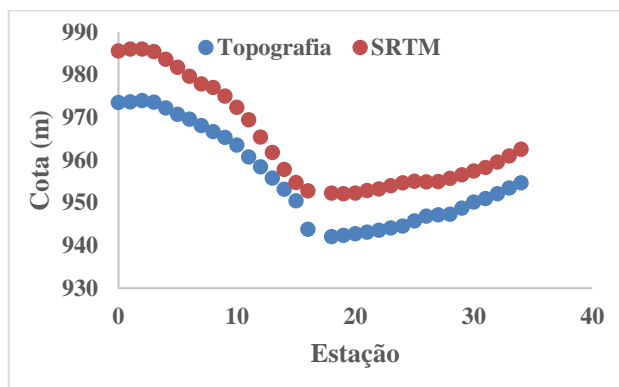


Figura 3 – Perfil da seção 18

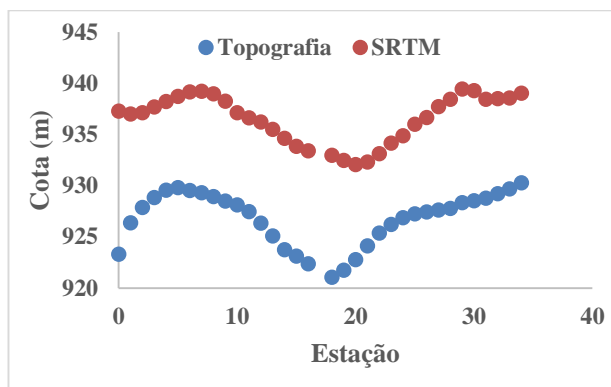


Figura 4 – Perfil da seção 13

Simulação de Rompimento da Barragem

Para o cálculo dos parâmetros da brecha foi utilizado as equações 1 e 2, o resultado pode ser visualizado na tabela 1. Como o galgamento é o modo de falha mais comum para as barragens de terra (ICOLD, 1995), optou-se por adotar o valor de 1.4 para K_0 .

Tabela 1. Parâmetros da brecha na barragem (COD 85)

Parâmetro	Valor	Observação
H_b	13,5 m	Adotado
K_0	1,4	Adotado
T_f	0,66 h	Equação 01
B_{avg}	49,0 m	Equação 02

Apesar da mesma condição de simulação foi observado diferença entre os hidrogramas de ruptura gerado nos cenários 1 e 2, conforme apresentado na Figura 5. Nota-se diferença entre o valor de vazão de pico e o tempo de pico dos hidrogramas, valores apresentados na tabela 2.

A geração de hidrograma de rompimento diferente nos cenários 1 e 2, levou a necessidade da criação um terceiro cenário. Nesse novo cenário, as seções transversais são com as cotas extraídos do SRTM, porém foi adotado como dado de entrada o hidrograma gerado no cenário 1

Como um dos resultados, apresenta-se o hidrograma na última seção de cada cenário, figura 6. Na tabela 3 apresenta-se os valores de vazão de pico, o tempo de simulação e o valor de amortecimento da vazão de pico na última seção para os três cenários

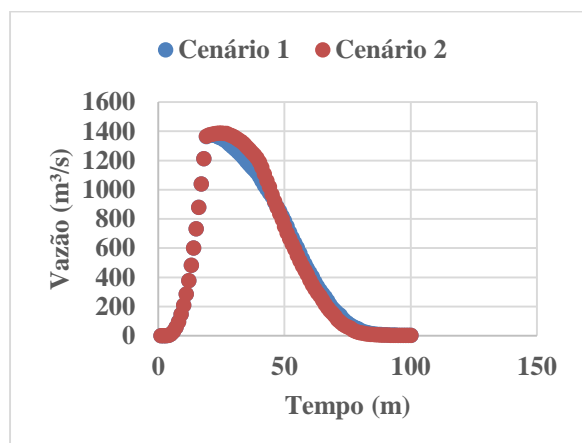


Figura 5 – Hidrogramas de Rompimento

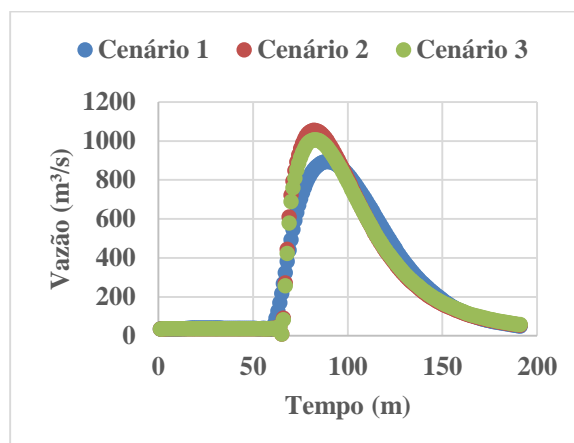


Figura 6 – Hidrogramas propagado na última seção

Tabela 2. Comparativo do pico dos hidrogramas de rompimento

Cenário	Vazão de Pico (m ³ /s)	Tempo de Pico (m)
Cenário 1	1374,82	20
Cenário 2	1387,10	24

Tabela 3. Comparativo dos valores dos hidrogramas da última seção

Cenário	Vazão de Pico (m ³ /s)	Tempo de simulação	Amortecimento
Cenário 1	892,78	1 h 28 m	35,0%
Cenário 2	1053,38	1 h 21 m	24,0%
Cenário 3	1006,84	1 h 21 m	26,7%

Na comparação entre o cenário 1 e o cenário 2 nota-se diferença no hidrograma da última seção, como por exemplo o momento da chegada da onda do rompimento da barragem, valor da vazão de pico e o tempo em que ocorre o pico.

Essas divergências têm relação com o diferente hidrograma gerado no rompimento da barragem e o amortecimento da onda de cheia ao longo do canal influenciado pelas diferenças das seções transversais utilizadas nos dois cenários

Entre o cenário 1 e o cenário 3 verifica-se diferença no hidrograma da última seção similar ao cenário 2, apesar de se utilizar o mesmo hidrograma de rompimento. O que demonstra que as características das seções transversais influenciaram na propagação do mesmo hidrograma de rompimento ao longo do rio.

Quanto aos cenários 2 e 3, verifica-se que o hidrograma da última seção possui a mesma forma, sendo observado o mesmo tempo da chegada da onda do rompimento da barragem e tempo em que ocorre a maior vazão pico. A vazão de pico menor no cenário 3, pode ser explicada pela diferença do hidrograma de rompimento simulado nesse cenário, sendo que a vazão de pico do rompimento no cenário 2 é maior do que a do cenário 3.

Com propagação do hidrograma de rompimento foi calculado o valor do nível da água máximo em cada seção transversal, esses valores estão apresentados na Tabela 4. Quando se compara os valores obtidos no cenário 1 com os valores dos cenários 2 e 3, verifica-se a diferença média de 1,55

m. No caso do cenário 2 e cenário 3, verifica-se que praticamente não há diferença entre os valores do nível da água máximo nas seções, sendo que o valor da diferença média foi de 0,07 m.

Tabela 4. Comparativo dos valores do nível de água nas seções

Cenário	Seção Transversal												
	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6
1	3,67	3,96	3,66	6,58	4,02	4,00	7,57	7,34	3,81	6,34	3,43	5,51	3,72
2	3,64	3,38	3,71	3,86	3,4	4,69	3,61	4,03	3,93	3,09	4,45	2,89	4,9
3	3,60	3,34	3,66	3,8	3,37	4,58	3,64	3,93	3,84	3,01	4,37	2,83	4,8

Mapas de Inundação

As diferenças entre o terreno e o SRTM tiveram influência nos resultados da simulação e na geração mapas de inundação, apresentados de forma comparativa na figura 7. Sendo possível constatar que o mapa gerado com o uso do SRTM apresenta pontos de descontinuidade, conforme visualizados na figura 8.



Figura 7 – Mapas de Inundação



Figura 8 – Detalhe dos Mapas de Inundação

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para esse estudo foi proposto 3 cenários de simulação. Por utilizar dados de levantamento topográfico, tomou-se os resultados das simulações do cenário 1 como referência na comparação dos cenários 2 e 3.

A análise apresentou diferenças nos resultados da simulação de rompimento de barragem e no mapa de inundação gerado, essas diferenças têm influência, principalmente, devido as seções transversais levantadas em campo e das seções extraídas do SRTM. Essa diferença entre as seções se justifica devido a acurácia do SRTM e por se tratar de um MDS, o que significa que é uma representação planialtimétrica da superfície sem a filtragem de vegetação e edificações.

A utilização do SRTM não impossibilita o emprego do modelo HEC-RAS para estudos de rompimento de barragem e conseqüentemente a geração de mapas de inundação. O SRTM *1 Arc-Second Global* está disponível gratuitamente e pode ser uma fonte de dados para estudos preliminares e para auxiliar na atividade de classificação do DPA da barragem

No estágio atual, o SRTM pode suprir a falta de dados do terreno a jusante de barragens e ser utilizado na geração de mapa de inundação para classificação do DPA. Entretanto, todo o resultado deve ser avaliado e revisado pelo profissional antes do seu uso. Ainda, ressalta-se que não se pode excluir a necessidade de utilizar dados de terreno com maior precisão.

Ressalta-se que o seu uso não deve ser estimulado para elaboração de mapas de inundação previsto no PAE, visto que para esses casos deve buscar um nível de acurácia da representação de terreno que permita estabelecer com maior confiabilidade os valores de vazão de pico, velocidade máxima, tempo do hidrograma, cotas atingidas entre outras.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA) (2016). *Relatório de segurança de barragens 2015* / Agência Nacional de Águas. -- Brasília: ANA. 168p.

BRASIL. 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. Brasília, DF, 21 set. 2010. Disponível em: <<https://www.planalto.gov.br/>> Acesso em: 20 de maio de. 2017.

FARR, T. G.; ROSEN, P.A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M. ET AL. 2007. "The Shuttle Radar Topography Mission." *Reviews of Geophysics* 45 (2): RG2004.

FEMA (FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY) (2013). *Federal Guidelines for Inundation Mapping of Flood Risks Associated with Dam Incidents and Failures* Washington, DC: FEMA.

FROEHLICH, DAVID C., (1995), "Embankment Dam Breach Parameters Revisited," *Water Resources Engineering, Proceedings of the 1995 ASCE Conference on Water Resources Engineering*, San Antonio, Texas, August 14-18, 1995, p. 887-891.

INTERNATIONAL COMMISSION OF LARGE DAMS – ICOLD (1995). *Dam Failures. Statistical Analysis. Bulletin 99*. Paris: International Commission of Large Dams. 63p.

U. S, Army Corps of Engineers (USACE) (2014). *Using HEC-RAS for Dam Break Studies*. Hydrologic Engineering Center. Training Document-39, August-2014.

WAHL, T.(2010). *Dam Breach Modeling- An Overview of Analysis Methods*. Published in the Joint Federal Interagency Conference on Sedimentation and Hydrologic Modeling, June 27 – July 1, 2010, Las Vegas, NV. Published by Tony L. Wahl, Hydraulic Engineer, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, CO.