

MAPEAMENTO DAS ZONAS DE INUNDAÇÃO ATRAVÉS DE SIMULAÇÕES “DAM BREAK”: ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM DO RIBEIRÃO PIRAÍ, SP

Palavras-Chave: Dam Break, Inundação, Mapeamento

Autores(as):

Erick Palha Braga, FECFAU – UNICAMP

Prof^(a). Dr^(a). André Luís Sotero Salustiano Martim (orientador), FECFAU – UNICAMP

Luis Fernando Murillo Bermúdez, FECFAU – UNICAMP

INTRODUÇÃO:

A Lei Federal nº 12.334, de 2010, estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens, que, por sua vez, define as ações de segurança a serem adotadas em todas as fases de planejamento, execução e operação da barragem (BRASIL, 2010). Embora exista essa regulamentação voltada para a segurança das barragens, acidentes envolvendo rompimento de barragens têm ganhado cada vez mais destaque nos últimos anos, principalmente devido aos ocorridos nas cidades mineiras de Mariana e Brumadinho, em 2015 e em 2019, respectivamente. Surge, então, uma necessidade de estudos mais aprofundados acerca da segurança das barragens e alternativas de mitigação de riscos associados a essas estruturas. Um dos instrumentos que possibilita a avaliação prévia dos possíveis impactos resultantes de uma ruptura são os estudos de Ruptura Hipotética ou Dam Break (ALMEIDA; SALIBA; TARQUI, 2022). Esses estudos tentam simular a propagação de onda de cheia a partir de rompimentos hipotéticos de barragens, obtendo como resultado áreas propensas a inundações.

O estudo desses rompimentos através de uma simulação computacional se faz de grande importância para auxiliar no planejamento de ações emergenciais e, de certo modo, na prevenção a partir de medidas mitigadoras dos possíveis impactos que poderiam ser causados pelo rompimento de barragens.

Uma das ferramentas de maior utilização para análises Dam Break é o software HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) do Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos (USACE, 2025). Diversos trabalhos apresentaram resultados satisfatórios usando este modelo para avaliação de manchas de inundação, como o trabalho de Al-Salahat, Al-Weshah e Al-Omari (2024), na Jordânia, o trabalho de Eisa (2010), na Etiópia, e o trabalho de Almeida, Saliba e Tarqui (2022), no Brasil.

Neste sentido, o presente trabalho objetiva a identificação das áreas propensas à inundação no caso hipotético do rompimento da futura Barragem do Ribeirão Piraí, localizada nas proximidades do município de Salto – SP, aplicando o modelo hidrodinâmico HEC-RAS. O estudo realizado é relevante devido ao fato de que, ainda que haja um estudo de Dam Break no projeto executivo da Barragem, este é limitado a análises unidimensionais, enquanto a simulação no HEC-RAS permite uma análise bidimensional.

METODOLOGIA:

Área de estudo:

A barragem, que está em fase de construção, se localiza cerca de 2 quilômetros a montante da confluência entre o ribeirão Pirai e o rio Jundiáí, corpos hídricos de extrema importância para a população, visto que abastecem vários municípios da região (PROFILL, 2021). Esse rio, segundo o Plano Diretor de Macrodrenagem da Bacia Hidrográfica do rio Jundiáí, tem aproximadamente 123 quilômetros de extensão, tendo como principais afluentes o rio Jundiáí-Mirim e o ribeirão Pirai, desaguando no rio Tietê, ainda no município de Salto-SP. A onda de cheia que seria gerada com a ocorrência de um rompimento na Barragem do Pirai se propagaria para o rio Jundiáí, elevando o nível de suas águas, o que poderia acarretar um transbordamento. Isso causaria problemas significativos para a população residente em áreas adjacentes ao rio, podendo até mesmo causar perda de vidas humanas, além de grandes impactos econômicos e ambientais.

Vale também ressaltar que as áreas a montante da confluência entre o ribeirão Pirai e o rio Jundiáí também seriam afetadas, após certo tempo, devido à formação de um remanso hidráulico. A ocorrência desse remanso se dá com sua propagação para montante, a partir da região a jusante atingida diretamente pela onda de cheia (que, por sua vez, segue o sentido do escoamento, de montante para jusante).

Modelo computacional HEC-RAS:

O software escolhido para a simulação do rompimento da Barragem do Pirai foi o HEC-RAS, na versão 6.6. Seu funcionamento se dá a partir de variados sistemas de equações que podem ser escolhidos pelo usuário, sendo eles, de maneira geral, baseados nas equações de Saint-Venant (também conhecidas por “Shallow Water Equations”, em português “Equações de Águas Rasas”, ou ainda pela sigla “SWE”). As equações de Saint-Venant modelam o fluxo não-estacionário de um fluido newtoniano incompressível em canais abertos. Estas, são dadas pela equação da conservação da massa e do balanço do momento linear, e podem ser vistas como uma média das equações de Navier-Stokes sobre a hipótese de que a escala de comprimento vertical do fluido é muito menor do que a escala de comprimento horizontal (JUNIOR, 2022).

Para uso desse software, primeiramente foi necessário inserir um arquivo de projeção (extensão .prj), definindo um sistema de coordenadas, que, nesse caso, corresponde à Zona UTM 23S. Em seguida, foi necessário fornecer um Modelo Digital de Terreno (MDT, de extensão .tif) como dados de relevo, que é imprescindível para a precisão da simulação do escoamento. Foi escolhido um MDT com resolução espacial de 1 metro, projeção UTM e Datum SIRGAS 2000 Zona 23S, obtido do estudo de macrodrenagem do rio Jundiáí (PROFILL, 2021). Imagens de satélite do Google foram adicionadas para melhor localização dos elementos (rios, barragens, regiões ocupadas, estradas etc.). A Figura 2 mostra parte do MDT sobreposto à imagem de satélite, na ferramenta RAS Mapper do software.

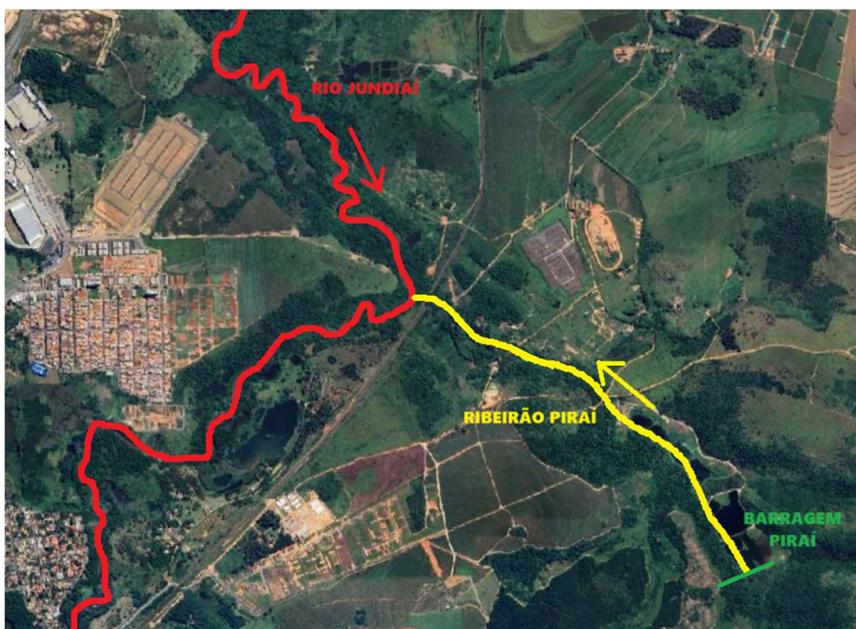


Figura 1 -Localização da Barragem Pirai e da Confluência entre o rio Jundiáí e o ribeirão Pirai; as setas indicam o sentido do fluxo.

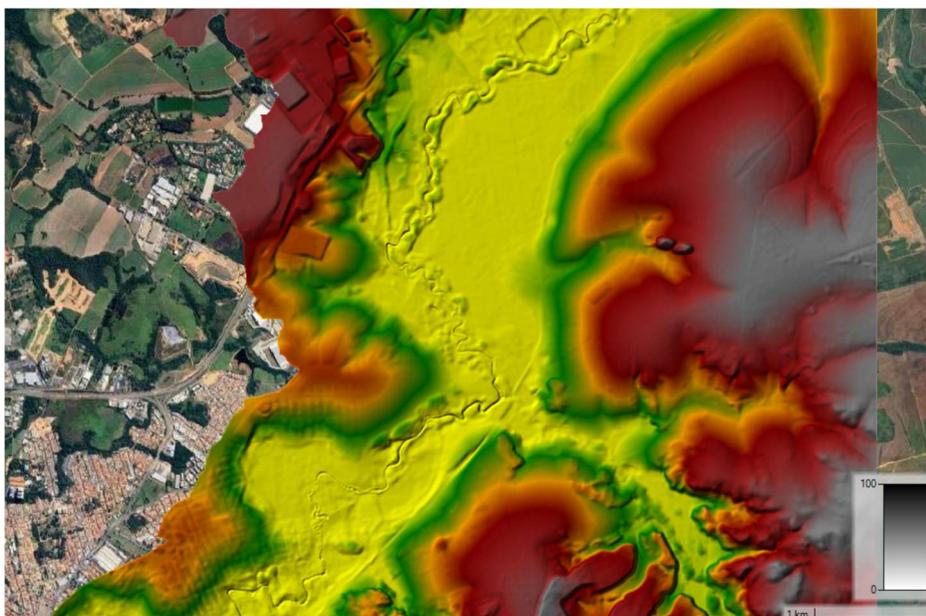


Figura 2 - Modelo Digital de Terreno sobreposto à imagem de satélite, na ferramenta RAS Mapper do software HEC-RAS.

Posteriormente, foi construído o arquivo de geometria, composto pelas áreas de escoamento 2D, o elemento de conexão entre essas áreas (no caso, a Barragem do Pirai) e as linhas de condição de contorno (que depois receberam as características de condição de contorno).



Figura 3 - Localização dos elementos de geometria do projeto (em azul, as linhas de condição de contorno; em vermelho, a linha da barragem; quadriculadas, as áreas de simulação 'AreaMontante' e 'AreaJusante')

linha de energia ("friction slope") de 0,0003. Já as vazões de montante da barragem foram obtidas de um hidrograma de projeto, para TR 10000 anos, encontrado no arquivo de estudo de "Dam Break" do Consórcio Intermunicipal do Ribeirão Pirai (CONIRPI, 2015). Esse hidrograma de projeto foi transladado no tempo para que, na simulação, a calha do Rio Jundiá já estivesse cheia no momento da ocorrência da ruptura, o que configura um cenário mais desfavorável. Todos os dados de vazões têm frequência horária, abrangendo um período de 100 horas, que será correspondente ao tempo da simulação. A Figura 3 mostra a localização das áreas de simulação 2D e das linhas de condição de contorno, que são elementos do arquivo de geometria do projeto.

A cota da soleira foi definida como sendo 573 m de elevação. Também foram definidos os parâmetros referentes às características do rompimento de acordo com o projeto da barragem (CONIRPI, 2015). O tipo de rompimento selecionado foi por transbordamento e o evento definido como gatilho para o processo de rompimento se iniciar foi a água atingir a cota da soleira da barragem. Posteriormente, foram estabelecidas as dimensões da abertura gerada na barragem, além do tempo total de formação dessa brecha, que foi definido como sendo de 30 minutos (0,5 hora). Foi utilizada uma progressão linear por trechos para a formação da brecha: 80% da brecha formados em metade do tempo total, e os outros 20% da brecha formados no tempo restante. Dessa forma, a ruptura é mais rápida nos momentos iniciais, sendo um cenário mais desfavorável.

Para a simulação, é exigido que o usuário escolha o sistema de equações que será utilizado pelo software no processo. Conforme já comentado, existem no software alguns modelos matemáticos baseados nas equações de Saint-Venant que estão disponíveis para uso nas simulações. Entre as opções, está o sistema de equações Euleriano/Lagrangiano, que foi o selecionado para este estudo, por ser mais adequado para esse tipo de análise de escoamentos em uma região limitada (no caso, as áreas de escoamento 2D). Destaca-se, também, que foi considerado, nas áreas de escoamento 2D definidas, um coeficiente de Manning de 0,06, tido como padrão para o software usado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

A Figura 4 mostra os resultados gerados pela simulação do rompimento da Barragem do Pirai nas áreas a jusante do barramento, no momento em que a onda de cheia atinge seu pico. É possível perceber que grande parte da área inundada está em uma zona não urbanizada do município de Salto-SP, porém também há uma porção de área urbana que é atingida pela onda

de cheia causada pelo rompimento da barragem. Conforme se pode observar na Figura 5, o bairro Jardim das Nações seria atingido pela onda de cheia aproximadamente 1 hora após o evento inicial do rompimento.

No momento em que a cheia atinge seu pico, as manchas de inundação apresentam os maiores valores de área coberta e de profundidade da água. Esse é, na simulação, o que foi chamado de “pico de cheia”. Isso ocorre cerca de 6 horas após o rompimento da barragem. Depois desse tempo, as manchas começam a sofrer uma redução, visto que o escoamento na calha do rio se mantém durante a simulação. Já a região do bairro Jardim Nair Maria, embora seja próxima ao bairro Jardim das Nações, não é atingida pela onda de cheia. Isso se deve ao fato de que essa região tem maiores elevações.

O fato da onda de cheia atingir uma zona urbanizada afetaria diretamente a população local, nos âmbitos social, econômico, e, também, poderiam causar perdas de vidas humanas se não fossem tomadas as providências necessárias para segurança da população.

Há, momentaneamente, a formação de um remanso que se propaga para montante, inclusive a partir do ponto de confluência entre o ribeirão Pirai e o rio Jundiá, no “pico de cheia”. Isso se deve à elevação momentânea do nível das águas devida à passagem da onda de cheia.

Cerca de 24 horas após o rompimento, não há insistência da onda de cheia na região de simulação. Nesse momento, nota-se o escoamento na calha do Rio Jundiá ocorrendo de maneira normal, com a manutenção de sua profundidade.

Uma consideração importante está ligada à disponibilidade de dados e sua precisão, por exemplo, em relação ao Modelo Digital de Terreno. De acordo com Tschiedel (2017), a configuração geomorfológica do vale de jusante afeta diretamente os resultados obtidos na simulação. Além disso, o coeficiente de Manning no vale de inundação e as características de formação da brecha na barragem, entre outros fatores e parâmetros de entrada, também têm grande influência nos resultados. Dessa forma, a simulação está sujeita a imperfeições, apesar de ser capaz de descrever bem uma situação hipotética de rompimento da Barragem do Pirai.

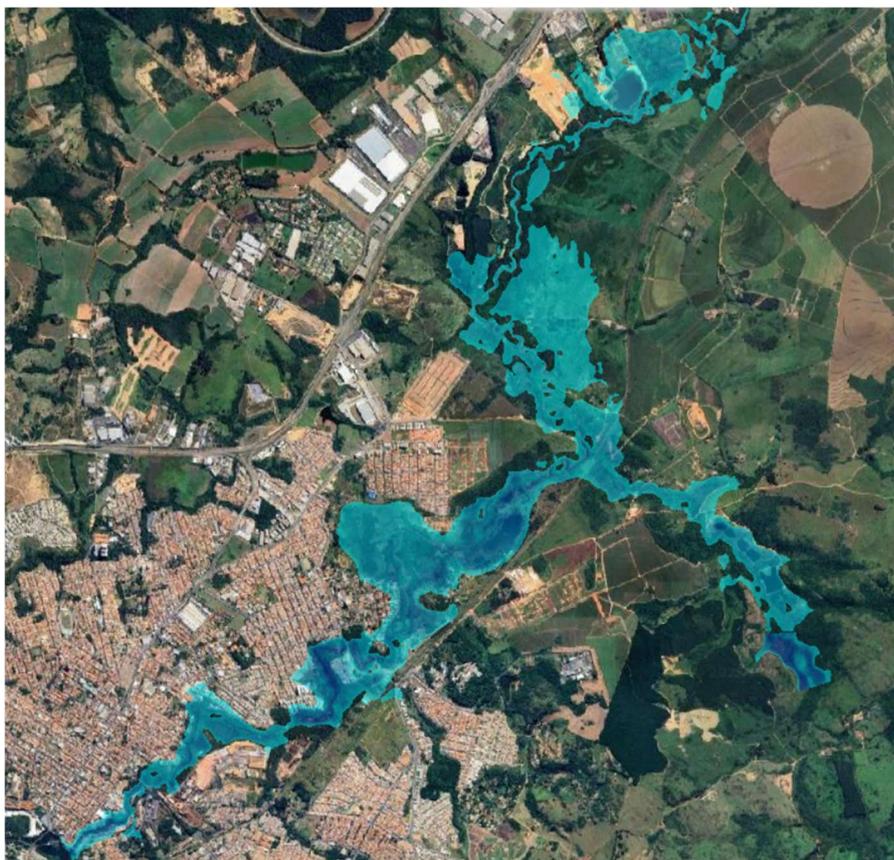


Figura 4 - Mancha de inundação no momento do pico de cheia.



Figura 5 - Mancha de inundação atingindo Bairro Jardim das Nações.

CONCLUSÕES:

A análise dos resultados fornecidos pela simulação de rompimento da Barragem do Pirai permite compreender que um estudo desse tipo (estudo de “Dam Break”) se faz essencial, no sentido de possibilitar ações de planejamento urbano, social, e também econômico, capazes de mitigar os impactos negativos que poderiam ser causados por um evento dessa magnitude, como seria o caso da ruptura da Barragem do Pirai.

A simulação feita no HEC-RAS permitiu identificar quais seriam as primeiras áreas atingidas pela onda de cheia ocasionada pelo rompimento, o que possibilita que a população residente naquela região seja preparada sobre como proceder no caso de um evento desse tipo, principalmente no bairro Jardim das Nações, que está localizado em áreas de topografia mais baixa próximas ao rio.

O estudo bidimensional permite também entender melhor as proporções que um desastre desse tipo poderia tomar no caso de sua ocorrência, e o mapeamento das áreas inundadas ilustra adequadamente todo o volume de água que seria deslocado para as regiões a jusante da barragem. É importante perceber que, no decorrer do tempo após o rompimento, não são somente as áreas com menores elevações as atingidas, devido ao elevado volume de água propagado, que faz com que a profundidade da mancha de inundação aumente progressivamente ao longo do tempo (embora esse aumento seja mais rápido nos momentos iniciais e depois passe a haver uma redução, reestabelecendo-se as condições iniciais).

BIBLIOGRAFIA

Agência das Bacias PCJ. Sistema de Informações, 2025. Disponível em: <https://agencia.baciaspcj.org.br/instrumento-de-gesto/sistemas-de-informacoes>. Acesso em: 27 de jul. de 2025.

ALMEIDA, Bruna Carolina de Melo; SALIBA, Aloysio Portugal Maia; TARQUI, Jorge Luis Zegarra. **Aplicação do HEC-RAS 6.1 no estudo de caso do rompimento da Barragem de Fundão, Minas Gerais, Brasil**. FluHidros - I Simpósio Nacional de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica. Ouro Preto, 2022.

AL-SALAHAT, Murad; AL-WESHAN, Radwan; AL-OMARI, Saif. **Dam break risk analysis and food inundation mapping: a case study of Wadi Al-Arab dam**. Springer. Amã (Jordânia), 7 mar. 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40899-024-01051-0>. Acesso em: 27 jul. 2025.

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: Diário Oficial da União, 2010.

CONIRPI. **Projeto Executivo da Barragem Pirai – Volume IX – Estudo de “Dam Break”**. 2015.

EISA, Hamdi Sebit. **Dam Break Analysis Using HEC-RAS Model - The Case Study of Gilgel Gibe 1**. Tese – Universidade de Arba Minch. Arba Minch (Etiópia), p. 130. 2010.

JUNIOR, Robson Carlos de Moura. **Resolução Numérica das Equações de Saint-Venant pelo Método de Galerkin Descontínuo**. Dissertação – Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, p. 100. 2022.

PROFILL Engenharia e Ambiente Ltda; Agência das Bacias PCJ. **Plano Diretor de Macrodrenagem da Bacia Hidrográfica do Rio Jundiá – Relatório Final**. 2021.

TSCHIEDEL, Arthur da Fontoura. **Avaliação de Fontes de Incerteza em Estudos de Rompimentos de Barragens**. Dissertação – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 138. 2017.

USACE Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS User’s Manual, 2025. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasum/latest>. Acesso em: 27 de jul. de 2025.