

MARCOS VINICIUS ALVES DA COSTA

**COMPARAÇÃO DAS ÁREAS DE INUNDAÇÃO GERADAS POR
ROMPIMENTO REAL DE BARRAGEM E RUPTURA
HIPOTÉTICA NAS CONDIÇÕES ATUAIS: ESTUDO DE CASO DE
UM BARRAMENTO NO ESTADO DO GOIÁS.**

Artigo Científico apresentado ao Curso de Especialização em
Segurança de Barragens; Escola Politécnica; Universidade
Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau
de Especialista.

Orientador: Prof. Dr. Cássia Juliana Fernandes Torres

Salvador
2024

COMPARAÇÃO DAS ÁREAS DE INUNDAÇÃO GERADAS POR ROMPIMENTO REAL DE BARRAGEM E RUPTURA HIPOTÉTICA NAS CONDIÇÕES ATUAIS: ESTUDO DE CASO DE UM BARRAMENTO NO ESTADO DO GOIÁS.

MARCOS VINICIUS ALVES DA COSTA

Resumo

Simulações de rompimento de barragens são essenciais para delimitação de áreas potencialmente afetada pelos seus rompimentos. Existem diferentes metodologias que possibilitam este tipo de simulação, destacando-se no Brasil a Metodologia simplificada para geração de manchas de inundação desenvolvida pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (LNEC) e adaptada pela Agência Nacional de Águas (ANA) e a metodologia utilizada pelo software HEC-RAS, desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center (HEC) do United States Army Corps of Engineers (USACE). Este trabalho tem por objetivo comparar os resultados das simulações das duas metodologias apresentadas com o mapeamento obtido da área afetada pelo rompimento de uma barragem na cidade de Pontalina, estado de Goiás no ano de 2021. O estudo apresentou resultados satisfatórios, porém, com divergências entre os resultados motivadas pela baixa resolução do Modelo Digital de Elevação (MDE) utilizado.

Palavras-chave: Barragens, Simulação, Rompimento, HEC-RAS.

Abstract

Dam break simulations are essential for delimiting areas potentially affected by dam breaks. There are different methodologies that enable this type of simulation, highlighting in Brazil the simplified methodology for generating flood spots developed by the Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (LNEC) and adapted by the Agência Nacional de Águas (ANA) and the methodology used by HEC-RAS software, developed by the Hydrologic Engineering Center (HEC) of the United States Army Corps of Engineers (USACE). This study aims to compare the simulation results of the two methodologies presented with the mapping obtained from the area affected by the collapse of a dam in the city of Pontalina, state of Goiás in the year 2021. The study presented impressive results, however, with divergences between the results motivated by the low resolution of the Digital Elevation Model (DEM) used.

Keywords: Dams, Simulation, Rupture, HEC-RAS.

1. INTRODUÇÃO

As barragens são estruturas construídas em um curso d'água com o objetivo de reservar um volume de água para utilização em um momento posterior ou para regularizar a vazão do manancial durante diferentes épocas do ano. Porém, apesar dos benefícios, as barragens também trazem riscos à população instalada em suas proximidades ou no vale jusante, sendo estes principalmente decorrentes da possibilidade de ruptura destas estruturas.

Os danos produzidos por ruptura de barragens podem apresentar consequências catastróficas, principalmente quando estas estão localizadas a montante de regiões urbanizadas. Neste contexto, alguns países exigem que nos projetos de construção de barragens sejam incluídos estudos visando a elaboração do Plano de Ações Emergenciais (PAE), que tem por objetivo tanto a evacuação da população ribeirinha instalada quanto a minimização dos prejuízos nas regiões a jusante da barragem (Lauriano, 2009).

Para evacuação da população a jusante da barragem é necessário a delimitação de áreas potencialmente atingidas, bem como a determinação do tempo de chegada da onda de cheia em cada uma destas regiões. Tal delimitação é realizada por um estudo que se baseia essencialmente na simulação de cheia induzida, sendo, geralmente, usados nesta avaliação modelos hidrodinâmicos (ANA, 2016).

A modelagem hidrodinâmica da ruptura de uma barragem permite que sejam obtidos dados para subsidiar a produção de mapas de inundação a jusante dela. Para o conhecimento das áreas de risco e implementação do Plano de Ações Emergenciais, tais mapas são essenciais, permitindo como resultado a classificação do perigo, o planejamento de ações de emergência, o mapeamento e a avaliação de risco (Lauriano, 2009).

No caso de pequenas barragens devido às consequências das rupturas, geralmente, serem menores, nem sempre é exigido o uso de ferramentas mais sofisticadas, podendo nestes casos ser adotada a metodologia simplificada para barragens de pequeno porte. Esta metodologia deve conter uma análise hidráulica com o cálculo da vazão máxima na seção da barragem e a jusante, a altimetria das seções e o cálculo do nível máximo da onda de cheia em cada uma destas seções (ANA, 2016).

A metodologia simplificada para geração de manchas de inundação atualmente difundida no Brasil, foi desenvolvida pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (LNEC) (BANCO MUNDIAL, 2014) e adaptada pela Agência Nacional de Águas – ANA, para utilização em barragens e relevos característicos do Brasil.

A utilização de uma metodologia simplificada permite que barragens de pequeno porte, que tenha um potencial de dano associado baixo, apresentem ao órgão fiscalizador as delimitações mínimas das áreas potencialmente atingidas. Neste sentido, o empreendedor pode prover as informações mínimas necessárias à gestão do risco, sem necessariamente arcar com custos elevados de elaboração de modelos mais sofisticados, que por vezes, não trariam necessariamente um ganho de informações relevante à gestão deste risco.

Nos modelos hidrodinâmicos, a modelagem deve ocorrer tanto para o processo de propagação da cheia ao longo do vale a jusante, quanto para o processo de formação da cheia, compreendendo a formação da brecha de ruptura e o hidrograma efluente da mesma. Em alguns casos podem ser inclusive utilizados na modelagem a definição da geometria da brecha (largura e forma final) e o tempo de ruptura (ANA, 2016).

Diferentemente dos casos em que é permitida a adoção da metodologia simplificada, os modelos hidrodinâmicos mais sofisticados são empregados para barragens que não são de pequeno porte, ou

para aquelas de pequeno porte que tenham dano potencial associado alto. A obrigatoriedade da utilização destes modelos reside no fato da necessidade de serem apresentadas, dentre outras informações, o tempo de chegada e a velocidade da onda de propagação da cheia em cada região possivelmente atingida.

A simulação do processo de propagação da cheia para o caso de ruptura de barragens realizados pelos modelos hidrodinâmicos existentes, são aplicações particulares dos modelos de propagação de cheias naturais. Dentre os modelos presentes na literatura, um dos mais conhecidos e indicados é o software de domínio público HEC-RAS (USACE, 2002).

Mesmo com todos os avanços no desenvolvimento de modelos e na capacidade computacional de cálculo, devido à característica intrínseca de simplificação da realidade, os modelos somente conseguem reproduzir de forma aproximada os resultados reais de um rompimento. Desta forma, se torna útil a comparação entre resultados modelados e dados obtidos de levantamentos reais de uma situação de rompimento acontecido. Esta comparação permite avaliar a aplicabilidade destes modelos em determinadas situações, tornando as decisões de gestão riscos mais bem embasadas.

No dia 04 de janeiro de 2020 houve o rompimento de uma barragem de terra no município de Pontalina, Estado de Goiás, ocasionado por uma chuva que, de acordo com levantamento da estação local, foi a maior já registrada na história, compreendendo 192mm em 24 horas de aferição. Nesta situação, a barragem foi galgada devido à grande vazão de entrada no reservatório, e por se tratar de uma barragem de terra, teve sua estrutura comprometida e consequentemente seu rompimento efetivo.

Como a área urbana do município se situa imediatamente a jusante da barragem, áreas urbanizadas foram atingidas e consequentemente a defesa civil foi acionada para ir ao local. A Secretaria de Estado de Meio ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Estado de Goiás – SEMAD, como órgão fiscalizador de barragens no Estado de Goiás também foi requisitada na ocasião para apresentar informações que pudessem contribuir com a avaliação e mitigação dos danos ocorridos.

Para avaliação dos danos decorrentes do rompimento foi realizado um levantamento aéreo das áreas atingidas pela inundação. Estas imagens fizeram parte do relatório de fiscalização do evento ocorrido se tornando uma fonte relevante de informações para estudos posteriores.

Neste sentido, este trabalho tem o objetivo de comparar as regiões atingidas pelo rompimento da referida barragem, obtidas por meio do levantamento de campo, com o resultado obtido de duas simulações de rompimento hipotético realizadas por metodologias distintas.

Para atingir este objetivo foram realizadas duas simulações, sendo uma pelo software HEC-RAS 2D (USACE, 2002), e a outra utilizando a metodologia simplificada para geração de manchas de inundação desenvolvida pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (LNEC) (BANCO MUNDIAL, 2014).

2. REVISÃO DE LITERATURA

As barragens de acumulação de água para usos múltiplos consistem em intervenções construídas com o intuito de controlar a vazão de mananciais superficiais durante períodos de cheias, enquanto proporcionam o acúmulo de água para ser utilizada em períodos de escassez. Porém, como se tratam de construções, estão sujeitas a falhas e devem ser tratadas como tal, tornando-se necessário o uso das tecnologias disponíveis para prevenir ou mitigar seus danos. Neste sentido, serão apresentados neste capítulo temas associados aos riscos desses barramentos e uma breve exposição de ferramentas de modelagem matemática que visem auxiliar em processos decisórios em situações de riscos de inundações nas zonas de jusante das barragens.

2.1. Barragens e riscos associados

A construção de barragens no Brasil remonta ao início do século XX, no Nordeste, dentro do plano de obras de combate à seca (MASSAD, 2010). Desde então as barragens são construídas no país para os mais variados usos, empregando diferentes materiais e tecnologias.

A Agência Nacional de Águas (ANA, 2016) apresenta as barragens, compreendendo o barramento, as estruturas associadas e o reservatório, como obras necessárias para uma adequada gestão dos recursos hídricos ou contenção de rejeitos de mineração ou de resíduos industriais. A maioria das barragens construídas no Brasil tem a função principal de armazenamento de água, seja para regularização de vazão ou controle de cheias. Contenção de rejeitos de mineração ou resíduos industriais são minoria, porém, seus impactos geralmente são mais significativos tanto na construção quanto em uma eventual ruptura.

No que se diz respeito às barragens para armazenamento de água, seja para controle de cheias, geração de energia, lazer, abastecimento ou irrigação, sua construção e exploração constituem um fator de risco humano e tecnológico principalmente às comunidades que passam a viver a jusante delas (MARANGONI et al, 2017).

O risco pode ser definido como o produto da possibilidade/probabilidade multiplicado pela consequência do acontecimento. Os riscos também podem ser considerados como a medida – extensão, volume, nível de gravidade – de danos decorrentes da combinação entre a frequência com que ocorre certo acidente e a extensão das consequências ou efeitos associados ao cenário (SALIBE, 2021). É importante ressaltar que o risco está presente em todas as obras de engenharia, ocasionado pela impossibilidade de se determinar por completo o comportamento de certos materiais (SALIBE, 2021).

Neste sentido, mesmo com a utilização de técnicas do estado da arte em projetos e construções de barragens não há como se obter estruturas à prova de falhas. Desta forma, acidentes podem ocorrer e geralmente apresentam grande repercussão, seja por perdas de vidas ou pela extensão de danos materiais. As simulações destes cenários se tornam essenciais, uma vez que não se pode e não se deve descartar a possibilidade de eventos desta natureza. Dentre as possibilidades de simulação temos o uso de modelos hidrodinâmicos que se propõem a simular os efeitos de escoamento resultante do rompimento de barragens.

2.2. Modelos hidrodinâmicos

Existem atualmente diversos modelos hidrodinâmicos para simulação do rompimento de uma barragem (Alves Junior, 2021), tais como o HEC-RAS, o FLDWAV e o BOSS DAMBRK, dentre os quais se destaca o HEC-RAS. Este modelo foi desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center (HEC) do United States Army Corps of Engineers (USACE), e permite uma simulação numérica da propagação do fluxo constante unidimensional e bidimensional em canais fluviais utilizando as equações propostas por Saint-Venant para situações de escoamento permanente e turbulento (Alves Junior, 2021).

A utilização do HEC-RAS como modelo hidrodinâmico permite a comparação dos métodos utilizados e resultados obtidos com estudos realizados em vários países, possibilitando desta forma resultados mais acurados e promovendo o acúmulo de experiências diversas entre pesquisadores.

No Brasil, também tem sido utilizado para simulação de áreas afetadas pelo rompimento de uma barragem a metodologia simplificada para geração de manchas de inundação desenvolvida pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (LNEC) (Fernandes, 2021).

Existem fontes de incertezas reconhecidas nas metodologias de simulação, sendo estas, função de dificuldades como por exemplo, a determinação da forma de evolução da ruptura de uma barragem, a determinação do hidrograma de cheia resultante, a limitação dos modelos hidrodinâmicos de propagação ou limitação de dados de entrada desses modelos (Palmier et al, 2019).

Neste sentido, pode-se dizer que estas dificuldades são inerentes ao processo de simplificação de um sistema físico complexo para uma simulação em um ambiente computacional. Independente do modelo utilizado haverá algum grau de incerteza relacionado aos resultados, decorrente principalmente de tais dificuldades.

De acordo com Xiong (2011) o rompimento de uma barragem é um processo complicado e abrangente, sendo que a mecânica real da falha ainda não é bem compreendida. Desta forma, tanto os modelos baseados nas leis da física quanto os modelos empíricos não poderiam explicar completamente os mecanismos de ruptura da barragem e seus impactos.

Apesar da complexidade relatada pelos autores supracitados, a metodologia que envolve a modelagem computacional para prever possíveis manchas de inundações provenientes de ruptura de barragem ainda prevalece na literatura científica, uma vez que são o que se tem melhor previsão de cenários para a gestão de risco destes desastres. As modelagens estão em constante evolução e buscam se aproximar cada vez mais da condição real através de refinamento dos dados utilizados, bem como a evolução computacional dos softwares utilizados de referência (Almeida, 2022).

3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho se constituiu de 6 etapas: (I) caracterização da área de estudo e do empreendimento; (II) levantamento das informações relacionadas às áreas afetadas após o rompimento ocorrido; (III) Levantamento das informações acerca da chuva ocorrida na data da ruptura e construção do provável hidrograma de cheia; (IV) aplicação da metodologia simplificada para geração da mancha de inundação do rompimento hipotético da barragem; (V) simulação no software HEC-RAS 2D para delimitação das áreas inundadas a partir do rompimento da barragem para as vazões estimadas no evento do rompimento ocorrido; (VI) comparação das áreas de inundação pelo rompimento real da barragem com os resultados das simulações.

A primeira etapa se constituiu na caracterização da área de estudo e do empreendimento. Para este objetivo foi necessário a busca de informações junto à Secretaria de Estado de Meio ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Estado de Goiás (SEMAD) por meio da equipe que participou dos atendimentos emergenciais após o rompimento da barragem ocorrido em 04 de janeiro de 2020.

Na segunda etapa foi realizado o levantamento das informações relacionadas às áreas afetadas após o rompimento ocorrido. Os dados relacionados ao mapeamento das áreas afetadas pelo rompimento do reservatório foram obtidos junto à equipe técnica da SEMAD, que esteve em campo entre os dias 05/01/2021 e 08/01/2021 mapeando a área por meio de quatro voos realizados por drones que fizeram a coleta de imagens para delimitação do dano ambiental causado pelo rompimento.

Para delimitação da área afetada foi realizada a verificação visual das áreas afetadas nas imagens do mapeamento. Pode-se notar que a vegetação nestas áreas foi danificada, gerando regiões com áreas mais com coloração diferenciada, com maior tendência à coloração acinzentada. Para melhorar a visualização foi definido como fundo as imagens atuais da região disponibilizadas pelo Google Satellite e acessadas pelo plugin QuickMapServices do QGIS. A delimitação foi realizada no software QGIS.

A terceira etapa consistiu no levantamento das informações acerca da chuva ocorrida na data da ruptura e construção do provável hidrograma de cheia do evento. Os dados de chuva foram obtidos da única estação pluviométrica presente no município de Pontalina por meio da plataforma HIDROWEB.

Para iniciar a construção do hidrograma foi realizada a determinação da chuva máxima a partir do método de Gumbel. Este método parte de fórmulas estatísticas da média e do desvio padrão das precipitações máximas registradas para obter as precipitações máximas para determinados tempos de retorno. A média e o desvio padrão podem ser obtidos pelas equações 1 e 2.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x_t \quad \text{Equação 1.}$$

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N (x_t - \bar{x})^2} \quad \text{Equação 2.}$$

Em que:

\bar{x} : Média;

S_x : Desvio padrão;

x : Variável de interesse;

N : Número de termos.

Para obtenção da precipitação máxima para os tempos de retorno determinados são utilizadas as equações 3 e 4.

$$y_{TR} = -\ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{TR}\right)\right) \quad \text{Equação 3.}$$

$$x_{TR} = y_{TR} \times 0,7797 \times S_x + \bar{x} - 0,45 \times S_x \quad \text{Equação 4.}$$

Em que:

TR : Tempo de Retorno;

x_{TR} : Precipitação máxima provável para determinado tempo de retorno.

Em seguida foi realizada a discretização temporal das chuvas máximas obtidas por meio de coeficientes de desagregação para diferentes durações de chuvas. A partir destes dados foi possível a construção da equação de chuva IDF da região de estudo a partir da equação de Sherman, apresentada na equação 5 e do método de cálculo dos mínimos quadrados.

$$I = \frac{K \times TR^m}{t^n} \quad \text{Equação 5.}$$

Em que:

I : Intensidade em mm/h;

TR : Tempo de retorno em anos;

t : Duração em minutos;

K, m, n : Parâmetros adimensionais obtidos pelo ajuste.

A partir da equação encontrada foi possível a obtenção de intensidade de chuva para diferentes TR e durações. Estes valores propiciaram a construção do hietograma de projeto pelo Método dos Blocos Alternados para o tempo de retorno de interesse.

O registro de precipitação no dia da ruptura foi de 192mm ao longo de 24 horas. A partir da comparação deste valor com os valores de intensidade de chuva para diferentes TR e durações foi estimado como TR do estudo 1000 anos com a duração da precipitação igual ao tempo de concentração da bacia. Este valor foi utilizado para a construção do hietograma de projeto.

Com base no hietograma de projeto foi realizado o cálculo da chuva efetiva para geração do Hietograma Excedente pelo Método SCS. Para esta parte foi definido o CN com base no uso e ocupação do solo da bacia, calculada a infiltração potencial máxima por meio da equação 6 e a precipitação efetiva excedente pela equação 7. A partir das precipitações excedentes é construído o Hietograma de chuva excedente.

$$S = 25,4 \times \left(\frac{1000}{CN-10} \right) \quad \text{Equação 6.}$$

$$P_{ef} = \frac{(P-0,2S)^2}{(P+0,8S)}, \text{ para } P > 0,2S \quad \text{Equação 7.}$$

A próxima etapa foi a elaboração do Hidrograma Unitário Sintético triangular do SCS, sendo necessário a definição do tempo de concentração e da área de contribuição da bacia. São obtidos então os valores para a duração da precipitação excedente (Equação 8), para o tempo de resposta da bacia (Equação 9), para o tempo de ocorrência de pico (Equação 10), para o tempo de base do hidrograma (Equação 11) e para a vazão de pico do hidrograma.(Equação 12).

$$t_r = 0,17 \times t_c \quad \text{Equação 8.}$$

$$t_L = 0,6 \times t_c \quad \text{Equação 9.}$$

$$t_p = 0,5 \times t_r + t_L \quad \text{Equação 10.}$$

$$t_b = 2,67 \times t_p \quad \text{Equação 11.}$$

$$Q_{(u,p)} = \frac{(2,08 \times A_d)}{t_p} \quad \text{Equação 12.}$$

Com os resultados obtidos e por meio da Tabela 1 e das relações apresentadas na Figura 1 foi construído o Hidrograma Unitário Sintético SCS.

Tabela 1 - Parâmetros para construção do Hidrograma Unitário Sintético SCS

Q	Valor
0	0
Q _p	T _p
0	t _b

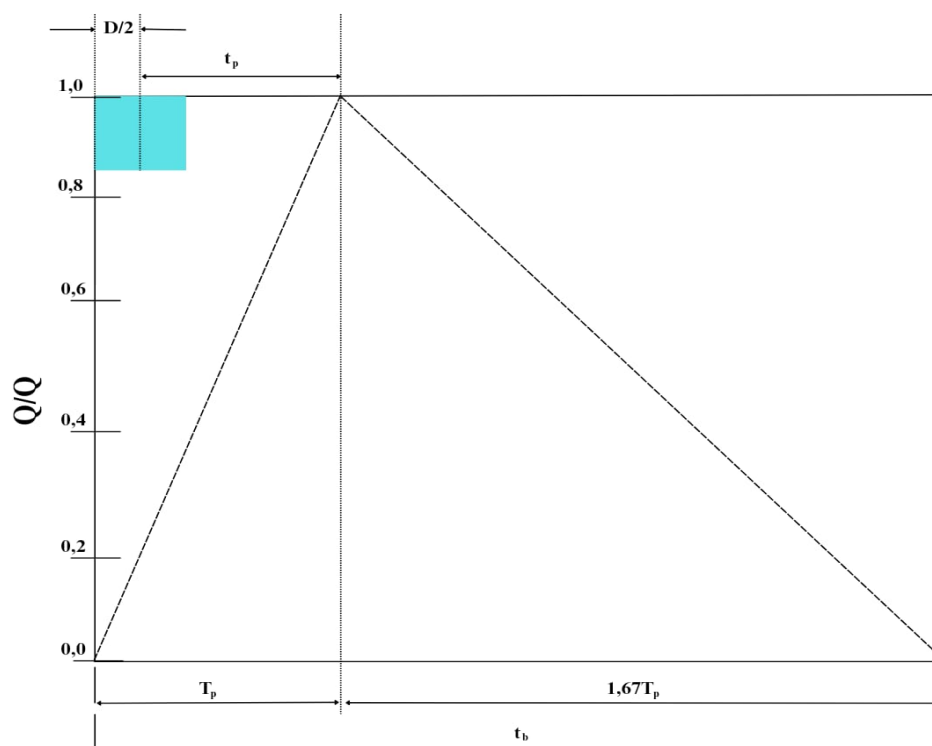


Figura 1 – Relações métricas do Hidrograma. Fonte: Próprio autor.

Por último temos a construção da matriz de para elaboração do Hidrograma de Projeto. Os valores da matriz são obtidos pela multiplicação da chuva excedente pela vazão unitária para cada bloco de chuva retirado do Gráfico do Hidrograma Unitário Retangular. A matriz tem o objetivo de fazer a superposição dos hidrogramas triangulares em toda a área da bacia. A partir da matriz finalizada, o hidrograma de projeto pode ser obtido diretamente.

A quarta etapa da metodologia se refere à simulação realizada a partir da metodologia simplificada para geração de manchas de inundação desenvolvida pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (LNEC) e adaptada, publicada e utilizada pela Agência Nacional de Águas (ANA).

Para utilização da metodologia foi necessário a obtenção dos dados de volume acumulado, cota de coroamento, altura da barragem, imagens de satélite e o Modelo MDE (Modelo Digital de Elevação) criado a partir dos dados SRTM da região a ser simulada. Os dados obtidos são apresentados na Tabela 2. Os dados SRTM correspondem a uma data em que a barragem estava operando. Foram utilizados os programas ARCGIS, Google Earth e Microsoft Excel para simulação.

Tabela 2 - Dados levantados.

Parâmetro	Valor
Área da bacia de contribuição	32 km ²
Cota da soleira do vertedouro	622 m
Altura da Barragem	7 m
Volume acumulado	0,34 hm ³

A metodologia proposta parte do cálculo empírico da distância do rio a ser modelada. Em seguida é realizada a modelagem do rio, sua suavização. São definidas também as seções transversais ao longo do rio e os pontos de altimetria pelo cruzamento destas seções com os dados de altimetria obtidos do

SRTM. Por último é realizado o cálculo hidráulico para estimativa do nível máximo de onda de ruptura em cada uma das seções transversais para enfim gerar a área de inundação a ser utilizada. O fluxograma das etapas é apresentado na Figura 2.

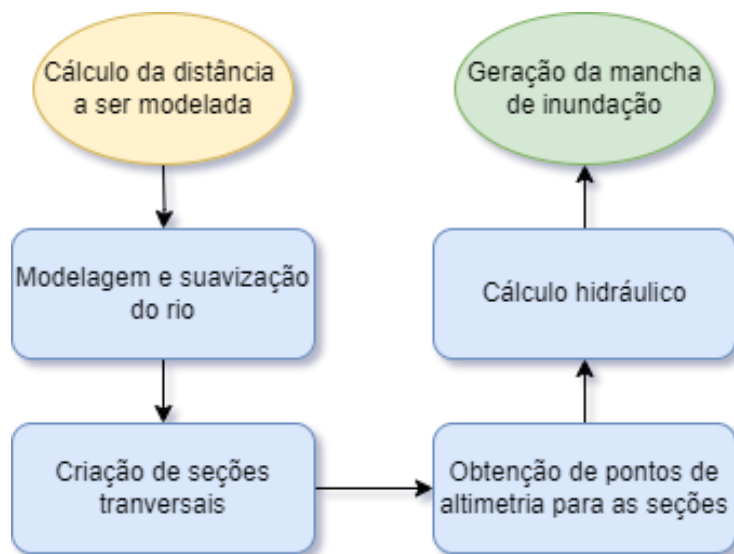


Figura 1 - Fluxograma da metodologia simplificada. Fonte: Próprio autor.

A quinta etapa se refere à simulação realizada no software HEC-RAS 2D a fim de delimitar áreas inundadas. Para a simulação é necessária a criação da geometria do terreno ao longo do rio e do reservatório. Para criação da geometria também foi utilizado o MDE da região obtido a partir dos dados SRTM. É relevante frisar que o resultado da simulação é dependente diretamente da qualidade do MDE escolhido. Para construção de mapas de inundação para compor o Plano de Ações Emergenciais de uma barragem é necessário um MDE com melhor resolução do que o SRTM utilizado neste trabalho.

A construção da geometria parte da delimitação de uma área na qual é construída uma malha de polígonos, cada um com pontos centrais e arestas. Em seguida a ferramenta de pré-processamento cria tabelas de propriedades hidráulicas para cada ponto, de acordo com o MDE utilizado, servindo de base para o cálculo de fluxo entre as células. O próximo passo é a definição das condições de contorno, sendo definidas como a seção transversal do rio a montante do reservatório e a seção transversal do rio a jusante da área de estudo.

Para simular a ruptura desejada no trabalho foi necessário a inserção do hidrograma de cheia obtido nas etapas anteriores na simulação do HEC-RAS. O objetivo desta etapa foi simular o rompimento ocorrido a partir de uma cheia a ocorrida no evento da ruptura objeto deste trabalho.

A construção do plano de ruptura foi realizada com base em informações presentes nos relatórios e fotos do local sendo escolhido modo de ruptura overtopping com formação de brecha. A partir da inserção dos valores estimados é possível realizar a simulação. Por último foram geradas as imagens com as manchas de inundação geradas pelo programa. O fluxograma das etapas é apresentado na Figura 3.

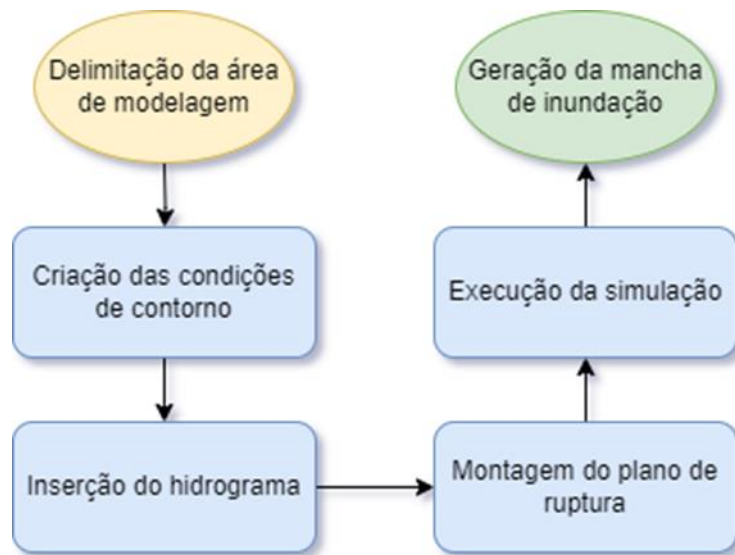


Figura 2 - Fluxograma para modelagem pelo HEC-RAS. Fonte: Próprio autor.

A última etapa do trabalho consistiu na sobreposição das imagens geradas pelas simulações com as áreas afetadas pelo rompimento real da barragem.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como resultado da primeira etapa tivemos o levantamento das informações relacionadas a caracterização da área de estudo e do empreendimento. A barragem se encontra no Córrego do Jataí, imediatamente à jusante de sua confluência com o Córrego do Mateiro, no município de Pontalina, estado de Goiás. Os referidos mananciais pertencem à Bacia do Rio Meia Ponte, uma das bacias mais importantes do estado, quer pela sua dimensão ou pela sua importância econômica, inclusive englobando a maior região metropolitana do estado. Cumpre-se falar que área de estudo relacionada ao rompimento abrange parte dos dois mananciais supracitados e pequenos afluentes ao longo do Córrego Mateiro. A localização dos mananciais e da barragem podem vistos na Figura 4.



Figura 4 – Localização da barragem e dos mananciais do estudo.

A barragem em questão foi construída, de acordo com informações disponíveis, com finalidade principal de irrigação, em terra homogênea, sem filtros, com dispositivo extravasor lateral sem impermeabilização. Possuía maciço com dimensões aproximadas de 7 metros de altura, 190 metros comprimento e largura da crista 8 metros. Seu volume acumulado máximo projetado era de 340.000 metros cúbicos com soleira da crista na cota de 622 metros.

A área de contribuição da bacia hidrográfica foi obtida por meio do software QGIS utilizando-se do MDE SRTM e com auxílio da base hidrográfica disponibilizada pela SEMAD, resultando no valor de aproximadamente 29,85 km². A delimitação da bacia de contribuição pode ser observada na Figura 5.

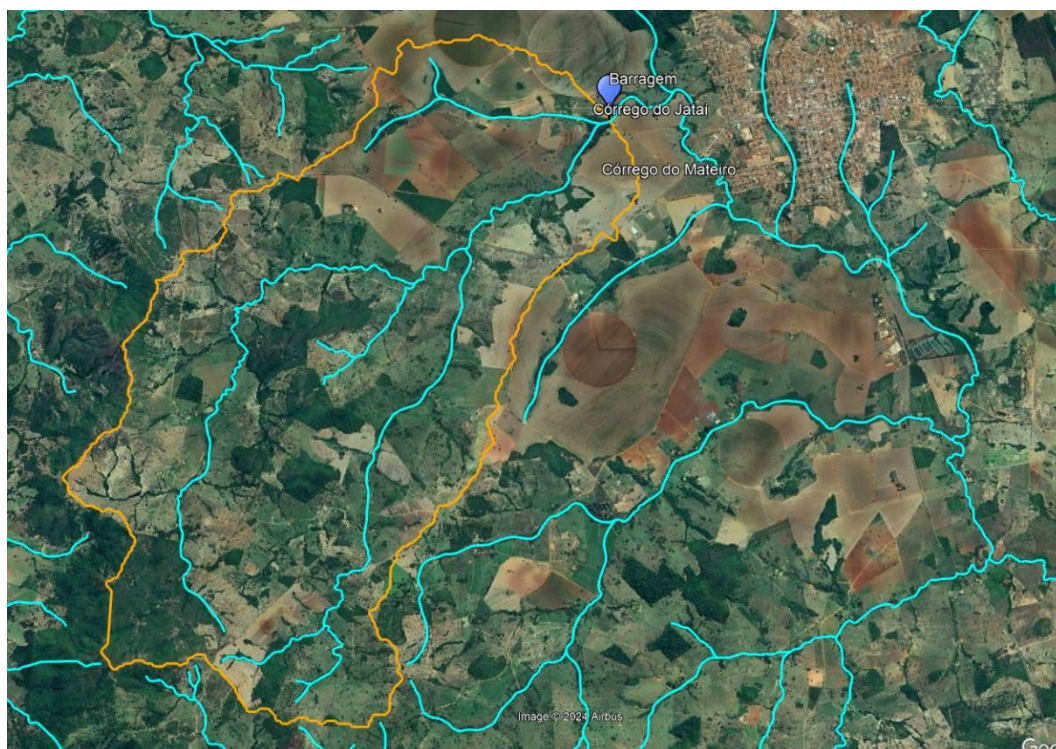


Figura 5 – Delimitação da bacia de contribuição.

A segunda etapa foi dedicada ao levantamento das informações relacionadas às áreas afetadas após o rompimento ocorrido. Os dados foram obtidos por meio de quatro voos realizado por drones que fizeram a coleta de imagens para delimitação do dano ambiental causado pelo rompimento. O resultado do mosaico de imagens obtido para o mapeamento é apresentado na Figura 6.

É possível observar que a área atingida, apesar de muito próxima à zona urbana, não atingiu efetivamente nenhuma zona com construções. Este fato é corroborado por informações da época que apresentam que não foi registrado nenhuma vítima ou danos a alguma construção, sendo os danos de caráter estritamente ambientais. A delimitação da área atingida é apresentada na Figura 7 acompanhada das imagens do levantamento realizado. Para uma melhor visualização estas imagens foram sobrepostas às imagens de satélite atuais da região.



Figura 6 – Mosaico do levantamento de campo das áreas atingidas.



Figura 7 – Delimitação das áreas atingidas com base no levantamento de campo.

A terceira etapa consistiu no levantamento das informações acerca da chuva ocorrida na data da ruptura e construção do provável hidrograma de cheia do evento.

Os dados de chuva foram obtidos da única estação pluviométrica presente no município de Pontalina

por meio da plataforma HIDROWEB. Os dados obtidos apresentaram as precipitações máximas mensais, ao longo de 24 horas, com uma série histórica de 41 anos, sendo seu início a partir do ano de 1973. Cumpre-se falar que a chuva registrada para o dia do evento, 192mm em 24 horas, foi a maior da série histórica obtida.

Para início da construção do hidrograma foram calculados os valores médios de chuva máxima e seu desvio padrão de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 – Valores de média e desvio padrão para construção do hidrograma

Parâmetro	Valor
\bar{X}	79,71
S_x	31,79

Os resultados para as precipitações máximas, para os tempos de retorno calculados, são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores de precipitações máximas.

TR (anos)	F(x)	Precipitação (X) (mm)
2	0,37	74,49
5	1,50	102,58
10	2,25	121,18
25	3,20	144,68
50	3,90	162,12
100	4,60	179,42
1000	6,91	236,61
10000	9,21	293,69

Logo em seguida foi obtida a equação de chuva IDF da região de estudo. Seu resultado é apresentado na Equação 13.

$$I = \frac{307,8955 \times TR^{0,1522}}{t^{-0,616386}} \quad \text{Equação 13.}$$

Com os dados do registro de precipitação, para construção do Hietograma de Projeto, foi estimado 1000 anos como TR do estudo e com duração da precipitação igual ao tempo de concentração da bacia. O Hietograma de projeto é apresentado na Figura 8.

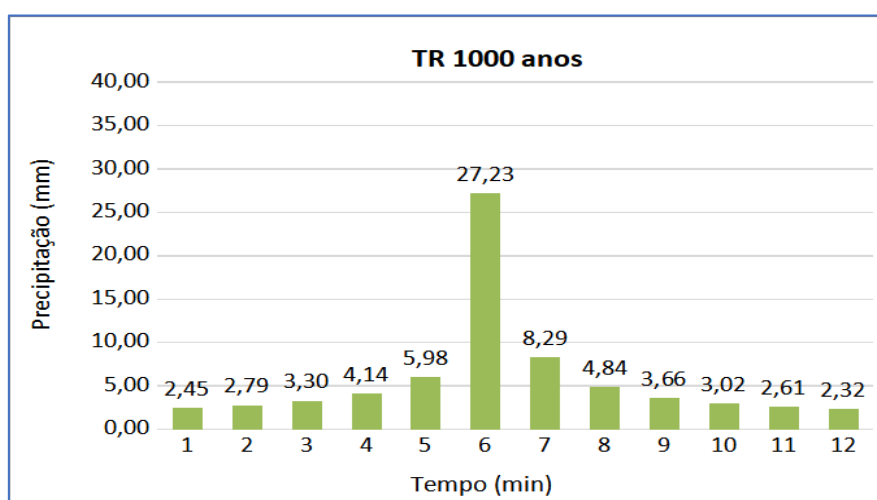


Figura 8 – Hietograma de projeto.

Para construção do Hietograma Excedente foram obtidos os valores de CN e da infiltração potencial máxima S apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores dos parâmetros para construção do Hietograma Excedente

Parâmetro	Valor
CN	74
S	89,2

Em seguida foram obtidos os valores para o tempo de concentração da bacia, para a duração da precipitação excedente, para o tempo de resposta da bacia, para o tempo de ocorrência de pico, para o tempo de base do hidrograma e para a vazão de pico do hidrograma. Os valores são necessários para elaboração do Hidrograma Unitário Sintético e estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores para elaboração do Hidrograma Unitário Sintético.

Parâmetro	Valor
t_c (min)	106,4
t_r (min)	18,09
t_L (min)	63,86
t_p (min)	72,90
t_b (min)	194,65
$Q_{u,p}$ (m ³ /s.cm)	51,10

Os valores dos parâmetros obtidos para a construção do Hidrograma Unitário Sintético são apresentados na Tabela 7. Para facilitar a representação gráfica os valores foram deslocados ao longo do eixo das abscissas. O Hidrograma Unitário Sintético obtido é apresentado na Figura 9.

Tabela 7 - Parâmetros para construção do Hidrograma Unitário Sintético SCS

Q	Valor
-1,22	0
0,00	5,11
2,03	0

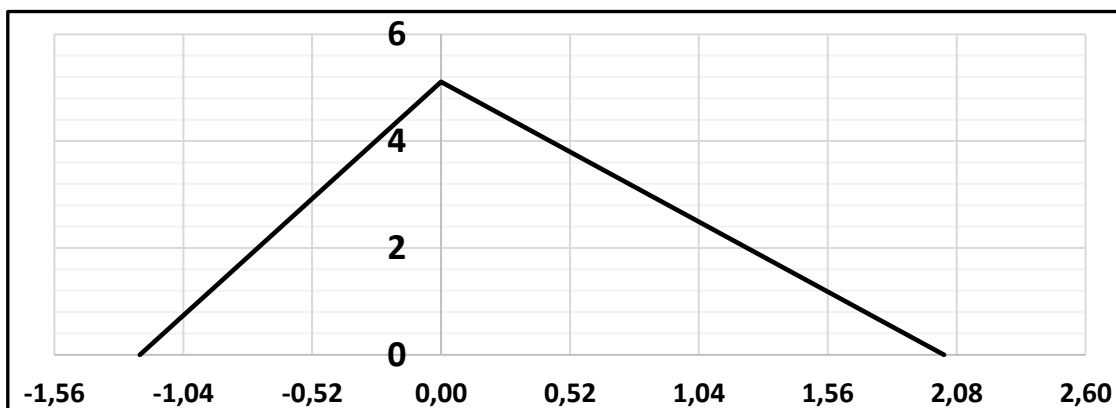


Figura 9 – Hidrograma Unitário Sintético.

A partir do dados do Hidrograma Unitário Sintético é construída a matriz de para elaboração do Hidrograma de Projeto e por fim o Hidrograma de Projeto, apresentado na Figura 10.

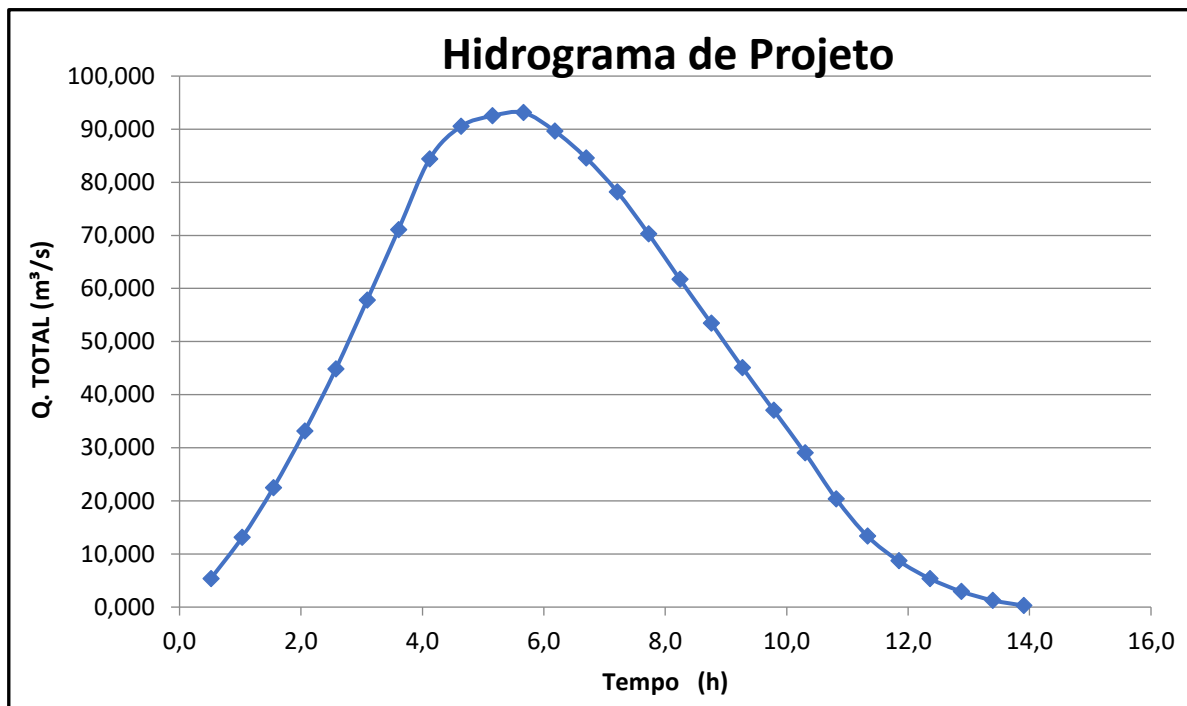


Figura 10 – Hidrograma de Projeto.

A quarta etapa da metodologia se refere à simulação realizada a partir da metodologia simplificada para geração de manchas de inundação. A modelagem do rio com sua suavização e as seções transversais obtidas pelo método são apresentados na Figura 11.



Figura 11 – Modelagem do rio e seções transversais pela metodologia simplificada.

Pode-se notar que as seções transversais geradas não atingem a totalidade da área urbanizada do município. Cabe-se ressaltar que esta metodologia é indicada para reservatórios de pequenos e cujo dano potencial associado também é pequeno. Devido à presença de áreas habitadas logo a jusante da barragem, não seria indicado neste caso a utilização do método, porém, a caráter didático e de comparação a simulação foi realizada. O resultado da simulação é apresentado na Figura 12.



Figura 12 – Resultado da simulação para a metodologia simplificada.

A quinta etapa da metodologia se refere à simulação realizada no software HEC-RAS 2D a fim de delimitar áreas inundadas. Para a simulação pelo programa HEC-RAS foram inicialmente definidas como geometrias as áreas a montante e jusante da barragem e a barragem em si, conforme apresentado na Figura 13.



Figura 13 – Geometrias definidas para modelagem pelo HEC-RAS.

O Hidrograma de Projeto foi inserido como condição de contorno representando a vazão de entrada na área do reservatório para uma chuva com tempo de retorno de 1000 anos. Por fim se faz necessário a definição do plano de ruptura por meio das informações para a formação de uma brecha no talude, ocorrido devido ao galgamento da barragem e com tempo de ruptura definido em 20 minutos. As dimensões da brecha foram estimadas com base no relatório de fiscalização citado anteriormente. O modelo da brecha de ruptura é apresentado na Figura 14.

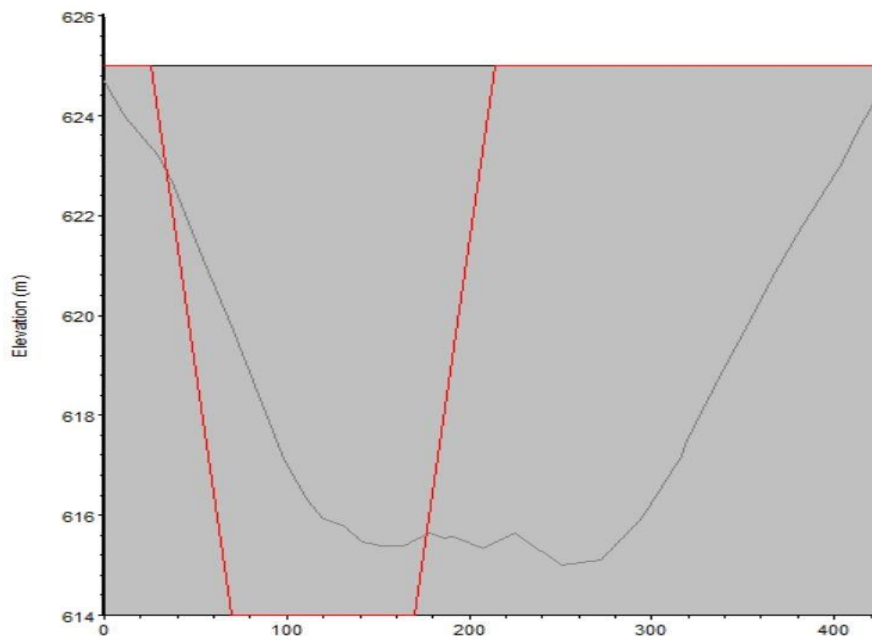


Figura 14 – Geometrias definidas para modelagem pelo HEC-RAS.

Após a definição do modelo da brecha de ruptura a simulação pode ser realizada. O resultado da simulação pelo HECRAS 2D é apresentado na Figura 15.



Figura 15 – Resultado da simulação para modelagem pelo HEC-RAS.

A última etapa é a comparação das áreas de inundação pelo rompimento real da barragem com os resultados das simulações. A superposição das áreas atingidas pela inundação com as áreas simuladas a partir da metodologia simplificada é apresentada na Figura 16. As áreas atingidas pela inundação se encontram em laranja e as áreas simuladas se encontram em amarelo.



Figura 16 –Áreas atingidas pela inundação com as áreas simuladas pela metodologia simplificada.

Pode-se notar que a área obtida na simulação abrange quase a totalidade das áreas atingidas pelo rompimento acontecido, excetuando-se uma pequena parcela logo no início do trecho a jusante da barragem. Por outro lado, pode-se observar que a área simulada consideravelmente maior do que a atingida de fato mostrando, neste sentido, resultados a favor da segurança.

A superposição das áreas atingidas pela inundação com as áreas simuladas no software HEC-RAS é apresentada na Figura 17. As áreas atingidas pela inundação são apresentadas em laranja e as áreas simuladas no software HEC-RAS são apresentadas em azul.

A área obtida na simulação abrange parcialmente as áreas afetadas pelo rompimento, apresentando áreas totais bem aproximadas durante os primeiros quilômetros da simulação. Neste sentido podemos citar que o levantamento foi realizado a partir de um MDE com baixa resolução, que apesar não indicado para uso este tipo de simulação, apresentou resultado satisfatório. É esperado que caso o estudo tivesse sido realizado com MDE de maior resolução provavelmente o resultado seria mais fidedigno ao esperado.



Figura 17 – Áreas atingidas pela inundação com as áreas simuladas pelo HEC-RAS 2D.

A superposição das áreas simuladas pelas duas metodologias pode ser observada na figura 18. Nota-se que a área total de cada uma das simulações difere bastante uma da outra. Pode-se observar deste resultado que a metodologia simplificada apresenta resultados mais abrangentes, trabalhando com um nível menor de detalhamento sendo seus resultados em favor da segurança. O caráter simplificado da metodologia implica na possibilidade de resultados com menor nível de detalhamento.



Figura 18 – Superposição das áreas simuladas pelas duas metodologias.

Em contrapartida os resultados apresentados pelo HEC-RAS apresentam um maior nível de detalhamento, porém, com uma considerável porção da área atingida não sendo abrangida pelas áreas resultadas da simulação. Dentre as prováveis causas desta falha podemos destacar a utilização de um MDE com resolução inapropriada para a metodologia e a aproximação de valores de grandezas físicas como vazões a montante, parâmetros da brecha ou a adoção de coeficiente de rugosidade de Manning único para todas as superfícies.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme os dados levantados e simulações realizadas é possível a utilização de metodologias para previsão de áreas atingidas por rompimentos de barragens com adequado grau de precisão.

Convém dizer que alguns métodos podem exigir um pouco mais de conhecimento das características da barragem ou do terreno de jusante para que seja possível um melhor ajuste às características reais encontradas.

As duas metodologias apresentadas neste estudo se mostraram satisfatórias para o caso apresentado, oferecendo resultados próximos aos encontrados no levantamento de campo das áreas atingidas pelo rompimento da barragem.

Apesar do grande número de incertezas associadas à produção destes dados, nota-se coerência entre os resultados obtidos enquanto levantamento de campo e mapeamento das áreas atingidas, simulação pela metodologia simplificada e simulação pelo HEC-RAS. As divergências encontradas entre os resultados obtidos provavelmente foram derivadas da baixa resolução do MDE utilizado, sendo neste sentido, sugerida a reprodução do estudo a partir de um MDE com maior resolução.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Bruna Carolina de Melo. **Avaliação do Transporte de Sedimentos na Ruptura de Barragens de Rejeito**. 2022. 164f. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia- Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais. Orientada pelo Prof. Aloysio Portugal Maia Saliba.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Guia de orientação e formulários do Plano de Ação de Emergência - PAE**. Brasília, ANA, 2016.

ALVES JUNIOR, F. M.; Kobiyama, M.; Corseuil, C.W. **Mapeamento de Índice de Risco de Inundação de Área a Jusante de uma Barragem em Caso de Rompimento**. Mercator, Fortaleza, v. 22, e22004, 2023, ISSN:1984-2201.

BANCO MUNDIAL. **Serviços Analíticos e Consultivos em Segurança de Barragens: Produto 6 - Classificação de Barragens Reguladas pela Agência Nacional de Águas (Contrato Nº 051/ANA/2012)**. Brasília, Banco Mundial, 2014.

FERNANDES, M. R. M. et al. **Simulação da Mancha de Inundação do Rompimento Hipotético da Barragem Jacarecica II**. XIII Encontro de Recursos Hídricos em Sergipe. Sergipe, 2021.

LAURIANO, A. W, *et al.* **Estudo de ruptura da Barragem de Funil: comparação entre os modelos FLDWAV e HEC-RAS**. XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande, 2009.

MASSAD, Faíçal. **Obras e terra: curso básico de geotecnia**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

SALIBE, Ariane Busch; GOBBI A. **Gerenciamento de risco de barragens do estado do Paraná: uma abordagem bibliográfica**. Revista Principia, João Pessoa, Vol. 60, No 1, 2023, p 189-203, ISSN: 2447-9187.

USACE – U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual**, Version 5.0, Hydrologic Engineering Center HEC. Davis, Califórnia, Estados Unidos, 2016.

XIONG, Y. **A Dam Break Analysis Using HEC-RAS**. Journal of Water Resource and Protection, Vol. 3 No. 6, 2011, p. 370-379. doi: 10.4236/jwarp.2011.36047.