

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

APLICAÇÃO DOS MODELOS RCEM E LIFESIM PARA ESTIMATIVA DE PERDAS DE VIDAS RELACIONADAS À INUNDAÇÃO CAUSADA PELA RUPTURA DA BARRAGEM DE FUNDÃO (MARIANA)

André Felipe Rocha da Silva¹; Julian Cardoso Eleutério²

RESUMO

Entre os impactos diretos e indiretos decorrentes de inundações tanto naturais quanto tecnológicas, as fatalidades humanas constituem as consequências mais nefastas. No Brasil, os últimos acidentes com grandes impactos e fatalidades ocorreram devido às rupturas de barragens de rejeitos de mineração nos municípios de Mariana e Brumadinho. Por meio de modelagens matemáticas e de simulações computacionais, estimativas de perdas de vidas são resultados que fornecem importantes subsídios à elaboração de alertas mais robustos e ao planejamento de emergência mais eficaz. Mesmo apresentando alta fragilidade por diversos fatores, tais acidentes ainda não são profundamente considerados na concepção e aplicação desses modelos. Neste contexto e face à inserção de dispositivos relacionados ao planejamento mais rigoroso para situações emergenciais em legislações destinadas à segurança de barragens, este trabalho objetivou analisar a aplicação de dois modelos de estimativa de perdas de vidas com princípios diferentes, RCEM e LifeSim, em inundações causadas por rompimentos de barragens de rejeitos por meio da análise do caso de rompimento da barragem de Fundão (Mariana). Foi verificada uma superestimação na estimativa de perdas de vidas com aplicação dos modelos. Além disso, para o RCEM foi identificada a alta subjetividade na determinação dos parâmetros do modelo, já o LifeSim apresentou limitações em relação à caracterização do processo de evacuação em casos de inundações com tempo de chegada da onda muito curto.

Palavras-Chave – Avaliação de risco; Fatalidades; Barragem de rejeitos.

INTRODUÇÃO

Entre os potenciais impactos de um evento de inundação, a perda de vidas humanas é o mais significativo. No contexto nacional, os últimos eventos de inundações com grandes consequências observadas estão relacionados às rupturas de barragens de rejeitos de mineração (Fundão em Mariana e Barragem B1 em Brumadinho). Ao total, no Brasil, já foram registrados 10 acidentes com estruturas dessa tipologia com 280 fatalidades e 17 desaparecimentos desde 1960 até 2021 (WISE, 2021). Estruturas de contenção de rejeitos apresentam maior fragilidade em comparação a barragens destinadas à acumulação de água (Rico *et al.*, 2008). De 1910 a 2010, foram relatados acidentes em 1,2% da totalidade de 18.401 empreendimentos existentes mundialmente (Azam e Li, 2010). Tal taxa é superior em duas ordens de grandeza em comparação ao valor de 0,01% relatado para barragens convencionais (ICOLD, 2001).

A compreensão da relação entre tipos de alerta e evacuação e a eficiência em termos de redução de fatalidades pode fornecer importantes subsídios à elaboração de sistemas de alertas mais robustos e de planos de emergência mais eficazes. Há na literatura diversos modelos de estimativa de perdas de vidas (Silva e Eleutério, 2019), nos quais a estimativa é obtida com base nas características da

1) Engenheiro mestre e aluno no programa de pós-graduação em Saneamento Meio Ambiente e Recursos Hídricos; andre.felipe194@gmail.com.

2) Professor pesquisador no Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, e no programa de pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil; julian.eleuterio@gmail.com.

inundação, do sistema de alerta e da população em risco. Esses modelos podem ser classificados em dois tipos: os modelos empíricos, que são aqueles que, baseados na análise de casos históricos, desenvolvem relações entre as características do evento e a taxa provável de mortalidade da população em risco; e os modelos baseados em agentes que são aqueles que, por intermédio de uma quantificação variada no tempo das características do evento correlacionada a critérios e limites de exposição a inundações, fornecem uma simulação mais detalhada do evento, possibilitando modelar o comportamento individual e a causa da fatalidade.

Com as recentes atualizações na legislação brasileira destinada à segurança de barragens (Lei 14.066/2020), a aplicação desses modelos se faz cada vez mais necessária face à inserção de dispositivos relacionados ao planejamento mais rigoroso para situações emergenciais, principalmente para estruturas destinadas ao armazenamento de rejeitos. Porém, a elaboração e aplicação desses modelos de estimativa de perdas de vidas ainda estão restritas a inundações naturais e a falhas de estruturas de acumulação de água. Desse modo este trabalho tem como objetivo a comparação de dois modelos clássicos de estimativa de perdas de vidas aplicados a eventos de inundação causados por rompimento de barragens de rejeitos: o modelo empírico RCEM (*Reclamation's Consequence Estimating Methodology*) e o modelo baseado em agentes HEC-LifeSim.

O RCEM é uma atualização do modelo Graham (1999), que foi amplamente utilizado na literatura. Atualmente, a aplicação do RCEM é direcionada aos casos em que só há o objetivo de obtenção de uma ordem de grandeza das fatalidades e em locais onde não há quantidade e qualidade suficiente de dados de entrada exigidos para aplicação de modelos baseados em agentes. Já o modelo LifeSim é o mais utilizado em consultorias e seguradoras americanas e possui a aplicação crescente em outros países por ainda apresentar alguns impedimentos face à necessidade de grande quantidade e qualidade de dados de entrada. O modelo foi integralmente incorporado ao software HEC-LifeSim, contando com uma interface gráfica amigável, tendo também a vantagem de funcionar como complemento do modelo HEC-RAS. O HEC-LifeSim, vista a abordagem baseada em agentes, fornece informações detalhadas em relação às fatalidades, por meio de equacionamentos detalhados que relacionam características do alerta, da evacuação, do comportamento humano e outros, sendo assim, altamente aplicável no intuito de elaboração do planejamento de emergência. No entanto, o modelo ainda não foi muito explorado para a finalidade de se compreender eventos relacionados a rompimentos de barragens de rejeitos.

Nesse contexto, o acidente ocorrido na barragem de rejeitos de Fundão (Mariana – MG), em novembro de 2015, é explorado neste trabalho. São aplicados e comparados os dois modelos, RCEM e HEC-LifeSim, com o intuito de compreender o impacto de cada metodologia na avaliação de risco e suas limitações. O foco do estudo se limita aos impactos humanos causados no distrito de Bento Rodrigues tendo sido a escolha desse evento devido à disponibilidade de dados relativos aos acidentes, por meio de relatórios e do estudo de retroanálise da ruptura realizado por Machado (2017). Além disso, a comparação de análises prospectivas com casos que já ocorreram é um ótimo meio de se verificar a aplicação desses modelos em situações em que há uma maior resistência no fluxo da inundação, como é caso de uma onda de rejeitos.

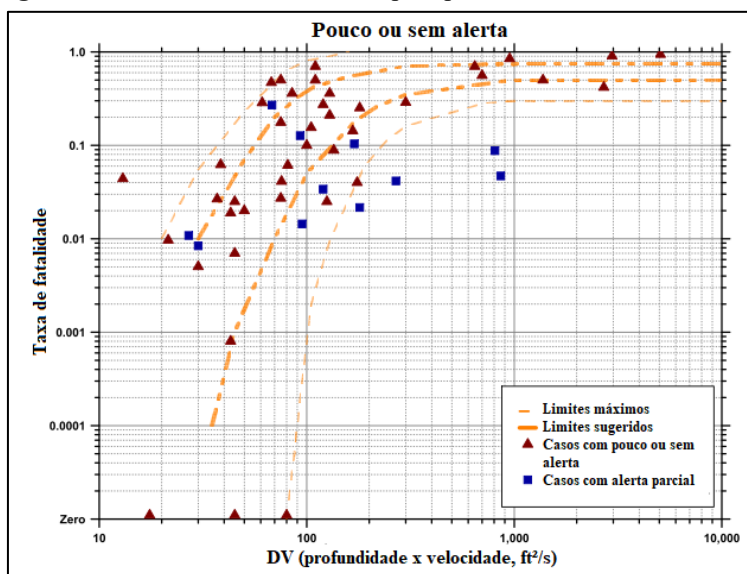
RCEM (RECLAMATION'S CONSEQUENCE ESTIMATING METHODOLOGY)

USBR (*United States Bureau of Reclamation*) (2015), com intuito de expandir a análise de casos e refinar um modelo empírico desenvolvido por Graham (1999), propôs o modelo empírico de estimativa de vidas RCEM. A partir de uma análise histórica das características de 60 casos de inundações³, principalmente causadas por acidentes em barragens de água, foram elaborados dois

3) Entre os casos utilizados na elaboração do modelo, apenas um foi causado por uma ruptura de barragem de rejeitos de mineração. O da barragem de Buffalo Creek, que se localizava no Estados e era destinada ao acúmulo de rejeitos resultantes do processo de mineração de carvão. Foram registradas 125 fatalidades com uma população em risco estimada 5.000 pessoas, resultando em uma taxa de fatalidade 0,025. O risco hidrodinâmico estimado na região com maior concentração de fatalidades foi entre 90 ft²/s (8,4 m²/s) e 160 ft²/s (14,9 m²/s). Não houve um alerta adequado e os dados obtidos do caso foram considerados consistentes, pelo fato do evento ter sido extensivamente estudado, possuindo relatos convergentes entre as fontes.

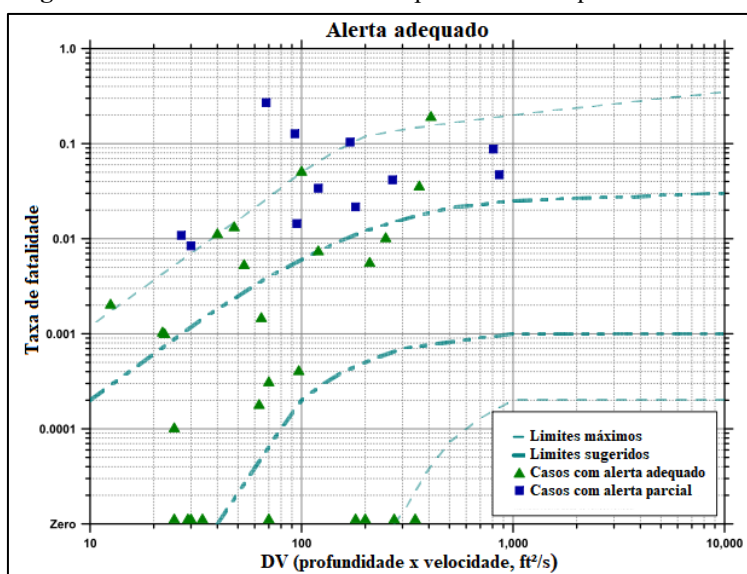
gráficos, divergentes pela tipologia de alerta existente, com 80 pontos no total que relacionam a taxa de fatalidade e o risco hidrodinâmico, calculado pela relação das profundidades vs. velocidades de escoamento (DV). A Figura 1 apresenta o gráfico recomendado para os casos de pouco ou sem alerta (*little or no warning*) e a Figura 2 apresenta o caso de alertas adequados.

Figura 1: Taxa de fatalidade vs. DV para pouco ou sem alerta – RCEM.



Fonte: Adaptado de USBR (2015).

Figura 2: Taxa de fatalidade vs. DV para alerta adequado – RCEM.



Fonte: Adaptado de USBR (2015).

Os 11 casos de alerta parcial para cada tipologia de gráfico são eventos em que o alerta não foi claro ou em que o alerta foi diferente para várias partes da população em risco. Como esses casos se enquadram entre as tipologias de pouco ou sem alerta e alerta adequado, esses foram incluídos nos dois gráficos. Os casos de pouco ou sem alerta representam situações em que a grande maioria da população em risco recebeu uma notificação inadequada sobre a ameaça existente, resultando na incapacidade total ou parcial de evacuação da planície de inundação. Já o caso de alerta adequado descreve uma situação na qual a população em risco recebe uma informação que a evacuação em uma quantidade de tempo a ser definida em função das características do estudo de caso. Cada gráfico possui linhas tracejadas que representam os limites sugeridos e máximos para as taxas de fatalidade

em toda a faixa de valores de DV. Os limites sugeridos foram selecionados com base nos pontos de dados históricos de casos mais representativos para cada cenário sem formulação matemática ou considerações estatísticas das curvas. Os limites máximos destinam-se a representar os limites superior e inferior das taxas de fatalidades, os quais abrangem praticamente todo o histórico de casos.

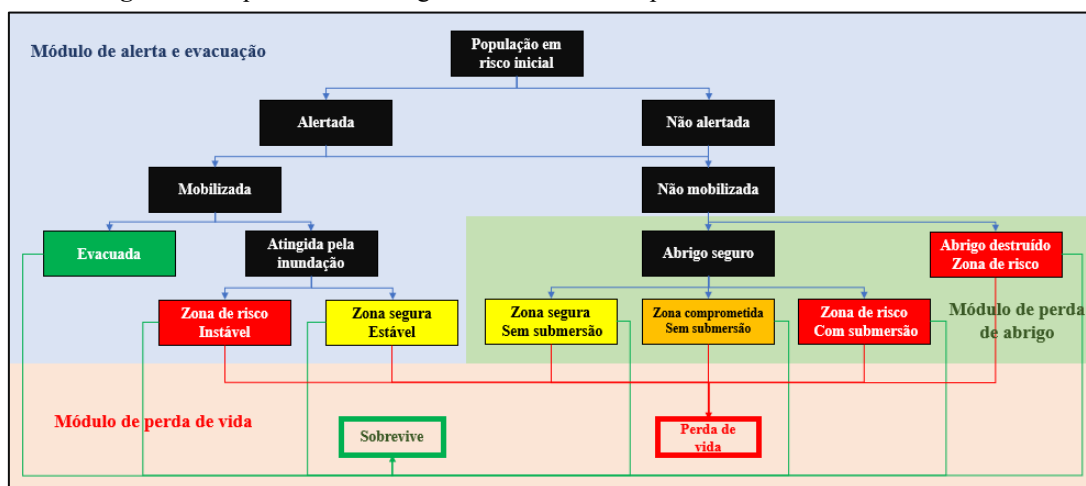
Para aplicação do modelo, é recomendada a divisão da região afetada em diversos trechos determinados pelas características de cada evento e local. As estimativas de perdas de vidas devem ser justificadas pela construção do caso, o que inclui a comparação aos históricos de casos relevantes, os quais possuem uma compilação completa em USBR (2014a). É destacada ainda a preferência por seleção de faixas de taxas de fatalidades e de DV, ao invés de valores pontuais.

HEC-LIFESIM

Aboelata e Bowles (2005), com a justificativa de suprir as limitações das estimativas de perdas de vidas por modelos empíricos, apresentaram o modelo de estimativa de perdas de vidas dinâmico LifeSim. O modelo é estruturado por meio de um sistema de modelagem modular, no qual cada módulo troca informação com o outro por meio de um banco de dados que inclui diversas camadas e tabelas de sistemas de informações geográficas. Os quatro principais módulos presentes na metodologia são: 1) o módulo de rotina da inundação, que apresenta, ao longo de toda área e período, as características da inundação; 2) o módulo de perda de abrigo, que simula a exposição de pessoas em construções durante cada evento como resultado de danos estruturais e critérios de submersão; 3) o módulo de alerta e evacuação, que simula a distribuição e dinâmica da população em risco após a emissão do alerta; e 4) o módulo de perda de vida, que estima as perdas por meio de distribuições de probabilidades apresentadas por Aboelata *et al.* (2003).

O modelo LifeSim foi incorporado pelo *United States Army Corps of Engineers* (USACE) em uma versão mais simplificada no programa HEC-FIA e, posteriormente, foi incorporado integralmente no HEC-LifeSim 1.0.1. Um esquema geral demonstrando as interações entre esses módulos é apresentado na Figura 3. O módulo de rotina da inundação interage com os outros por meio de trocas de informações pelas diversas camadas de sistemas de informações geográficas.

Figura 3: Esquema da abordagem de estimativa de perdas de vidas do HEC-LifeSim.

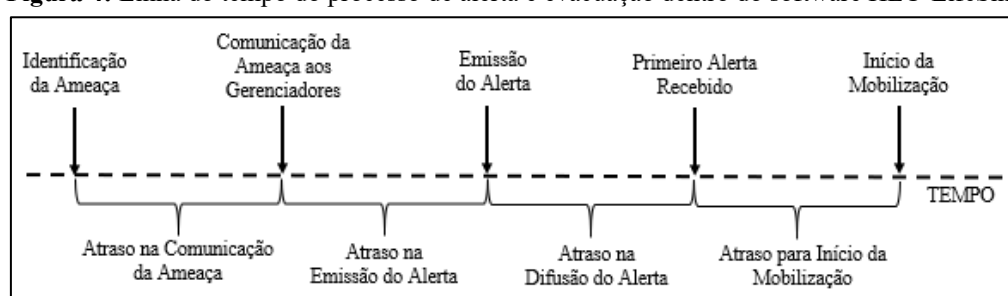


Fonte: Adaptado de Bowles (2007).

Além disso, simulações de Monte Carlo são utilizadas para quantificar a incerteza aleatória no processo de alerta e evacuação, e no potencial de perdas de vidas. Diversos parâmetros do modelo podem ser inseridos considerando suas variabilidades, permitindo também se quantificar as incertezas epistêmicas existentes.

Um dos principais módulos quanto à análise de eficiência do planejamento de emergência é o de alerta e evacuação. O módulo representa a distribuição e o comportamento da população durante o evento de inundação. Esse processo possui diversos marcos que são separados por intervalos de atraso no tempo como demonstrado na linha do tempo da Figura 4. A linha do tempo se inicia quando há a identificação da ameaça iminente e apresenta o primeiro atraso em relação à comunicação da ameaça aos gerenciadores do risco. Nessas situações não existem estudos que auxiliem na determinação desses valores; sendo assim, o usuário deve determinar o tempo considerando as características do caso analisado. Diferentemente, os outros três atrasos subsequentes possuem pesquisas que embasam a escolha do tempo utilizado por meio de estudos e equações propostas, conforme apresentado por Sorensen e Mileti (2015 a, b, c). Em relação à dinâmica da evacuação, o modelo de transporte de Greenshields *et al.* (1935) é utilizado para representar os efeitos da densidade do tráfego e capacidade da via na velocidade dos veículos.

Figura 4: Linha do tempo do processo de alerta e evacuação dentro do software HEC-LifeSim.



Fonte: Adaptado de USACE (2018).

MATERIAIS E MÉTODOS

Ruptura da barragem de Fundão (Município de Mariana)

Os rejeitos armazenados eram provenientes do processo de mineração de ferro. No dia cinco de novembro de 2015, às 15h45, a barragem entrou em colapso e em menos de 30 minutos a onda de cheia alcançou o distrito de Bento Rodrigues após galgamento, sem a ruptura, da barragem de Santarém, a jusante da primeira, que possuía a finalidade de controlar o carreamento de sedimentos e captação de água. A onda de rejeitos fluíu mais de 640 quilômetros, passando pelo córrego Santarém, pelo rio Gualaxo do Norte, pelo Rio do Carmo, e pelo Rio Doce, alcançando por fim, o litoral do Espírito Santo. Foram desprendidos 32 milhões de metros cúbicos de rejeitos da barragem de Fundão, dos quais 1,2 milhão de métricos cúbicos foi retido durante o processo de galgamento na barragem de Santarém. O material propagado possuía o teor de sólidos de 47,5% (Machado, 2017).

No que concerne o alerta e evacuação do local, sabe-se que não existia sistema e alerta. Porém, uma funcionária terceirizada da empresa responsável pelo empreendimento recebeu um chamado de emergência logo após o rompimento e percorreu as ruas do distrito Bento Rodrigues de motocicleta alertando as pessoas a fugirem. A partir disso, cerca de 300 pessoas que estavam em Bento Rodrigues no horário do evento começaram a se mobilizar e se deslocar até locais elevados. No registro de 19 pessoas entre vítimas fatais e desaparecidos, 14 estavam trabalhando no complexo minerador e 5 estavam no Distrito (Dieguez, 2016).

Modelagem hidrodinâmica e mapeamento da área inundada

Em um estudo de retroanálise, Machado (2017) obteve o hidrograma de ruptura, com vazão e tempo de pico de 21.842 m³/s e 19 minutos, respectivamente, considerando a propagação a partir do galgamento da barragem de Santarém. Esse hidrograma foi utilizado neste estudo para simulação e obtenção das características da inundação por meio do uso do HEC-RAS 5.0.7, considerando a modelagem de escoamento bidimensional em regime não-permanente e com uso das equações completas de *Saint-Venant*. Para representar a resistência do escoamento de rejeitos em um modelo

que adota em sua solução numérica o fluxo aquoso, foi utilizada a técnica de coeficiente de resistência combinada (Jin e Fread, 1999), na qual há uma alteração do coeficiente de rugosidade Manning em função da viscosidade cinemática do rejeito, conforme apresentado por Travis *et al.* (2012). A viscosidade cinemática foi obtida pelo estudo reológico de Machado (2017) em pontos do acidente de Mariana. Para concentração volumétrica de 47,5% de sólidos, foi observado um valor de viscosidade cinemática de $2,57 \times 10^{-6}$ m²/s, resultando no valor de 1,43 para o fator de correção do coeficiente de Manning (determinado por indicações de valores para classes de uso do solo). Apesar das incertezas relacionadas a essas premissas simplificadoras, os resultados da modelagem, em termos de extensão da inundação e tempo de propagação da onda foram similares aos observados.

Análise de exposição

O inventário de construções caracterizando as estruturas e a população em risco presentes nas regiões afetadas pela inundação é uma das etapas necessárias para concepção de um modelo de estimativa de fatalidades. Neste estudo, foram utilizados os recortes estatísticos e os microdados do Censo demográfico de 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

A população e quantidade de domicílios foram determinadas pela grade estatística do IBGE, que é um conjunto de grades regulares com intuito de integrar dados de origens diversas e agregados em unidades geográficas incompatíveis. A menor unidade geográfica de resultados do Censo demográfico é o setor censitário, o qual não possui uma forma homogênea. Desse modo, por meio de processos estatísticos de agregação e desagregação, informações contidas nesses setores censitários são transferidas para áreas de 1 km x 1 km em zonas rurais e 200 m x 200 m em zonas urbanas, homogêneas e sem variação ao longo do tempo (IBGE, 2016). Para cada grade presente na região afetada pela inundação, foram alocadas geograficamente as residências com auxílio de imagens de satélite e a população por domicílio foi considerada de forma homogênea em toda extensão dessa grade. As demais tipologias de construções foram obtidas por meio da análise dos mapas e descritivos dos setores censitários, os quais descrevem cada setor censitário, apresentando, além de construções diferentes de domicílios, descrições do perímetro.

Para caracterização dos domicílios e da população desses domicílios e das demais tipologias de construções, foram utilizadas as amostras de domicílios e de pessoas existentes nos microdados do Censo demográfico de 2010. As amostras dos microdados são os resultados mais brutos do Censo, contendo todas as informações levantadas nas entrevistas realizadas nos domicílios. Por questões de sigilo em relação aos informantes da pesquisa, a menor unidade geográfica para identificação dos microdados é a área de ponderação, a qual é formada por agrupamento de setores censitários (IBGE, 2010). Com isso, os resultados obtidos considerando as áreas de ponderação de interesse foram arranjados de maneira proporcional e distribuídos de forma homogênea na região afetada. As variáveis utilizadas foram selecionadas por meio do dicionário de descrição das variáveis do Censo de 2010 (IBGE, 2010). Com a amostra de domicílios, foi possível determinar o material de construção e tipo de ocupação. Com a amostra de pessoas, além da determinação da população presente em casa no período da tarde (momento da ruptura), foi utilizado também o critério de mobilidade (utilizado no HEC-LifeSim), classificando a população com menos e mais de 65 anos.

Estimativa de perdas de vidas

Para o RCEM, a determinação do fator de severidade foi realizada com base na metodologia utilizada por Meneses *et al.* (2015), a qual consiste na determinação do DV para cada propriedade dentro da área afetada pela inundação. As diretrizes apresentadas no guia de USBR (2015) e exemplos de aplicação do modelo apresentados em USBR (2014b) sugerem que a extensão da inundação seja dividida em trechos tanto a montante quanto a jusante através da planície de inundação para explicar as diferenças no risco hidrodinâmico (fator DV), tempo de alerta e características da população em risco. Entretanto, segundo Meneses *et al.* (2015), que analisaram a aplicação do RCEM, tal

metodologia introduz subjetividade na aplicação do modelo face à possibilidade de escolha de diversos números de trechos.

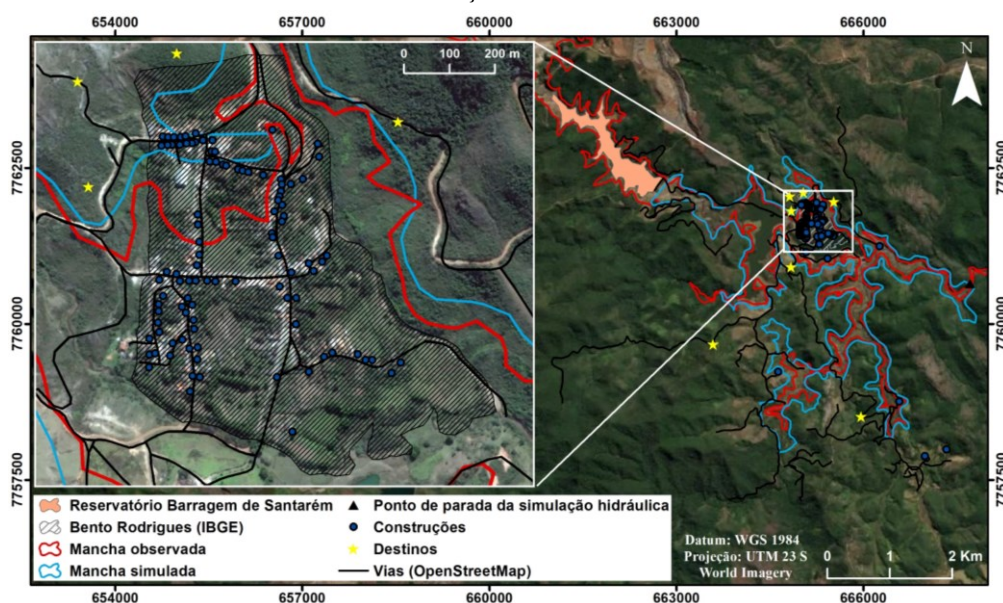
Foram utilizados os seguintes dados de entrada no HEC-LifeSim: o pós processamento da simulação hidráulica; o inventário de construções obtido na etapa de análise de exposição; o sistema viário existente; os destinos adotados para evacuação; e a caracterização do sistema de alerta. Para o sistema viário, a malha foi obtida por meio da importação direta disponível no HEC-LifeSim do arruamento existente na base de dados do *OpenStreetMap*. Os destinos foram alocados em diversas regiões externas aos limites de inundações.

Como já se possuía um conhecimento prévio de como ocorreu o processo de evacuação, a identificação da ameaça e os atrasos da linha do tempo do processo de alerta e de evacuação, foram baseados nas recomendações de Sorensen e Mileti (2015 a, b, c). Por fim, para representação probabilística do modelo, foram realizadas 1.000 interações considerando as incertezas definidas nas etapas do processo de evacuação e as distribuições de probabilidade de taxas de fatalidade apresentadas por Aboelata *et al.* (2003). Tal número foi escolhido por ser equivalente ao utilizado por Hill *et al.* (2018) na análise de perdas de vidas em casos de rupturas de barragens de água na Austrália.

RESULTADOS

Assim como observado por Machado (2017), a mancha de inundação simulada apresentou maiores regiões que superestimaram (17% em Bento Rodrigues) a mancha observada (Figura 5). Tal representação pode impactar a avaliação de risco. Por exemplo, a maior distância percorrida a mais pela população para sair da mancha simulada alcança aproximadamente no máximo 200 metros no Distrito. Essa superestimação, além da simplificação para representação da resistência do fluxo de rejeitos e do próprio hidrograma de ruptura utilizado, se deve muito ao fato da topografia, com a disponibilização de dados detalhados de topografia limitada apenas às cotas de fundo do córrego Santarém. Há um grande amortecimento na vazão a montante e logo jusante de Bento Rodrigues, devido ao espalhamento da inundação causado por presença de grandes áreas planas.

Figura 5: Foco em Bento Rodrigues com a envoltória da mancha de inundação simulada e observada, os dados de vias, as construções e os destinos.



Na simulação realizada, o tempo chegada da inundação foi de aproximadamente de 23 minutos, com a região de Bento Rodrigues totalmente afetada em 30 minutos e apresentando a profundidade máxima aproximadamente entre oito e 10 metros em torno de uma hora após a ruptura. Diversos

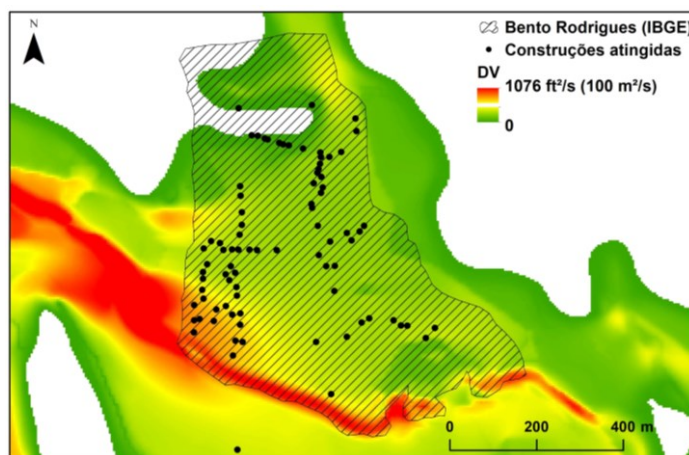
documentos e testemunhas relatam que o tempo de chegada da onda de inundação em Bento Rodrigues foi menor que 30 minutos (Dieguez, 2016 e Machado, 2017).

Por meio da análise das grades estatísticas atingidas pela inundação, foram observados 104 domicílios com uma população de 506 pessoas. Na caracterização dos domicílios, houve uma predominância de tipologia residencial unifamiliar (98,9%) e do material de construção de alvenaria (99%). Já na caracterização da população, foi observado que 58,3% (295) das pessoas permaneceriam nos domicílios durante à tarde. Analisando os mapas dos setores censitários de Mariana, foram identificadas uma escola e uma igreja. Utilizando a população total estimada para região de interesse (506) para ponderação, visto o isolamento do distrito de Bento Rodrigues, as populações estimadas foram de 61 e zero, respectivamente. Há relatos sobre a presença de cerca de 300 pessoas em Bento Rodrigues, com 60 pessoas na escola no dia do evento (Dieguez, 2016). Tal informação demonstra consonância do estimado neste trabalho com o ocorrido. No cruzamento de dados da mancha simulada e da análise de exposição, foram verificadas 87 construções presentes dentro do limite da mancha de inundação simulada com uma população total de 304 no período da tarde.

Na região de Bento Rodrigues, o maior valor e a média calculada para o risco hidrodinâmico nas construções foi de 535 ft²/s (49,7 m²/s) e de 242 ft²/s (22,5 m²/s), respectivamente. Entre as 87 construções atingidas, apenas três não alcançaram 10 ft²/s, valor inicial da aplicação das taxas de fatalidade do método. A Figura 6 ilustra o fator DV máximo e construções atingidas.

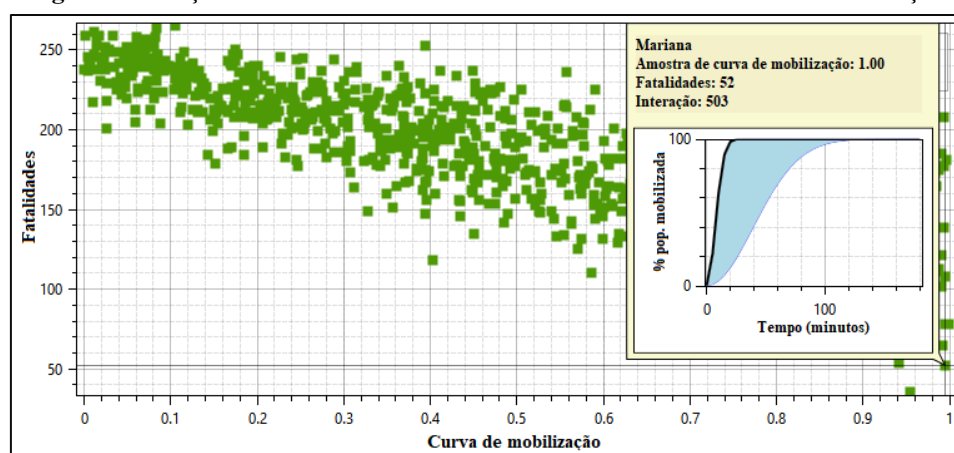
Adotou-se o intervalo entre o limite mínimo e o mínimo sugerido do gráfico de pouco ou sem alerta (Figura 1), região que é próxima dos casos de alerta parcial e que contém o único caso de ruptura de barragens de rejeitos (Buffalo Creek). Mesmo que observada a mobilização, não houve um aviso oficial emitido para a população. Além disso, o tempo de chegada da onda de inundação foi muito curto, o que limita o tempo para evacuação. Com isso, utilizando a metodologia de determinação do DV e da taxa de fatalidade por construção proposta por Meneses *et al.* (2015), foi obtida uma faixa de fatalidades de 31 a 77, superestimando o evento real ocorrido.

Figura 6: Fator DV (risco hidrodinâmico) e construções atingidas pela inundação simulada em Bento Rodrigues.



Para aplicação do HEC-LifeSim, foi utilizado o inventário de construções obtido na etapa de análise de exposição, o sistema viário retirado do *OpenStreetMap* e os destinos adotados neste trabalho para evacuação na região afetada, dispostos na Figura 5. Após a caracterização do alerta por meio das recomendações de Sorensen e Mileti (2015 a, b, c) e dos acontecimentos no momento da ruptura, a simulação com 1.000 interações foi realizada. Os resultados apontaram um valor mínimo, máximo e de mediana de fatalidades, de 36, 265 e 189, respectivamente. Os valores obtidos superestimam em muito os do evento real ocorrido de cinco pessoas entre vítimas fatais e desaparecidos em Bento Rodrigues, assim como obtido por Matos e Eleutério (2019) em uma análise do mesmo evento, utilizando HEC-LifeSim, mas em um cenário prospectivo da inundação.

Figura 7: Relação entre número de fatalidades e o intervalo de curvas de mobilização.



A inundação simulada alcança o distrito de Bento Rodrigues em torno de 23 minutos. Tal período não foi suficiente para que o modelo representasse a real evacuação ocorrida. Na situação mais favorável, analisando a caracterização do alerta e da evacuação adotada, seriam necessários 49 minutos para integral evacuação da população. Entre os atrasos definidos na caracterização do alerta e da evacuação, o atraso na mobilização é a mais impactante na estimativa de fatalidades. Isso ocorre pelo fato de a faixa de curvas de porcentagem de população mobilizada vs. tempo adotada no trabalho ser mais ampla comparada aos outros atrasos. As interações que utilizaram curvas próximas ao limite inferior do intervalo obtiveram uma concentração de fatalidades bem elevada. Já para interações que utilizaram curvas mais próximas ao limite superior, foram observados números de fatalidade menores e menos concentrados devido à influência dos outros atrasos. A Figura 7 exemplifica essa tendência.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Além da incerteza presente na análise de exposição para estimativa da população, essa superestimação de fatalidades simuladas possivelmente também tem influência da superestimação da mancha da inundação. Pela simulação hidráulica, foram atingidas 12 construções e 36 pessoas a mais que o observado. Outro fator é a alta mobilização da população existente. Mesmo na ausência de alerta formal, o caso possuiu uma rápida evacuação da população, o que é de difícil representação nos modelos em casos de inundações com tempo de chegada da onda de inundação muito curto. Essas tipologias de casos dificilmente são presenciadas e, com isso, não devem estar presentes na compilação dos eventos históricos considerados para elaboração dos modelos e caracterização do alerta e evacuação. A superestimação também foi resultado do estudo de Risher *et al.* (2017) em um estudo de validação do HEC-LifeSim para uma inundação causada por ruptura de dique no Japão, possuindo as mesmas características de evacuação e de severidade, na qual foi simulado um número de fatalidades entre 10 e 20 vezes maior que o real ocorrido.

Foi verificado que os resultados se assemelham ao obtido na comparação entre o RCEM e o HEC-LifeSim por Hill *et al.* (2018). Assim como no estudo de caso de Mariana, a estimativa de fatalidades causadas por ruptura de barragens de água na Austrália pelo HEC-LifeSim foi superior ao RCEM nos locais que possuíam uma grande concentração de população próxima à barragem, em que a onda de inundação com tempo de chegada curto limitou o tempo disponível para população em risco receber e agir sobre uma ordem de evacuação e em locais que possuíam alta severidade de inundação causando a destruição de construções.

Apesar do modelo HEC-LifeSim possuir, de maneira geral, limitações em representar situações com alta mobilização da população e com tempo de chegada da inundação muito curto, ele apresenta diversas vantagens em comparação ao modelo empírico RCEM: inclui a possibilidade de simulações de Monte Carlo para avaliar as incertezas das estimativas; a capacidade de avaliar a resposta da população de maneira detalhada e dinâmica; e a possibilidade de edição dos critérios de estabilidade

de construções e de pessoas em inundações, dos limiares das zonas de inundação e das distribuições de probabilidade de taxas de fatalidade. Além disso, no HEC-LifeSim, há também ferramentas de animações que fornecem um modo mais ilustrativo de comunicação das possíveis consequências da ruptura de uma barragem para as partes interessadas.

Por fim, testes de sensibilidade e análises de incertezas relacionadas ao tipo de escoamento, às faixas e características de alerta utilizadas pelo modelo e ao hidrograma de ruptura são importantes para se discutir com mais detalhamento os resultados comparativos encontrados. Esses estudos estão em andamento e serão objeto de publicações mais extensas sobre o tema.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, ao CNPQ, à FAPEMIG e à UFMG pelo amparo concedido para o desenvolvimento de pesquisas relacionadas ao tema.

REFERÊNCIAS

- ABOELATA, M. A.; BOWLES, D. S.; MCCLELLAND, D. M. (2003). “*A Model for Estimating Dam Failure Life Loss*” in Anais do Australian Committee on Large Dams Risk Workshop. Launceston, Tasmania, Australia.
- ABOELATA, M. A.; BOWLES, D. S. (2005). *LIFESim: a model for estimating dam failure life loss*. USACE.
- AZAM, S.; LI, Q (2010) “*Tailings dam failures: a review of the last one hundred years*”. Geotechnical News 28(4), pp. 50-54.
- BOWLES, D. S. (2007). “*Life Loss Estimation for RAMCAP*” in *Appendix D in Conventional Dams and Navigation Locks, SSG, RAMCAP*. LLC.
- DIEGUEZ, C. (2016). “*A onda. Uma reconstituição da tragédia de Mariana, o maior desastre ambiental do país*”. Folha de São Paulo.
- GRAHAM, W. J (1999). *A procedure for estimating loss of life caused by dam failure*. USBR.
- GREENSHIELDS, B. D.; CHANNING, W.; MILLER, H. (1935). “*A study of traffic capacity*” in Anais do XIV Annual Meeting of The Highway Research Board Held at Washington. Washington DC, Estados Unidos.
- HILL, P.; KAVANAGH, C.; LANG, S.; NORTHFIELD, S. (2018). “*Applications of Simulation Model to Estimate Potential Loss of Life*” in Anais do XXVI ICOLD, Vienna, Austria.
- IBGE. (2010). *Descrição das variáveis da amostra do Censo Demográfico 2010*. Rio de Janeiro.
- IBGE. (2016). *Grade Estatística*. Rio de Janeiro.
- ICOLD. (2001). *Risk of Dangerous Occurrences, Lessons Learnt from Practical Experiences, Bulletin 121*. Paris, França, 146 p.
- JIN, M.; FREAD, D. (1999). “*1D modeling of mud/debris unsteady flows*”. Journal of Hydraulic Engineering, 125(8), pp. 827-834.
- MACHADO, N. C. *Retroanálise da Propagação Decorrente da Ruptura da Barragem do Fundão com Diferentes Modelos Numéricos e Hipóteses de Simulação*. 2017. 159f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) — UFMG.
- MATOS, A. C. S.; ELEUTÉRIO, J. C. (2019). “*Análise de Perdas de Vidas Associadas à Ruptura Hipotética da Barragem de Fundão*” in Anais do XXIII SBRH, Foz do Iguaçu, Paraná.
- MENESES, C.; LANG, S.; HILL, P.; ARNOLD, M. (2015). “*Towards consistency in potential loss of life estimates: Testing the new Reclamation Consequence Estimating Methodology*” in Anais da ANCOLD Conference, Brisbane, Queensland, Austrália.
- RICO, M.; BENITO, G.; DIEZ-HERRERO, A. (2008). “*Floods from tailings dam failures*”. Journal of hazardous materials, 154(1-3), pp. 79-87.

- RISHER, P.; ACKERMAN, C.; MORRILL-WINTER, J.; FIELDS, W.; NEEDHAM, J. (2017). “*Levee Breach Consequence Model; Validated by Case Study in Joso, Japan*” in Anais da XX ASDSO Conference, San Antônio, Estados Unidos.
- SILVA, A. F. R.; ELEUTÉRIO, J. C. (2019). “*Simulação de Perdas de Vidas Causadas por Inundações: Modelos Disponíveis e Aplicações Comparativas*” in Anais do XXIII SBRH, Foz do Iguaçu, Paraná.
- SORENSEN, J., MILETI, D., (2015a). *First Alert and/or Warning Issuance Time Estimation for Dam Breaches, Controlled Dam Releases, and Levee Breaches or Overtopping*. USACE
- SORENSEN, J.; MILETI, D. (2015b). *First Alert or Warning Diffusion Time Estimation for Dam Breaches, Controlled Dam Releases and Levee Breaches or Overtopping*. USACE.
- SORENSEN, J.; MILETI, D. (2015c). *Protective Action Initiation Time Estimation for Dam Breaches, Controlled Dam Releases, and Levee Breaches or Overtopping*. USACE.
- TRAVIS, B.; TEAL, M.; GUSMAN, J. (2012). “*Best methods and inherent limitations of bulked flow modeling with HEC-RAS*”. in Anais do EWRI Congress, Albuquerque, Estados Unidos.
- USACE. (2018). *Life Loss Estimation – User’s Manual. Version 1.0.1*. Davis, Califórnia.
- USBR. (2014a). *Reclamation Consequence Estimating Methodology – Dam Failure and Flood Event Case History Compilation*. Denver, Colorado.
- USBR. (2014b). *Reclamation Consequence Estimating Methodology – Examples of Use*. Denver, Colorado.
- USBR. (2015). *Reclamation Consequence Estimating Methodology – Interim Guidelines for Estimating Life Loss for Dam Safety Risk Analysis*. Denver, Colorado.
- WISE. (2021). *Chronology of Major Tailings Dam Failures*.