



# Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



## **Análise da propagação de cheias resultante de rompimentos em cascata hipotéticos de barragens localizadas no município de Caruaru-PE**

Amanda Machado Pereira<sup>1</sup>, Simone Rosa da Silva<sup>2</sup>, Hudson Tiago dos Santos Pedrosa<sup>3</sup>, Ilton Santos Alves<sup>4</sup>, Júlio Tenório de Oliveira<sup>5</sup>, Jorge José de Andrade Junior<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Engenheira Civil pela Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Rua Benfica, 455, Recife – Pernambuco. CEP: 50.720-001. [amp@poli.br](mailto:amp@poli.br).

<sup>2</sup> Professora Dra. Associada pela Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Rua Benfica, 455, Recife – PE, CEP: 50.720-001, [simonerosa@poli.br](mailto:simonerosa@poli.br). <sup>3</sup> Doutorando em Recursos Hídricos pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE - CEP: 50670-901. [hudsontsp@gmail.com](mailto:hudsontsp@gmail.com). <sup>4</sup> Mestre em geotecnia pela Universidade Federal de Pernambuco. Av. da Arquitetura, s/n - Cidade Universitária, Recife - PE, CEP: 50740-550. [ilton.alves@ufpe.br](mailto:ilton.alves@ufpe.br). <sup>5</sup> Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal Rural de Pernambuco, Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE - CEP: 50670-901. [julio.tenoriooliveira@ufpe.br](mailto:julio.tenoriooliveira@ufpe.br). <sup>6</sup> Mestrando pela Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Rua Benfica, 455, Recife – Pernambuco. CEP: 50.720-001. [jorge.engdobrasil@gmail.com](mailto:jorge.engdobrasil@gmail.com).

Artigo recebido em 03/03/2023 e aceito em 15/01/2024

### **RESUMO**

A ruptura em série de barragem pode gerar danos catastróficos para a população localizada a jusante e ao meio ambiente. Diante disso, o presente estudo tem como objetivo fazer uma análise entre os resultados gerados pela ruptura hipotética em cascata de quatro barragens situadas na cidade de Caruaru-PE. Foram realizadas três simulações hidrodinâmicas, com a finalidade de prever se o rompimento de uma das barragens em análise resultaria no rompimento em cascata dos barramentos a jusante. Além disso, foram comparados os hidrogramas de ruptura calculados através dos softwares HEC-HMS e HEC-RAS, utilizados para gerar os mapas de inundação a fim de analisar as potenciais áreas atingidas. A metodologia foi baseada em: descrição da área de estudo como características técnicas da barragem, desenvolvimento do hidrograma de ruptura por meio do software HEC-HMS 4.8 e simulação de ruptura nos três cenários analisados, através do software HEC-RAS 6.2. Foi constatado, por meio das modelagens hidrodinâmicas, que nos três cenários, o rompimento da barragem a montante geraria o rompimento em cascata do barramento a jusante. Também foi possível concluir que as vazões de rupturas, obtidas com a simulação do HEC-HMS são maiores que as obtidas com o HEC-RAS. Além disso os mapas de velocidade, profundidade e intensidade apresentaram manchas semelhantes no primeiro e segundo cenário para os níveis de perigo e o terceiro cenário níveis mais altos. Almeja-se com os resultados encontrados, auxiliar na elaboração de medidas mitigadoras para minimizar os danos gerados pelo eventual rompimento das barragens em estudo.

Palavras-chave: modelagem hidrológica, ruptura de barragens, macha de inundação.

## **Analysis of flood propagation resulting from hypothetical cascade breaks of dams located in the city of Caruaru-PE**

### **ABSTRACT**

The serial dam break can generate catastrophic damage to the population downstream and to the environment. Therefore, the present study aims to analyze the results generated by the hypothetical cascade break of four dams in the city of Caruaru-PE. Three hydrodynamic simulations were carried out to predict whether the break of one of the dams under analysis would result in the cascade break of the downstream dams. Furthermore, the rupture hydrographs, calculated using the softwares HEC-HMS and HEC-RAS, were compared, being the softwares responsible for generating the flood maps used to analyze the potentially affected areas. The methodology was based on: description of the study area, such as the technical characteristics of the dam, development of the rupture hydrograph through the HEC-HMS 4.8 software and rupture simulation in the three analyzed scenarios through the HEC-RAS 6.2 software. It was found, through hydrodynamic modeling, that in the three scenarios, the upstream dam break would generate the cascade break of the downstream dam. It was also possible to conclude that the failure flows obtained with the HEC-HMS simulation are higher than those obtained with the HEC-RAS. In addition, the velocity, depth and intensity maps showed similar spots for the danger levels in the first and second scenario, and highest levels in the third scenario. With the results found, it is intended to help in the elaboration of mitigating measures to minimize the damage generated by the eventual break of the dams under study.

Keywords: hydrological modelling, dambreak, flood stain.

## Introdução

Barragens podem oferecer, de acordo com a sua finalidade, diversas vantagens para a população como controle de cheias, geração de energia elétrica, abastecimento humano e industrial (ANA, 2021; Rolo et al., 2022; Sousa et al., 2022). Essas estruturas estão diretamente ligadas ao progresso da sociedade, desde as civilizações mais antigas que se desenvolveram próximo a lugares que tinham uma boa oferta de recursos hídricos. Consequentemente, à medida que a sociedade avançava, com o aumento da população, industrialização, urbanização e a ampliação da atividade agrícola houve um aumento nas demandas de uso da água, energia elétrica e de mineração (Albu, Sobrinha, & Brandão, 2019; Auréli et al., 2021; Pereira et al., 2021). Para suprir essa necessidade hídrica houve um acréscimo no número de pequenas barragens principalmente em regiões rurais e áridas (Lima et al., 2022).

Todavia, do mesmo modo que as barragens exercem uma função importante no gerenciamento dos recursos hídricos, em caso de colapso, podem provocar acidentes trágicos, raramente tais catástrofes acontecem, porém quando ocorrem por gerarem danos e morte de pessoas resultam em situações extremas (Sabău & Șerban, 2018; Rolo et al., 2022; Armada, 2021; Fernandes et al., 2021; Rossi et al., 2021; Maranzoni & Tomirotti, 2023; Rizzo et al., 2023; Sumira et al., 2023).

Nas barragens em cascata, devido à energia associada ao material contido no reservatório, esse sistema de barragem apresenta risco para a bacia localizada a jusante (Hu et al., 2020; Campos & Saliba, 2023). Na hipótese da ruptura em cascata de barragens, a jusante das estruturas que entraram em colapso, o cenário se torna ainda mais catastrófico, pois a capacidade de dano aumentaria juntamente com a vazão de pico de ruptura da barragem a jusante (Zhou et al., 2020; Zhu et al., 2021). A inundação gerada pelo rompimento em série de barragens é influenciada por diversos fatores, como os volumes dos reservatórios, o grau de rompimento da barragem a montante, a capacidade dos reservatórios inferiores de deter a onda de inundação e as características da planície de inundação (Ríha et al., 2020). Casos de rompimento em cascata de barragem ocorreram recentemente como Edenville e Sanford em 19 de maio de 2020, ou Xinfa e Yongan em 18 de julho de 2021, ou Annamayya e Pincha em 19 de novembro de 2021, porém embora existam diversas barragens em cascadas, estudos que abordem o assunto são escassos (Vogel et al., 2022).

No Brasil, cresce o número de barragens a cada ano e por consequência aumenta o risco associado à ruptura de barragens (Tschieldel & Paiva, 2018), no ano de 2022 foram relatados 24 acidentes e 58 incidentes, um aumento significativo em relação ao ano anterior (ANA, 2023). No país a regulamentação de segurança de barragens é regida pela Lei nº12.334 de 20 de setembro de 2010 que determina a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e deu origem ao Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), atualizada pela Lei nº14.066 de 30 de setembro de 2020. É dever do empreendedor da barragem elaborar o Plano de Segurança de Barragem (PSB) e o Plano de Ação de Emergência (PAE), quando o barramento apresenta pelo menos uma das seguintes condições: volume de armazenamento maior ou equivalente a 3.000.000 m<sup>3</sup>; altura do maciço de no mínimo 15 m; o material retido no seu reservatório é classificado como perigoso segundo as técnicas aplicáveis; se for classificado como médio ou alto para o dano potencial associado (DPA); ou quando segundo o fiscalizador a barragem apresenta um nível de risco alto.

Serão analisadas nesse estudo as barragens de Serra dos Cavalos e Guilherme de Azevedo que pertencem ao Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) e as barragens Jaime Nejaim e de Taquara que tem como órgão empreendedor a Companhia Pernambucana de Saneamento (Compesa) (Compesa, 2019a; Compesa, 2019b). As quatro estruturas estão localizadas na cidade de Caruaru, no interior de Pernambuco. Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB, 2022) as barragens apresentam nível alto para o Dano Potencial Associado assim como para Categoria de Risco. Por esse motivo, esse estudo irá analisar as consequências de possíveis rupturas em cascata dessas quatro barragens situadas a montante da cidade de Caruaru, em três cenários hidrológicos diferentes, elaborando mapas de inundação a fim de analisar e prever as áreas atingidas pela mancha de inundação, além de comparar os hidrogramas de ruptura dos softwares HEC-RAS e HEC-HMS, auxiliando na elaboração de novos estudos e em medidas para minimizar os danos gerado por tais eventos.

## Material e métodos

### Região em estudo

As quatro barragens desse estudo estão situadas no Agreste de Pernambuco, no município de Caruaru. A cidade possui aproximadamente 923,150 km<sup>2</sup> de área territorial e cerca de 314.912 habitantes (IBGE, 2020), sendo um polo de saúde e educação, além de dispor de duas rodovias federais e duas estaduais facilitando a conexão com outras cidades (Oliveira & Magalhães, 2019). Caruaru, conta também, com o importante Parque Natural Municipal Professor João Vasconcelos Sobrinho, que contribui para preservar o bioma

brasileiro mais degradado, a Mata Atlântica (Pernambuco, 2016). 7,3% do parque é ocupado por três grandes reservatórios: Serra dos Cavalos, Guilherme de Azevedo e Jaime Nejaím (Braga et al., 2002). Essas três barragens somadas à barragem Taquara serão analisadas neste estudo.

Para a delimitação da sub-bacia das barragens foi utilizado como base de dados o modelo digital do terreno (MDT) na escala de 1:5.000 do Programa Pernambuco tridimensional (PE3D) por meio do software Arc map 10.4.1, conforme mostra a Figura 1.

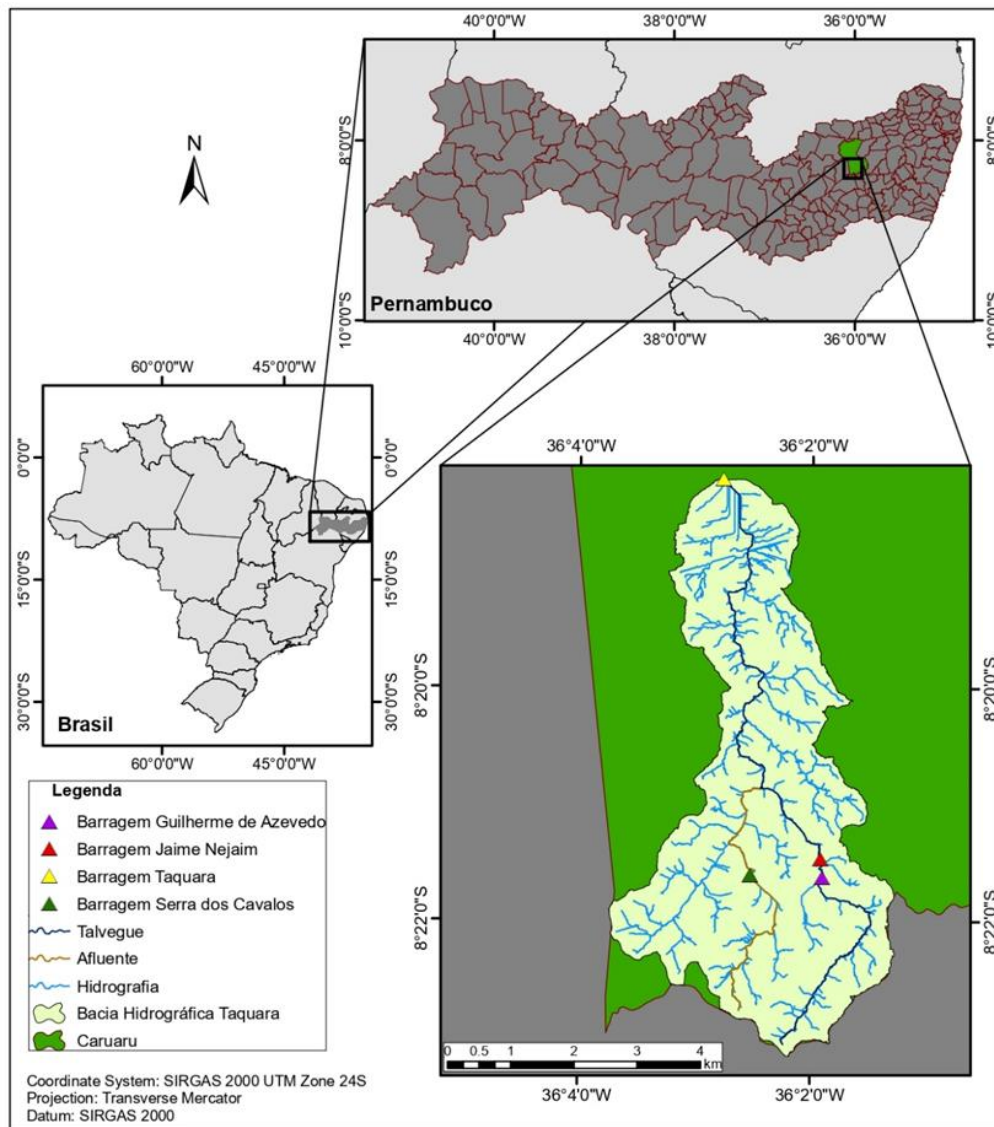


Figura 1. Mapa de localização da bacia hidrográfica das barragens em estudo. Elaborado pelos autores a partir de dados do IBGE (2021).

### Sistema em cascata de barragens

O rompimento de uma barragem a montante em um sistema em cascata pode resultar em sucessivos rompimentos gerando um “efeito dominó” (Collischonn & Tucci, 1997) de galgamento nas barragens existentes a sua jusante, que estejam barrando o mesmo curso d’água ou talvegue (Campos & Cardia, 2019). Uma catástrofe envolvendo esse tipo de sistema, ocorreu na China no ano de 1975, onde as barragens Banqiao e Shimantan, entraram em colapso, resultando em rupturas em série de mais de 60 barragens de pequeno porte localizadas a sua jusante, ocasionando a morte de aproximadamente 25.000 pessoas (Alves, 2019).

Neste trabalho serão analisadas rupturas hipotéticas de um sistema em cascata. Sistema caracterizado como misto (Zhou et al., 2020), pois o mesmo curso de água é barrado pelas barragens Taquara, Jaime Nejaim e Guilherme de Azevedo e a barragem Serra dos Cavalos barra um afluente deste curso d’água, podendo ser constatado na figura 1. O quadro 1 apresenta as principais características físicas das barragens citadas, os dados foram retirados por meio dos Planos de Segurança de Barragem das barragens Taquara, Jaime Nejaim e das Fichas Técnicas dos Açudes: Serra dos Cavalos e Guilherme de Azevedo.

Quadro 1 – Características físicas das barragens em estudo.

| Barragem             | Ano de construção | Curso d'água barrado       | Volume máximo (m³) | Altura (m) | Tipo                | Finalidade    | Órgão   |
|----------------------|-------------------|----------------------------|--------------------|------------|---------------------|---------------|---------|
| Taquara              | 1998              | Riacho Taquara             | 1.347.136          | 14,00      | Terra               | Abastecimento | Compesa |
| Jaime Nejaim         | -                 | Riacho Olho D'água         | 600.000            | 12,00      | Alvenaria de Pedras | Abastecimento | Compesa |
| Guilherme de Azevedo | 1959              | Riacho. Taquara e Olheiros | 786.000            | 15,40      | Terra               | Abastecimento | DNOCS   |
| Serra dos cavalos    | 1916              | Riacho Capoeirão           | 612.635            | 14,40      | Terra               | Abastecimento | DNOCS   |

Fonte: Elaborado pelos autores a partir de dados da Apac, Compesa e DNOCS.

### Cenários

Toda barragem pode colapsar, entretanto, vale ressaltar que a maioria dos rompimentos registrados, ocorreram em barragens constituídas de terra e associados a um evento de cheia (Brunner, 2014). Nesta pesquisa os tipos de rupturas simulados serão por galgamento (overtopping) ou erosão interna (piping). De acordo com DeNeale et al. (2019) o galgamento ocorre quando o nível do reservatório ultrapassa o nível da crista. Já o piping, de acordo com Brunner (2014) é o deslocamento do material interno para fora da barragem, originado devido a um vazamento que gera a erosão do material.

De acordo com a ANA (2016) os cenários de ruptura, deve seguir uma classificação rigorosa que abranja uma situação mais provável de acontecer e mais extrema. No cenário mais provável de acontecer, pode-se admitir a causa do colapso da estrutura por falha estrutural ou por piping sem a influência de precipitação utilizando uma vazão média anual, ou uma cheia decorrente de um tempo de retorno de 100 anos. Também pode-se admitir o galgamento como motivo da ruptura associado a um tempo de recorrência entre 1.000 e 5.000 anos (ANA, 2016).

Já no cenário mais extremo, o rompimento ocorre em um pequeno intervalo de tempo e de forma total, ou seja, todos os valores dos

parâmetros de formação de brecha devem ser ampliados. Por esse motivo, os parâmetros de formação da brecha e as vazões afluentes ao reservatório devem ser maiores gerando resultados mais desfavoráveis. Em dias de sol, a ANA recomenda utilizar uma cheia associada a um tempo de retorno de 100 e 500 anos. Em casos de ruptura por galgamento pode se utilizar um tempo de retorno de 5.000 e 10.000 anos (ANA, 2016).

Diante disso, a fim de analisar os possíveis rompimentos em cascata no sistema em estudo, foram realizados três cenários hidrológicos diferentes. Na primeira modelagem foi considerado que a barragem Serra dos Cavalos entraria em ruptura por piping com uma vazão afluente de um período de retorno de 100 anos. Na segunda simulação foi considerado o colapso da barragem Guilherme de Azevedo também por erosão interna

decorrente de uma cheia associada ao mesmo tempo de recorrência do primeiro cenário. No terceiro e último cenário considerou-se o rompimento simultâneo por piping das barragens, Serra dos Cavalos e Guilherme de Azevedo também associados a uma cheia com um intervalo de recorrência de 100 anos.

Em todos os cenários foi avaliada a capacidade das barragens a jusante de deter a onda de inundação decorrente do colapso da estrutura a montante. Foram comparados os resultados do hidrograma de ruptura, gerados com a utilização dos softwares HEC-HMS 4.8 e HEC-RAS 6.2, além de gerar os mapas de profundidade, velocidade e intensidade de cada cenário classificando entre os níveis de perigo baixo, médio e alto.

#### *Parâmetros de formação da brecha de ruptura*

A parte da barragem onde se formará a brecha, o tempo de formação dela e as suas dimensões geométricas são essenciais para determinar o potencial de risco que uma barragem pode oferecer ao romper (Brunner, 2014). Baseada na análise de regressão dos parâmetros e das características da barragem, normalmente, essa geometria se apresenta em formato trapezoidal, definida por meio de equações empíricas que estipula a profundidade da brecha, inclinação lateral, a largura inferior e superior (Karim et al., 2021).

Essas variáveis pré-determinadas, citadas anteriormente são os principais fatores que estipulam a vazão máxima de rompimento (Farias

et al., 2019). A determinação dessas variáveis é incerta, todavia ao se analisar diferentes brechas, no mesmo estudo, pode-se constatar que os hidrogramas tendem a resultados próximos durante a propagação das vazões no modelo (Brunner, 2014). Várias pesquisas recentes, usaram equações empíricas para determinar os parâmetros de formação da brecha (Matos & Eleutério, 2019; Silva et al., 2021; Silva et al., 2022). Neste estudo, os critérios para determinação dos parâmetros de formação da brecha de ruptura, foram os recomendados por ANA (2016), conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 – Parâmetros de formação da brecha sugeridos pela ANA.

| Tipo de barragem  | Largura média da brecha<br>( $B_{bre}$ )                                   | Componente horizontal<br>da inclinação dos taludes<br>da brecha (1V:ZH) | Tempo de<br>ruptura<br>(horas) |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| Concreto em arco  | Todo o desenvolvimento<br>da<br>barragem ou<br>$B_{bre} \geq 0,8 B_{barr}$ | $0 \leq Z \leq$ Inclinação do<br>vale                                   | $t_{rot} \leq 0,1$             |
| Terra/Enrocamento | $H_{barr} B_{bre} \leq 5 H_{barr}$                                         | $1/4 \leq Z \leq 1$                                                     | $0,5 \leq t_{rot} \leq 3$      |

Fonte: Adaptado da ANA (2016).

### Hidrograma de ruptura

O hidrograma de ruptura, pode ser definido como uma relação entre o volume retido no barramento e os parâmetros de formação de brecha (Campos, 2018). O hidrograma indica por meio de gráfico a vazão máxima após o rompimento, além da variação de vazão de ruptura em função do tempo (Faria et al., 2019). Para a determinação do hidrograma de ruptura, foi utilizado o software americano HEC-HMS 4.8, que apresenta bons resultados de transformação de precipitação em vazão (Abreu et al., 2017), além de ser comum o uso dele para o modelo hidrológico e posteriormente usar seus resultados como dados de entrada no HEC-RAS (USACE, 2022).

Primeiramente, foram calculadas as vazões afluentes da sub-bacia de cada reservatório, utilizando o método Soil Conservation Service (SCS) seguido do método do hidrograma unitário. Para determinar essas vazões foi necessário determinar as precipitações para um tempo de retorno de 100 anos, os índices Curve Number (CN), e os Lag time das bacias hidrográficas.

Para estimar as precipitações foi utilizado a curva intensidade-duração-frequência (IDF) da cidade de Caruaru, conforme de Coutinho et al. (2010) e método de distribuição de chuva foi o do método dos blocos alternados com uma duração de chuva igual ao dobro do tempo de concentração das sub-bacias. Os Índices Curve Number (CN) foram estimados utilizando a base de dados da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa, 2020) com o auxílio do software Arc map 10.4.1, e os lag time foram determinados a partir do tempo de concentração das sub-bacias hidrográficas. Com as curvas CotaxÁreaxVolume de cada barragem e os parâmetros da brecha anteriormente determinados, utilizando o HEC-HMS foram calculados os hidrogramas afluentes e de ruptura das barragens.

### Modelo hidrodinâmico

As simulações hidrodinâmicas foram realizadas por meio do software gratuito HEC-RAS 6.2. Nos últimos anos esse software foi bastante utilizado em estudos com previsões de inundações com os de: Bhola et al., (2019), Tschiedel et al. (2020), Neves et al. (2021), Oliveira e Lima Neto (2022). O modelo hidrodinâmico utilizado neste

estudo foi o modelo bidimensional calculado através das equações de águas rasas, isto é, são equações que relacionam o movimento de águas rasas em relação à superfície sobre a influência da força gravitacional, sendo bastante utilizado por poder ser usado em várias situações na engenharia (Guo, Guan, & Yu., 2021) que apresentam maior precisão para simulações de inundações (USACE, 2022). Segundo Neves et al. (2021) as equações de águas são três: a equação 1 é de continuidade e equação 2 e 3 representam a quantidade de movimento.

$$\frac{\delta H}{\delta t} + \frac{\delta(hu)}{\delta x} + \frac{\delta(hv)}{\delta y} + q = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\delta u}{\delta t} + u \frac{\delta u}{\delta x} + v \frac{\delta u}{\delta y} = -g \frac{\delta H}{\delta x} + vt \left( \frac{\delta^2 u}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 u}{\delta y^2} \right) - c_f u + f v \quad (2)$$

$$\frac{\delta v}{\delta t} + u \frac{\delta v}{\delta x} + v \frac{\delta v}{\delta y} = -g \frac{\delta H}{\delta y} + vt \left( \frac{\delta^2 v}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 v}{\delta y^2} \right) - c_f v + f u \quad (3)$$

Onde:  $t$  é o tempo;  $x$  e  $y$  representa as direções cartesianas;  $h$  é profundidade da água no ponto;  $H$  é a elevação da superfície da água;  $q$  representa o termo de fluxo de entrada e saída do sistema;  $u$  e  $v$  representa as componentes da velocidade nas direções  $x$  e  $y$ , respectivamente;  $g$  é a aceleração da gravidade;  $f$  é o parâmetro de Coriolis;  $vt$  é o coeficiente de viscosidade turbulenta horizontal; e  $c_f$  é o coeficiente de atrito.

## Resultados e discussão

### Hidrogramas

Os hidrogramas afluente das sub-bacias e o hidrograma de ruptura das barragens Guilherme de Azevedo e Serra dos Cavalos, foram utilizados como dados de entrada para as modelagens hidrodinâmicas no HEC-RAS 6.2, utilizadas de acordo com cada cenário. A Figura 2 apresenta os hidrogramas afluentes das sub-bacias de cada barragem e os hidrogramas de ruptura das barragens Guilherme de Azevedo e Serra dos Cavalos, todos os hidrogramas foram calculados pelo HEC-HMS 4.8.

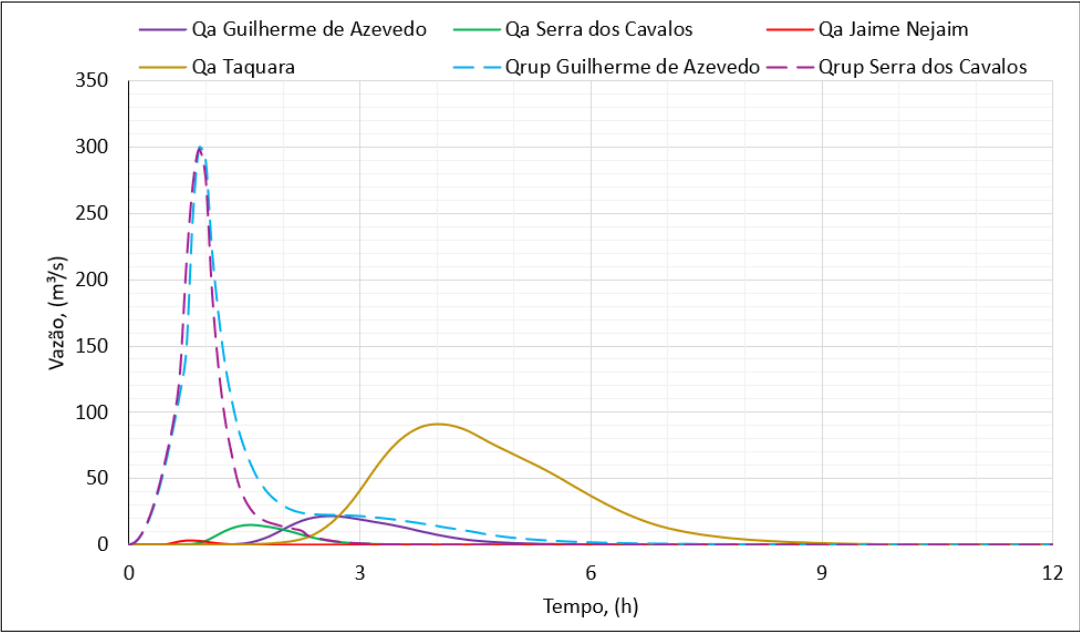


Figura 2. Vazões afluentes e de ruptura – Tr 100 anos. Fonte: Elaborado pelos autores.

Cenários simulados

Por meio do HEC-RAS 6.2, foram realizadas as simulações de acordo com o Quadro 3.

Quadro 3 - Resumo dos cenários.

| Cenários | Barragem a montante que rompe            | Barragem a Jusante analisada |
|----------|------------------------------------------|------------------------------|
| C1       | Serra dos Cavalos                        | Taquara                      |
| C2       | Guilherme de Azevedo                     | Jaime Nejaim e Taquara       |
| C3       | Serra dos cavalos e Guilherme de Azevedo | Jaime Nejaim e Taquara       |

Cenário 1

No primeiro cenário, foi analisado se rompimento da barragem Serra dos Cavalos por erosão interna, associada a uma cheia com Tr de 100 anos, daria origem ao rompimento por galgamento na barragem Taquara. Como condição inicial de rompimento, os dois reservatórios estiveram com a cota do nível de água na soleira do

vertedouro, o início de formação da brecha de ruptura por galgamento da barragem a jusante quando o nível da altura da coluna estivesse para 0,15 m acima da crista do barramento, como recomendado pela ANA (2016). Pode-se constatar que a barragem Taquara romperia em decorrência do rompimento de Serra dos Cavalos, como pode ser constatado no Quadro 4.

Quadro 1 - Cotas dos níveis de água cenário 1.

| Barragem | Condição inicial (m) | Crista (m) | Condição de início de ruptura (m) | Altura máxima (m) | Resultado |
|----------|----------------------|------------|-----------------------------------|-------------------|-----------|
| Taquara  | 549,75               | 550,5      | 550,65                            | 550,82            | Rompeu    |

O hidrograma de ruptura gerados pelo rompimento de Taquara no modelo do HEC-HMS 4.8, resultaram em uma vazão de ruptura máxima de 751 m<sup>3</sup>/s enquanto no HEC-RAS 6.2 o valor foi

549,11 m<sup>3</sup>/s, resultando em uma descarga 26,88% menor do que a calculada no primeiro programa. A Figura 3 mostra os resultados encontrados.

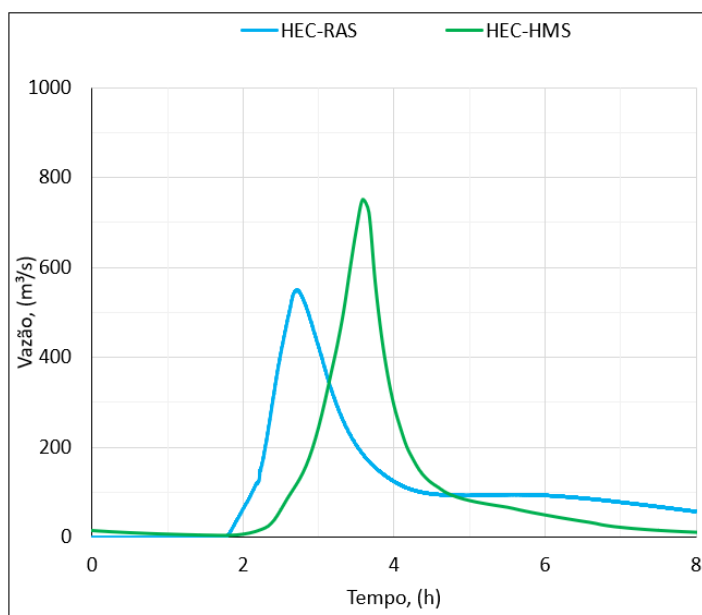


Figura 3. Hidrogramas de ruptura cenário 1.

Através dos mapas de profundidade no cenário 1, pode se perceber que a maior parte da mancha de profundidade está classificada para o nível alto de perigo, como pode ser observado na Figura 4, já para o mapa de velocidade, ilustrado na Figura 5, a macha se divide majoritariamente entre os níveis médio e baixo de perigo, já no mapa de

intensidade, que resultado do produto entre a velocidade e a profundidade, apresentou na maior parte entre o nível alto e médio como observado na Figura 6, segundo os critérios de Ribeiro et al. (2016), critério que também foi usado em pesquisas recentes como Neves et al. (2021) e Silva et al. (2021).

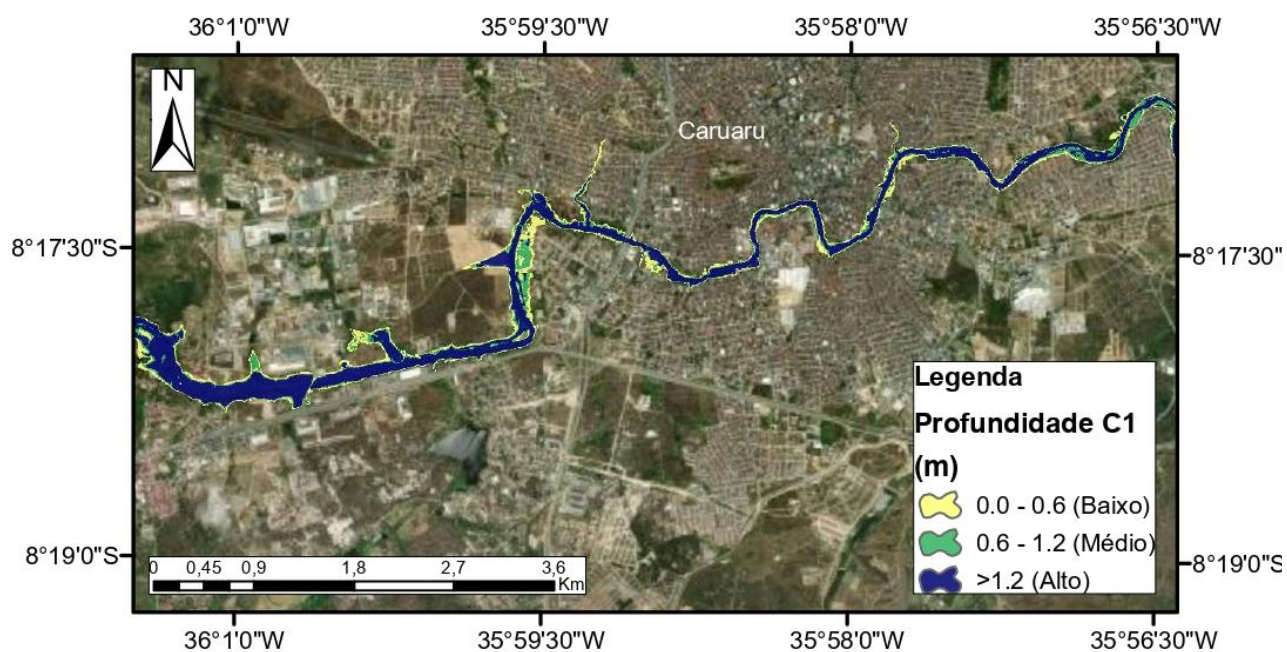


Figura 4. Mapa de Profundidade, cenário 1.

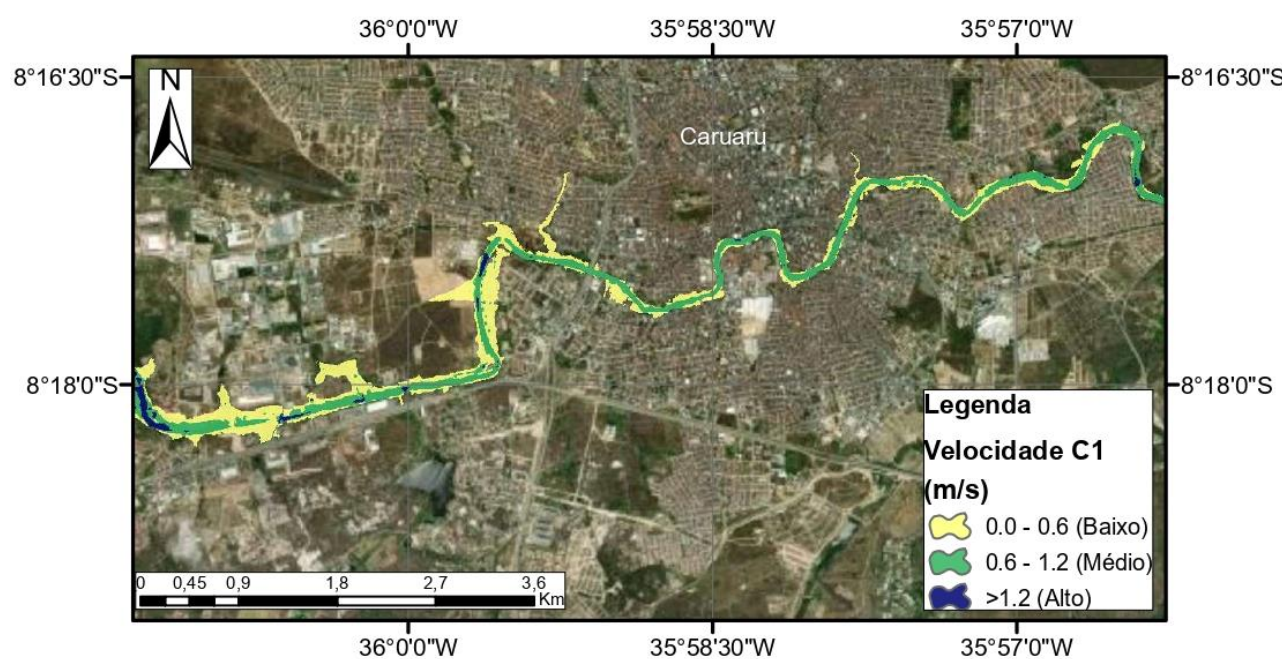


Figura 5. Mapa de Velocidade, cenário 1.

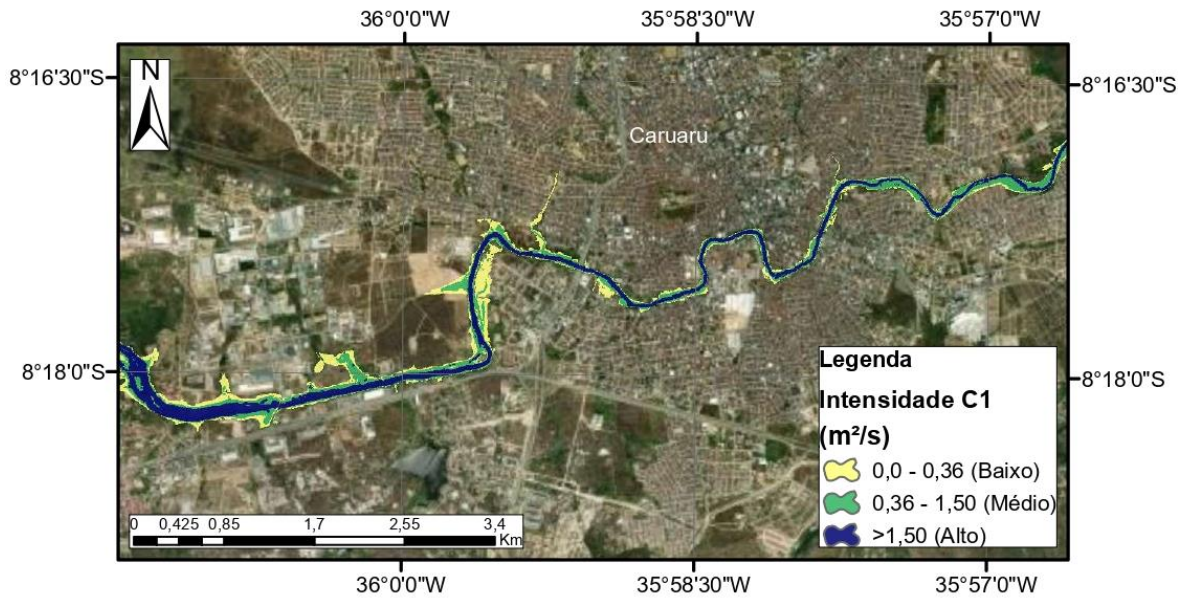


Figura 6. Mapa de Intensidade, cenário 1.

**Cenário 2**

Já no segundo cenário, foi examinado o comportamento das barragens Jaime Nejaim e Taquara com o colapso da barragem Guilherme de Azevedo por piping, associado a uma cheia do mesmo tempo de recorrência do primeiro cenário, como condição inicial os três reservatórios estavam cheios até altura do sangradouro, e como no primeiro cenário, as barragens a jusante entraram

em colapso no caso da onda de inundação da barragem a montante elevar o nível do material armazenado para 0,15 m acima da crista da estrutura, foi constatado que o rompimento da barragem Guilherme de Azevedo geraria o rompimento em cascata das barragens Jaime Nejaim e Taquara, como representado no Quadro 5.

Quadro 5 - Cotas dos níveis de água cenário 2.

| Barragem     | Condição inicial (m) | Crista (m) | Condição de início de ruptura (m) | Altura máxima (m) | Resultado |
|--------------|----------------------|------------|-----------------------------------|-------------------|-----------|
| Jaime Nejaim | 806,24               | 807,86     | 808,01                            | 808,25            | Rompeu    |
| Taquara      | 549,75               | 550,50     | 550,65                            | 551,10            | Rompeu    |

Nessa simulação os valores encontrados de vazão máxima de saída após o rompimento em Taquara, somado a onda gerada por Guilherme de Azevedo e Jaime Nejaim por meio do software HEC-HMS e HEC-RAS foram respectivamente de

859,40 m<sup>3</sup>/s e 637,66 m<sup>3</sup>/s, na barragem Taquara, constatando uma diferença de 25,80% entre os dois resultados. Os hidrogramas são apresentados na Figura 7.

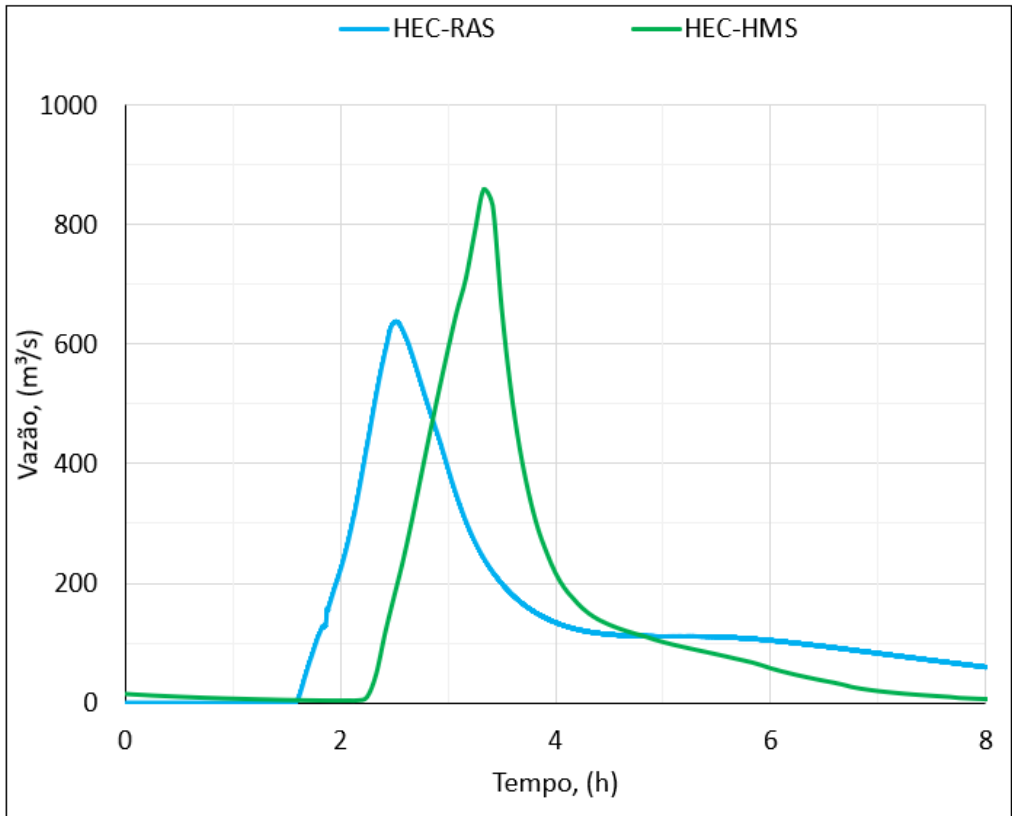


Figura 7. Hidrogramas de ruptura cenário 2.

Já no cenário 2 o mapa de profundidade, Figura 8, o mapa de velocidade, Figura 9, são classificados respectivamente para os níveis de perigo como: alto e entre médio e baixo. Já na Figura 10, o mapa de intensidade, apresenta valores

entre alto e médio. Conforme os critérios de Ribeiro et al., (2016).

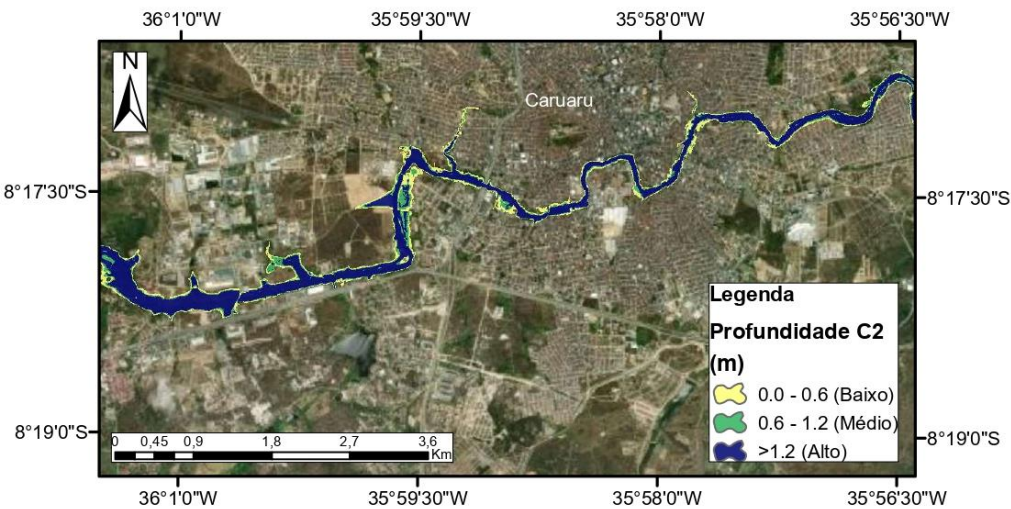


Figura 8. Mapa de Profundidade, cenário 2.

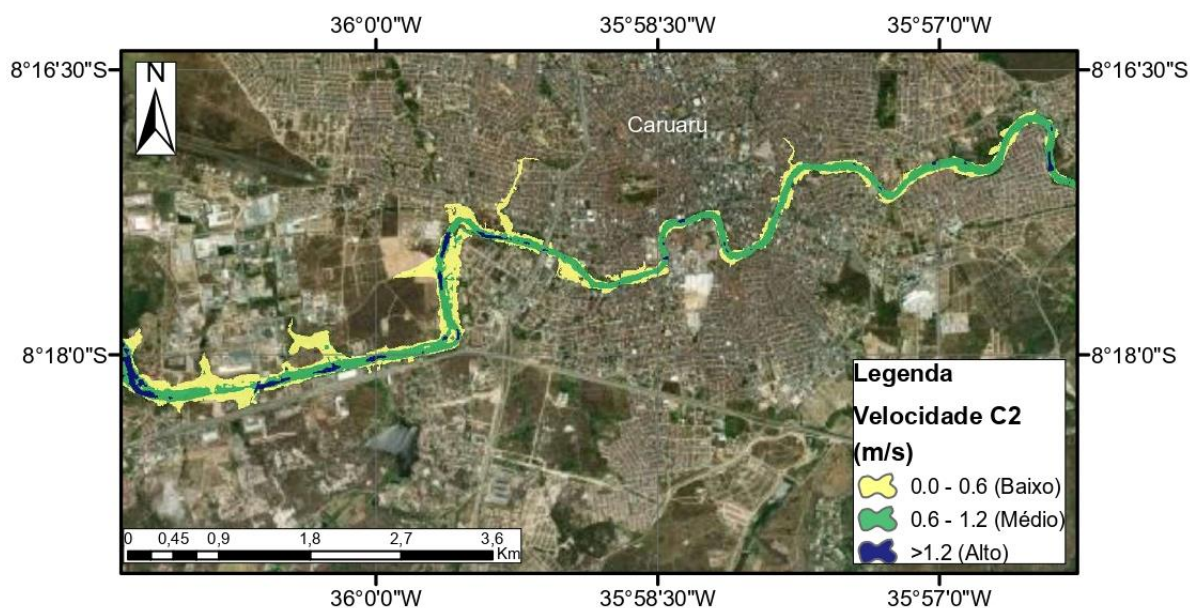


Figura 9. Mapa de Velocidade, cenário 2.

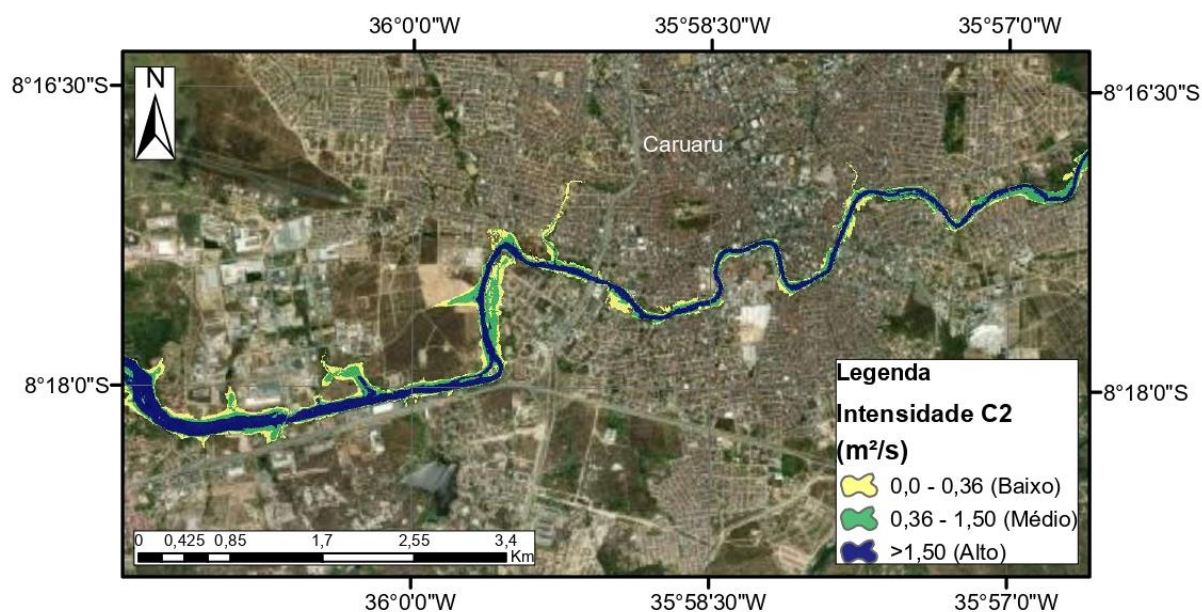


Figura 10. Mapa de Intensidade, cenário 2.

O último cenário foi realizado com as mesmas condições iniciais do primeiro e segundo cenário, porém em uma situação mais extrema, onde as barragens Guilherme de Azevedo e Serra dos Cavalos, entraram em colapso ao mesmo tempo, como gatilho para início do colapso das barragens situadas no caminho da onda de cheia originada pelo rompimento das duas barragens,

também foi de 0,15 m acima da altura máxima da barragem. Foi constatado que o rompimento simultâneo das duas barragens também geraria o rompimento em cascata, conforme exposto no Quadro 6, no entanto, com um agravante o volume de água deslocado seria maior que nos outros dois cenários.

Quadro 6. Cotas dos níveis de água cenário 3.

| Barragem     | Condição inicial (m) | Crista (m) | Condição de início de ruptura | Altura máxima (m) | Resultado |
|--------------|----------------------|------------|-------------------------------|-------------------|-----------|
| Jaime Nejaïm | 806,24               | 807,86     | 808,01                        | 808,25            | Rompeu    |
| Taquara      | 549,75               | 550,50     | 550,65                        | 551,40            | Rompeu    |

Na última simulação, a onda de ruptura somada dos três reservatórios, a montante de Taquara, resultou nas maiores vazões máximas de ruptura encontradas neste estudo, sendo de 952,00

m<sup>3</sup>/s para o HEC-HMS e de 719,64 m<sup>3</sup>/s para o HEC-RAS, com uma diferença entre as duas vazões de 24,41%, podendo ser constatado na Figura 11.

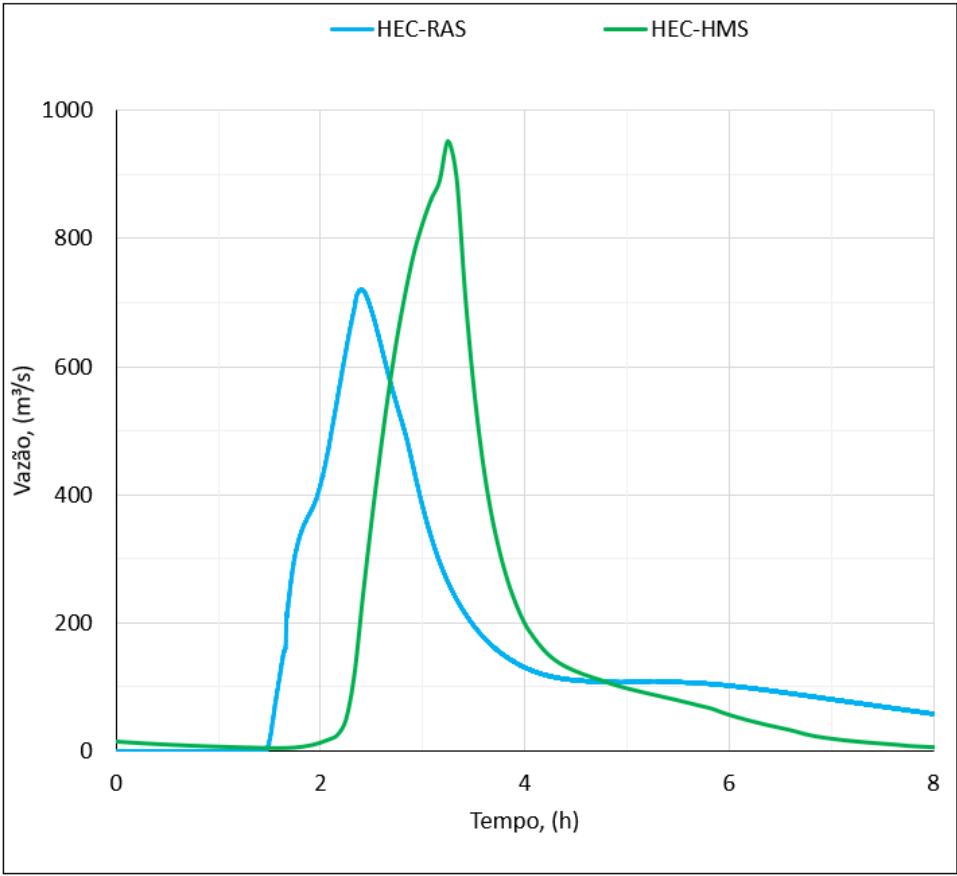


Figura 11. Hidrogramas de ruptura cenário 3.

No cenário 3, por intermédio do mapa de profundidade, Figura 12, pode-se constatar que ele apresenta um nível de perigo alto, já por meio do mapa de velocidade, Figura 13, apresenta velocidades majoritariamente o nível médio de

alerta, já para os níveis de perigo para o parâmetro de intensidade observado na Figura 14, o nível predominante foi alto, utilizando os critérios de Ribeiro et al., (2016).

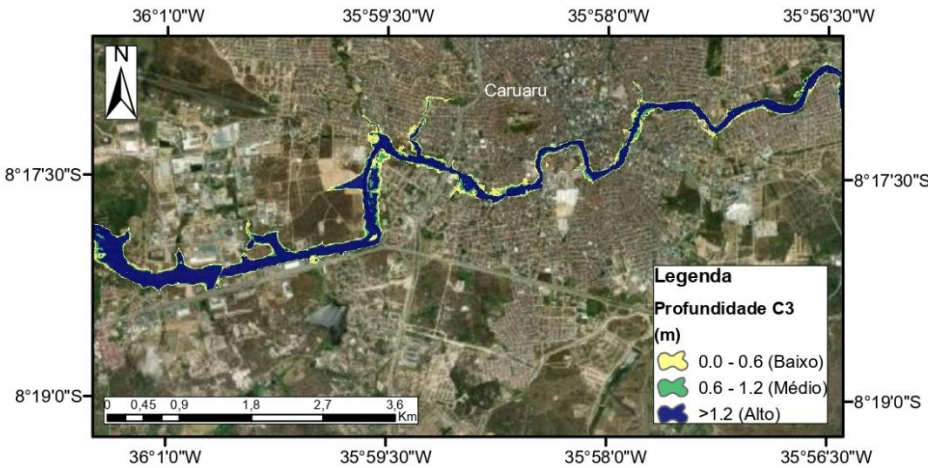


Figura 12. Mapa de Profundidade cenário 3.

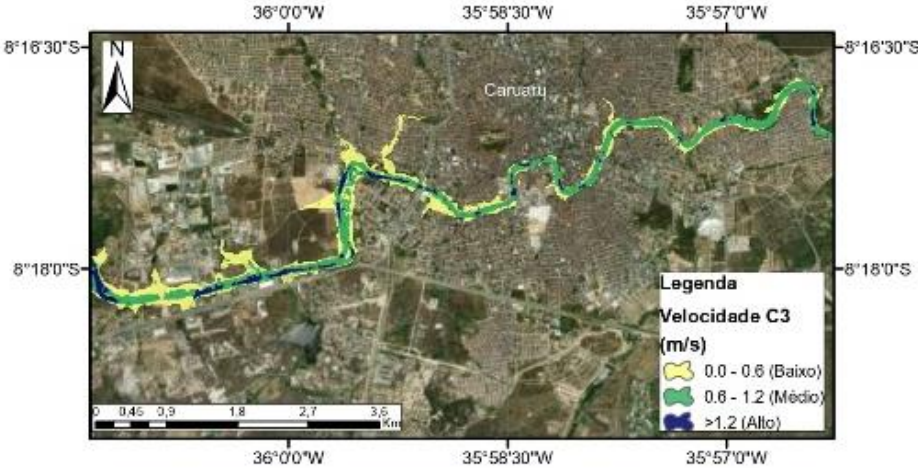


Figura 13. Mapa de Velocidade cenário 3..

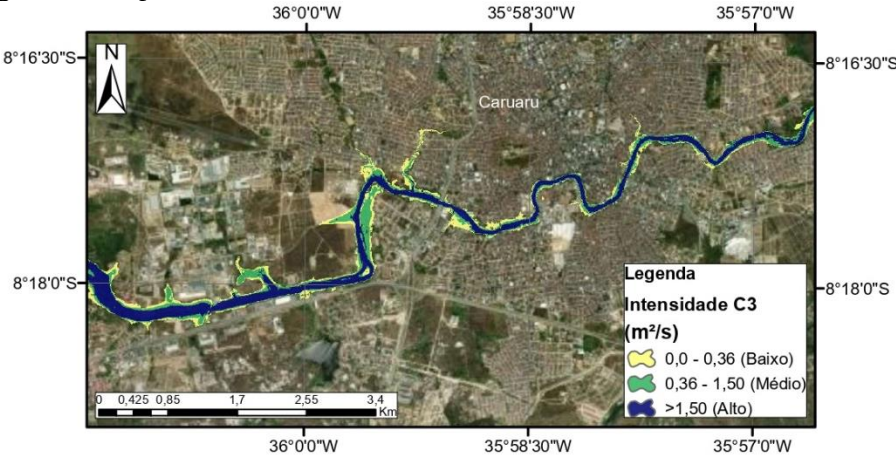


Figura 14. Mapa de Intensidade, cenário 3..

## Conclusões

Por meio dessa pesquisa pode-se averiguar que as vazões de pico de ruptura encontradas no software HEC-HMS são menores que as encontradas nos hidrogramas de ruptura estimadas no HEC-RAS, isso se deve ao fato que o HEC-HMS não leva em consideração as características do terreno, a distância entre os barramentos e a declividade da superfície, as maiores vazões de ruptura foram encontradas para a simulação 3, 2 e 1, respectivamente. Isso ocorre pois, na terceira simulação as quatro barragens rompem, no cenário 2 são três estruturas em colapso e no primeiro apenas dois barramentos rompem.

Foi concluído também, por meio dos mapas de profundidade, velocidade e intensidade dos três cenários, que o cenário um e dois apresentaram resultados bastante semelhante para a classificação dos níveis de perigo, alto na maior parte dos mapas de profundidade, médio e baixo na maior na maior parcela da área atingida para os mapas de velocidade, já para o parâmetro de intensidade os dois cenários apresentaram na maior parte da macha valores entre alto e médio. Além de que, como já era esperado no cenário três, a onda de inundação atinge uma maior área da cidade que nos demais cenários. Já no cenário 1 a onda de inundação atinge uma área menor em comparação com os outros dois cenários. Também pode-se analisar que as áreas atingidas pela inundação da onda gerada pelo rompimento das barragens, nos três cenários, foram praticamente em toda propagação do modelo próxima ao rio Ipojuca, atingindo hipoteticamente imóveis próximos dele. Com os resultados encontrados, pretende-se auxiliar na elaboração de novos estudos e na criação de novas medidas que diminuam as consequências geradas por uma eventual ruptura em cascada dessas barragens.

## Referências

Abreu, F. G. D., Sobrinha, L. A., & Brandão, J. L. B. 2017. Análise da distribuição temporal das chuvas em eventos hidrológicos extremos. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 22 (2), 239-250. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522016146750>

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. 2016. Guia de orientação e formulários do Plano de Ação de Emergência – PAE: Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens. Brasília. [https://www.snishb.gov.br/Entenda\\_Mais/publicacoes/ManualEmpreendedor](https://www.snishb.gov.br/Entenda_Mais/publicacoes/ManualEmpreendedor)

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. 2021. Relatório de segurança de barragens 2020. <https://www.snishb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2020/rsb-2020.pdf>.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. 2023. Relatório de segurança de barragens 2022. <https://www.snishb.gov.br/portal-snishb/api/file/download/463/4/rsb-2022.pdf>.

Albu, L., Enea, A., Stoleriu, C.C., & Niacșu, L. 2019. G.I.S. Implementation on Dam-Break Flood Vulnerability Analysis – A Case Study of Cătămăraști Dam, Botoșani, Romania. "Air and Water – Components of the Environment" Conference Proceedings, Cluj-Napoca, Romania, 65-76. [http://doi.org/10.24193/AWC2019\\_07](http://doi.org/10.24193/AWC2019_07)

Alves, H. R. 2019. O estado de coisas inconstitucional face ao reiterado rompimento de barragens no Brasil. *Revista Vertentes Do Direito*, 6 (2), 131-157. <https://doi.org/10.20873/uft.2359-0106.2019.v6n2.p131-157>

Armada, C. A. S. 2021. Os desastres ambientais de Mariana e Brumadinho em face ao estado socioambiental brasileiro. *Revista Territorium*, 28(1), 13-22. [https://doi.org/10.14195/1647-7723\\_28-1\\_1](https://doi.org/10.14195/1647-7723_28-1_1)

Aureli, F., Maranzoni, A., & Petaccia, G. 2021. Review of Historical Dam-Break Events and Laboratory Tests on Real Topography for the Validation of Numerical Models. *Water*, 13. <https://doi.org/10.3390/w13141968>

Bhola, P. K., Nair, B. B., Leandro, J., Rao, S. N., & Disse, M. 2019. Flood inundation forecasts using validation data generated with the assistance of computer vision. *Journal of Hydroinformatics*, 21 (2), 240-256. <https://doi.org/10.2166/hydro.2018.044>

Braga, R. A., Cabral, J. J., Montenegro, S. M., & Perrier Júnior, G. S. 2002. Conservação dos recursos hídricos em brejos de altitude: O caso de Brejo dos Cavalos, Caruaru, PE. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 6 (3), 539-546. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662002000300028>

Brunner, G. 2014. Using HEC-RAS for Dam Break Studies, TD-39. U.S. Army Corps of Engineers. Davis, CA.

Campos, R. G. D., Saliba, A. P. M., Baptista, M. B., Biscaro, V. H. B., Camargos, R. S., & Passos, D. T. 2018. Modelagem física para determinação de parâmetros de brechas em

- rupturas de barragens em cascata. In Anais do XXVIII Congresso Latinoamericano de Hidráulica. Ezeiza, Argentina: Instituto del Agua.
- Campos, R. G. D., & Saliba, A. P. M. 2023. Methodology to evaluate cascade dams breaks for analysis and safety design. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 28 (16). <https://doi.org/10.1590/2318-0331.282320230001>
- Collischonn, W., Tucci, C. E. M. 1997. Análise do rompimento hipotético da barragem de Ernestina-RS. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 2 (2). 191-206. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v2n2.p191-206>
- Compesa . Companhia Pernambucana De Saneamento. 2019a. Plano de segurança da barragem Jaime Nejaím: Volume I. Recife.
- Compesa . Companhia Pernambucana De Saneamento. (2019b). Plano de segurança da barragem Taquara: Volume I. Recife.
- Coutinho, A. P., Silva, F. B., Silva, R. O., Antonino, A. C. D., & Montenegro, S. M. G. L. 2010. Determinação de equações de chuvas intensas para municípios das mesorregiões do estado de Pernambuco com dados Pluviométricos. In Anais do Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste 10.
- DeNeale, S. T., Baecher, G. B., Stewart, K. M., Smith, E. D., & Watson, D. B. 2019. Current state-of-practice in dam safety risk assessment. Oak Ridge National Lab. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1592163>
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2020). Mapa de solos do Brasil. [http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode/%3ABrasil\\_solos\\_5m\\_20201104](http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode/%3ABrasil_solos_5m_20201104).
- Faria, F. L., Silva, M. B., de M Reis, M., & Amorim, J. C. 2019. Metodologia para obtenção do hidrograma para simulação de ruptura de barragens. *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, 36 (3), 31-37. <http://www.ebrevistas.eb.mil.br/CT/article/view/3246>
- Fernandes, M. R. M. Souza, T. P., Rocha, J. C. S., Macêdo, A. P. B. Á., Souza, R. G. 2021. Simulaçãod da Mancha de inundação do rompimento hipotético da barragem Jacarecica II, Sergipe. In Anais do XIII Encontro de Recursos Hídricos em Sergipe, Brasil: Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- Guo, K., Guan, M., & Yu, D. 2021. Urban surface water flood modelling—a comprehensive review of current models and future challenges. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25 (5), 2843-2860. <https://doi.org/10.5194/hess-25-2843-2021>
- Hu, L., Yang, X., Li, Q., & Li, S. (2020). Numerical simulation and risk assessment of cascade reservoir dam-break, *Water*, 12 (6), 1730. <https://doi.org/10.3390/w12061730>
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2020. Cidades e Estados “Caruaru”. <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/caruaru.html>.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2021. Malha Municipal: “Brasil” e “Pernambuco”. <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?=&t=acesso-ao-produto>.
- Karim, I. R., Hassan, Z. F., Abdullah, H. H., & Alwan, I. A. 2021. 2D-HEC-RAS modeling of flood wave propagation in a Semi-Arid Area due to dam overtopping failure. *Civil Engineering Journal*, 7 (9), 1501-1514. <http://dx.doi.org/10.28991/cej-2021-03091739>
- Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. (2010, 20 de fevereiro) 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. *Diário Oficial da União*. [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm)
- Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. (2020, 30 de setembro). Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). *Diário Oficial da União*. [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2020/lei/l14066.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14066.htm)
- Lima, D. A. D., Lima, G. T. N. P. D., Molina Júnior, V. E., & Fais, L. M. C. F. 2022. Application of a simplified methodology for classification of small dams in cascade. *Revista Ambiente & Água*, 17. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2790>
- Maranzoni, A., & Tomirotti, M. 2023. Three-Dimensional Numerical Modelling of Real-Field Dam-Break Flows: Review and Recent Advances. *Water*, 15. <https://doi.org/10.3390/w15173130>
- 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 Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=5482>
- Neves, Y. T., Rodrigues, A. B., & Cabral, J. J. S. P. 2021. Modelagem computacional do rompimento hipotético da barragem de Jucazinho no estado de Pernambuco (Brasil). *Revista DAE*, 69, 167-182. <http://dx.doi.org/10.36659/dae.2021.039>
- Oliveira, L. C. S. D., & Lima Neto, I. E., 2022. Simulação do rompimento de barragens em cascata em uma bacia hidrográfica semiárida. *Revista DAE*, 70 (235), 203-216. <http://dx.doi.org/10.36659/dae.2022.031>
- Oliveira, A. G., & Magalhães, R. O. (2019). O ônus e o bônus de se viver ao lado da capital do agreste: Desigualdades socioespaciais e dinâmicas da Rede Caruaru. In *Anais do ENANPUR*, 8. <http://anpur.org.br/xviiienanpur/anais>
- Pereira, F. G., Firme, P. H. C., & Cotta, J. P. V. 2021. Plano de Ação de Emergência de barragens de mineração: Evolução, Conceito e Discussões. *Territorium*, 28 (I), 53-66. [https://doi.org/10.14195/1647-7723\\_28-1\\_4](https://doi.org/10.14195/1647-7723_28-1_4)
- Pernambuco (Estado). 2016. Secretaria de Turismo, Esporte e Lazer. Plano de manejo: Parque Natural Municipal Professor João Vasconcelos Sobrinho. Caruaru: Secretaria de Turismo, Esporte e Lazer. <https://parqueserradoscavalos.caruaru.pe.gov.br/wp-content/uploads/2020/02/PLANO-DE-MANEJO.pdf>
- Ríha, J., Kotaška, S., & Petrula, L. 2020. Dam Break Modeling in a Cascade of Small Earthen Dams: Case Study of the Čížina River in the Czech Republic. *Water*, 12 (8), 2309. <http://dx.doi.org/10.3390/w12082309>
- Rizzo, C., Maranzoni, A., & D'Oria, M. 2023. Probabilistic mapping and sensitivity assessment of dam-break flood hazard. *Hydrological Sciences Journal*, 68 (5), 700-718. <https://doi.org/10.1080/02626667.2023.2174026>
- Rolo, R. M., Marodin, F. A., Carrard, G. P., Cardone, L. B., Silveira, C. J. S. 2022. A Python implementation for the simplified dam-break flood modeling. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 27(8). <https://doi.org/10.1590/2318-0331.272220220013>
- Rossi, C. L. C. U., Marques, M. G., Teixeira, E. D., Melo, J. F., Ferla, R., & Prá, M. D. 2021. Dam-Break analysis: proposal of a simplified approach. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 26 (2). <https://doi.org/10.1590/2318-0331.262120200066>
- Sabão, D., & Șerban, G. 2018. Arch dam failure preliminary analysis using HEC-RAS and HEC-GEO RAS modeling. Case study Someșul Rece 1 reservoir. *Forum Geografic XVII*, 44-55. <http://dx.doi.org/10.5775/fg.2018.058.i>
- Silva, A. C., de Santana, N. F. J., da Fonseca Neto, G. C., Soares, A. E. P., Pereira, A. M., da Silva, S. R., Montenegro, S. M. G. L., & de Azevedo, J. R. G. 2021. Contraposição da Equação de Froehlich com o tempo de simulação hipotética de rompimento recomendada da barragem de Jazigo, no sertão pernambucano. *Research, Society and Development*, 10 (12), e572101220854-e572101220854. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i12.20854>
- Silva, J. P. N., Bello, M. I. M., C. V., Silva, T. B. & Silva. W. M. P. 2022. Simulação de Rompimento da Barragem São Bento do Una através do Software HEC-RAS. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 15(2), 856-871. <https://doi.org/10.26848/rbfg.v15.2.p856-871>
- SNISB. Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens. 2022. <https://www.snisb.gov.br/>
- Sumira, M., Anggraheni, E., & Prastica, R. M. S. 2023. Dam Break Analysis of Sermo Dam. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 9(2), 127-138. <https://doi.org/10.22146/jcef.5619>
- Sousa, L. G., Mendes, T. A., Pereira, S. A. S., Dantas, A. A. N., & Godoi, E. L. 2022. Modelo físico para avaliação de vazões geradas por rompimento de pequenas barragens. *Tecnia*, 7 (2).
- Tschiedel, A. D. F., & Paiva, R. C. D. D. 2018. Uncertainty assessment in hydrodynamic modeling of floods generated by dam break. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 23(30). <https://doi.org/10.1590/2318-0331.231820170074>
- Tschiedel, A. D. F., Paiva, R. C. D. D., & Fan, F. M. 2020. Use of large-scale hydrological models to predict dam break-related impacts. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 25 (35). <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190128>
- USACE. US ARMY CORPS OF ENGINEERS. HEC-RAS User's Manual. 2022.
- Vogel, A., Courivaud, J., & Jarecka, K. 2022. Recent case histories of cascade failures and

- overflowing events of embankment dams. In 4th International Seminar on Dam Protection against Overtopping. Madrid, Espanha.
- Zhou, X., Chen, Z., Zhou, J., Guo, X., Du, X., & Zhang, Q. 2020. A quantitative risk analysis model for cascade reservoirs overtopping: principle and application. *Natural Hazards* 104 (1), 249-277.  
<https://doi.org/10.1007/s11069-020-04167-6>
- Zhu, Y., Peng, M., Cai, Shuo., & Zhang, L. 2021. Risk-Based Warning Decision Making of Cascade Breaching of the Tangjiashan Landslide Dam and Two Smaller Downstream Landslide Dams. *frontiers in Earth Science*. Tangjiashan Landslide Dam and TwoSmaller Downstream Landslide Dams. *frontiers in Earth Science*.  
<https://doi.org/10.3389/feart.2021.648919>