ReGeo
ISSN: 2177-3246

ENSAIO SOBRE RUPTURA DE BARRAGENS SISTEMÁTICAS E EM SÉRIE: UM ESTUDO DE CASO NO RIO GUARIBAS E SEUS AFLUENTES (PI)

ESSAY ON SYSTEMATIC AND SEQUENTIAL DAM FAILURES: A CASE STUDY OF THE GUARIBAS RIVER AND ITS TRIBUTARIES (PIAUÍ, BRAZIL)

ENSAYO SOBRE RUPTURA DE PRESAS SISTEMÁTICAS Y EN SERIE: UN ESTUDIO DE CASO EN EL RÍO GUARIBAS Y SUS AFLUENTES (PIAUÍ, BRASIL)

https://doi.org/10.56238/revgeov17n8-248

Data de submissão: 12/07/2026 **Data de publicação:** 26/08/2026

Jean Prost Nobre Moscardi
Doutor em Geociências e Meio Ambiente
Instituição: Universidade Federal do Piauí (UFPI)
Lattes: http://lattes.cnpq.br/3360229730595345
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-9227-9429

Mayra Fernandes Nobre Moscardi
Doutora em Geociências e Meio Ambiente
Instituição: Universidade Federal do Piauí (UFPI)
Lattes: http://lattes.cnpq.br/9644496514415811
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-2101-0876

Sarah de Oliveira Amaral
Instituição: Universidade Federal do Piauí (UFPI)
Lattes: http://lattes.cnpq.br/4824337286321377
Orcid: https://orcid.org/0009-0006-1675-0940

Ana Clara Maia Fernandes
Instituição: Universidade Estadual do Ceará (UECE)
Lattes: http://lattes.cnpq.br/5024984663285019
Orcid: https://orcid.org/0009-0006-6920-2139

RESUMO

A ruptura de barragens configura-se como um desastre crítico, sobretudo em cenários de falhas simultâneas ou em cascata, que intensificam os impactos hidrodinâmicos e os riscos à população. Este estudo analisou os efeitos de rupturas sistemáticas e em série de seis barragens na bacia do rio Guaribas (PI), considerando parâmetros hidrodinâmicos e áreas de risco. Foram simulados cenários de falha por galgamento, erosão interna (piping) e liquefação, utilizando os modelos HEC-HMS e HEC-RAS. Os resultados permitiram avaliar variáveis essenciais, como envoltória máxima de inundação, tempo de chegada da onda de ruptura, profundidade da lâmina d'água, velocidade do escoamento e extensão da inundação. Também foram analisados o risco hidrodinâmico e a delimitação das áreas em Zona de Autossalvamento (ZAS) e Zona de Salvamento Secundária (ZSS). Verificou-se que rupturas em série ampliam significativamente os danos a jusante, evidenciando a importância de modelagens integradas e do aprimoramento das bases de dados. Destaca-se ainda a necessidade de revisão dos planos de emergência. Para estudos futuros, recomenda-se a adoção de coeficientes de Manning espacialmente variáveis e a simulação de novos cenários.

Palavras-chave: Modelagem Hidrodinâmica. Inundação Fluvial. Segurança de Barragens.

ABSTRACT
Dam failure constitutes a critical disaster, particularly in scenarios of simultaneous or cascading failures, which intensify hydrodynamic impacts and risks to the population. This study analyzed the effects of systematic and sequential failures of six dams in the Guaribas River basin (PI), considering hydrodynamic parameters and associated risk areas. Failure scenarios involving overtopping, internal erosion (piping), and liquefaction were simulated using the HEC-HMS and HEC-RAS models. The results enabled the evaluation of key variables, including maximum flood extent, arrival time of the breach wave, water depth, flow velocity, and flood propagation. Hydrodynamic risk was also assessed, along with the delineation of Self-Rescue Zones (SRZ) and Secondary Safety Zones (SSZ). It was found that cascading failures significantly increase downstream damages, highlighting the importance of integrated modeling approaches and improved data quality. The need to update emergency action plans is also emphasized. For future studies, the adoption of spatially variable Manning coefficients and the simulation of additional scenarios are recommended.

Keywords: Hydrodynamic Modeling. River Flooding. Dam Safety.

RESUMEN
La ruptura de presas se configura como un desastre crítico, especialmente en escenarios de fallas simultáneas o en cascada, que intensifican los impactos hidrodinámicos y los riesgos a la población. Este estudio analizó los efectos de rupturas sistemáticas y en serie de seis presas en la cuenca del río Guaribas (PI), considerando parámetros hidrodinámicos y áreas de riesgo. Se simularon escenarios de falla por sobrevertido, erosión interna (piping) y licuefacción, utilizando los modelos HEC-HMS y HEC-RAS. Los resultados permitieron evaluar variables esenciales, como la envolvente máxima de inundación, el tiempo de llegada de la onda de ruptura, la profundidad de la lámina de agua, la velocidad del flujo y la extensión de la inundación. También se analizó el riesgo hidrodinámico y la delimitación de las áreas en Zona de Autosocorro (ZAS) y Zona de Salvamento Secundaria (ZSS). Se verificó que las rupturas en serie amplían significativamente los daños aguas abajo, evidenciando la importancia de modelaciones integradas y del perfeccionamiento de las bases de datos. Se destaca además la necesidad de revisión de los planes de emergencia. Para estudios futuros, se recomienda la adopción de coeficientes de Manning espacialmente variables y la simulación de nuevos escenarios.

Palabras clave: Modelación Hidrodinâmica. Inundación Fluvial. Seguridad de Presas.

1 INTRODUÇÃO

A alta concentração de barragens em bacias hidrográficas, para o máximo aproveitamento hídrico e ou retenção de resíduos, típica de regiões mineradoras e de aproveitamento hidrelétrico, cria um sistema de interdependências físicas entre todas as estruturas envolvidas.

Nesse contexto, a ruptura de uma estrutura pode desencadear a falha de outras a jusante (efeito cascata) ou múltiplas barragens podem falhar simultaneamente devido a um evento disparador comum, como um sismo extremo ou precipitação crítica regionalizada (FAN et al., 2020). Desta forma, a análise destes cenários é necessária e fundamental, pois os danos são considerados catastróficos. Zhong et al. corroboram sobre a temática: "as consequências de uma ruptura em cascata não são simplesmente a soma das consequências das rupturas individuais; o pico combinado da onda de inundação pode ser significativamente amplificado, resultando em uma catástrofe de maior magnitude" (Zhong et al., 2018, p. 2).

Questões como erosão e o "efeito dominó" entre estruturas podem intensificar riscos associados. No Brasil, especialmente no Piauí, a avaliação desses riscos enfrenta limitações significativas devido à falta de dados confiáveis, padronizados e acessíveis. Embora sua importância seja reconhecida, a análise ainda é prejudicada pela ausência de base técnica consistente, resultando em avaliações incertas, situação evidenciada nos próprios órgãos de gestão ambiental e de desenvolvimento.

Sob o ponto de vista da engenharia, a ruptura simultânea ou em série exige modelagens hidrodinâmicas muito mais complexas. A onda de ruptura de uma barragem montante transforma-se na hidrógrafa de entrada para a barragem seguinte, que pode já estar em condição crítica. Nesse sentido, Zhong et al. (2018) atentam que a avaliação da segurança de barragens em cascata deve considerar a probabilidade condicional de falha, uma vez que o rompimento de uma estrutura pode alterar significativamente as condições de carregamento das barragens a jusante, tornando inadequadas as premissas tradicionais de projeto para cheias padrão.

As implicações para a gestão de emergências e o planejamento territorial revelam-se igualmente significativas. Os Planos de Ação de Emergência (PAE) baseados em um único cenário de ruptura tornam-se obsoletos. Desta forma: as rotas de fuga, os pontos de encontro e os tempos de alerta calculados para uma onda singular podem ser totalmente inadequados para uma inundação sinérgica e ou composta, sendo, geralmente, esta mais rápida e mais extensa. A sobreposição das áreas de dano de múltiplas rupturas pode comprometer simultaneamente todas as rotas de escape e os centros de apoio de uma região, paralisando a resposta ao desastre.

Evidências empíricas reforçam a necessidade dessa abordagem. Após o desastre de Mariana, estudos apontaram que o colapso da barragem de Fundão exerceu pressão extrema sobre a estrutura de Santarém, localizada imediatamente a jusante, que não rompeu por uma combinação de fatores favoráveis. Este "quase acidente" em cascata ilustra a materialidade do risco.

Segundo Li e He (2020) a literatura sobre acidentes com barragens indica que eventos em cascata, embora pouco frequentes, tendem a gerar algumas das inundações mais catastróficas já registradas, frequentemente associadas a elevadas taxas de mortalidade.

Diante da problemática este estudo buscou abordar as rupturas hipotéticas de seis barragens presentes no Rio Guaribas e afluentes e os possíveis danos consequentes destes.

2 METODOLOGIA

O presente trabalho caracteriza-se como um estudo de caso, por investigar de forma aprofundada e contextualizada um conjunto específico de barragens inseridas na bacia hidrográfica do Rio Guaribas. Conforme Yin (2015), o estudo de caso constitui uma estratégia de pesquisa voltada à análise de fenômenos contemporâneos em seu contexto real. De modo complementar, Gil (2008) destaca que esse tipo de pesquisa permite o exame detalhado e aprofundado de um ou poucos objetos.

O estudo analisou cenários hipotéticos de ruptura de seis barragens localizadas na bacia do Rio Guaribas e em seus afluentes, considerando seus potenciais impactos. Para tanto, foram adotados os seguintes procedimentos metodológicos:

a) Definição dos critérios de seleção das barragens: foram consideradas estruturas com extensão mínima de influência de 1,5 km e/ou volumes de reservação classificados como baixos (3 a 10 hm^3) ou superiores, conforme a Resolução nº 265/2025 da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA);

b) Levantamento dos cenários de ruptura: com base na NBR 17188 (ABNT, 2024), foram definidos três cenários: (i) sem ruptura (cheias naturais ordinárias e severas); (ii) com ruptura (falha estrutural em dia seco e chuvoso, sendo adotado apenas o cenário em dia seco devido a limitações de processamento); e (iii) complementares, associados a barragens com configurações mais complexas. Estes últimos não foram considerados, pois as estruturas analisadas não apresentam tais características, tornando sua inclusão desnecessária e incompatível com as condições reais do estudo.

c) Definição dos mecanismos de falha: a norma técnica apresenta diversos modos de falha, porém, neste estudo, foram considerados apenas galgamento, erosão interna (piping) e liquefação, não sendo avaliada a instabilidade do maciço devido à ausência de dados técnicos atualizados.

d) Estabelecimento de condições críticas de simulação: a norma supracitada não estabelece diretrizes claras quanto à definição das probabilidades de ocorrência dos cenários de ruptura. Diante disso, adotou-se uma abordagem conservadora, baseada no cenário crítico (pior caso), considerando: (i) todas as barragens com o nível d'água na cota da crista; (ii) pleno funcionamento dos dispositivos hidráulicos, tais como extravasores/vertedores e drenos de fundo; e (iii) a ocorrência simultânea de ruptura nas barragens a montante, com propagação sucessiva do evento às demais estruturas, configurando o efeito em cascata.

e) Levantamento de dados para as simulações e definição dos programas utilizados: concluída a etapa anterior, foram levantados os dados necessários à análise dos cenários de ruptura, incluindo dados topográficos do modelo ANADEM (ANA, 2018), com resolução de 30 m, bem como informações das barragens — características estruturais e operacionais — obtidas junto à SEMARH, ANA, SNIRH e IDEPI, sendo algumas complementadas entre fontes devido à ausência de base consolidada. Também foram coletados dados da bacia hidrográfica, abrangendo rede de drenagem, solo e regime pluviométrico, a partir das mesmas instituições.

f) Elaboração dos modelos computacionais: A modelagem computacional foi realizada nos aplicativos do Hydrologic Engineering Center (HEC), com delimitação das bacias hidrográficas no HEC-HMS, utilizando áreas médias de 100 km² com base no modelo ANADEM. As barragens foram elaboradas no HEC-Mapper e HEC-RAS, a partir da migração dos dados do HEC-HMS, procedendo-se à organização sequencial das informações para adequada representação das características físicas e hidráulicas das estruturas. Cada sub-bacia foi representada por malha de elementos finitos com discretização inicial de 200 m × 200 m, refinada para 100 m × 100 m e, em áreas críticas — como vertedores, drenos de fundo e regiões potenciais de ruptura —, para 5 m × 5 m e 10 m × 10 m, visando maior precisão. Em função da variabilidade da cobertura vegetal, adotou-se coeficiente de Manning igual a 0,06 (PORTO, 2006), não sendo necessária a utilização de batimetria, uma vez que a intermitência dos rios permitiu que a topografia inicial representasse adequadamente o escoamento. As barragens foram ajustadas à topografia, modeladas com base nesses dados e complementadas com a inserção de dispositivos hidráulicos, como extravasores e drenos de fundo, sendo eventuais diferenças de cota atribuídas a limitações dos dados topográficos.

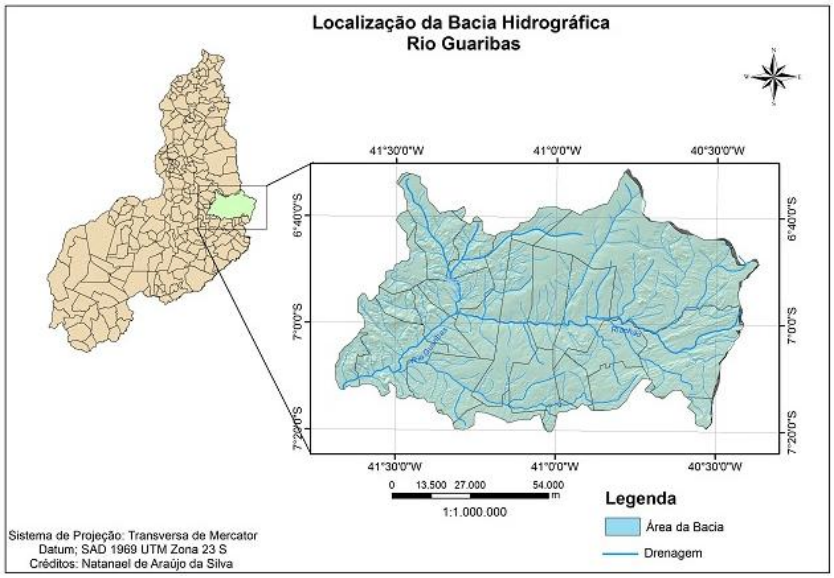
Para a simulação das rupturas, utilizou-se o método de Von Thun & Gillette (HEC-RAS), por apresentar menor tempo de formação da brecha, sendo compatível com abordagem conservadora. Os pontos de ruptura foram definidos nas regiões mais críticas dos maciços, considerando galgamento e erosão interna (piping), enquanto, para liquefação, adotou-se tempo de 36 s (0,01 h), com escorregamento integral do maciço. As condições de contorno foram definidas com base na literatura,

sem modelagem de comportas (devido à descarga livre dos vertedouros), não sendo representados os degraus, embora tenham sido realizadas análises complementares em regime de skimming flow. Como condição inicial, considerou-se nível d'água na crista das barragens e ausência de escoamento a jusante, caracterizando cenário crítico em tempo seco.

Devido à complexidade do modelo, foram ajustados parâmetros numéricos para garantir convergência e estabilidade, incluindo: Theta igual a 1,0; aumento das interações e dos parâmetros de aquecimento; redução do número de fatias; elevação das interações no escoamento 2D com ativação da conversão avançada (tolerância de 0,045 m, RMS de 0,006, "stalling" de 1% e equação de onda de difusão); e controle do passo de tempo pelo critério de Courant (0,9–0,2), com redução dos passos antes da duplicação. As simulações foram realizadas em regime bidimensional (2D), sendo esses ajustes essenciais para reduzir erros e aumentar a precisão, conforme dificuldades de calibração também reportadas por Silva Júnior (2018).

g) Caracterização da área de estudo: conforme Santos et al. (2012), a Bacia Hidrográfica do Rio Guaribas localiza-se no Estado do Piauí, entre os paralelos 06°30' e 07°30' S e os meridianos 41°30' e 40°30' W, com nascentes no prolongamento da Serra do Batista, na Serra Grande, a cerca de 600 m de altitude, no município de Pio IX. O rio Guaribas é afluente da margem direita do rio Itaim, tendo o rio Riachão como principal afluente, integrando a bacia do rio Parnaíba. Freitas (2002) complementa que a bacia abrange diversos municípios piauienses, possui cerca de 209,2 km de extensão e apresenta como principais afluentes os rios Cana Brava e Pitombeiras (margem direita) e Grotão, Riachão e São João (margem esquerda), destacando-se ainda o escoamento em sentido inverso ao padrão predominante no estado (Figura 1).

Figura 1. Localização e delimitação da Bacia Hidrográfica do Rio Guaribas.



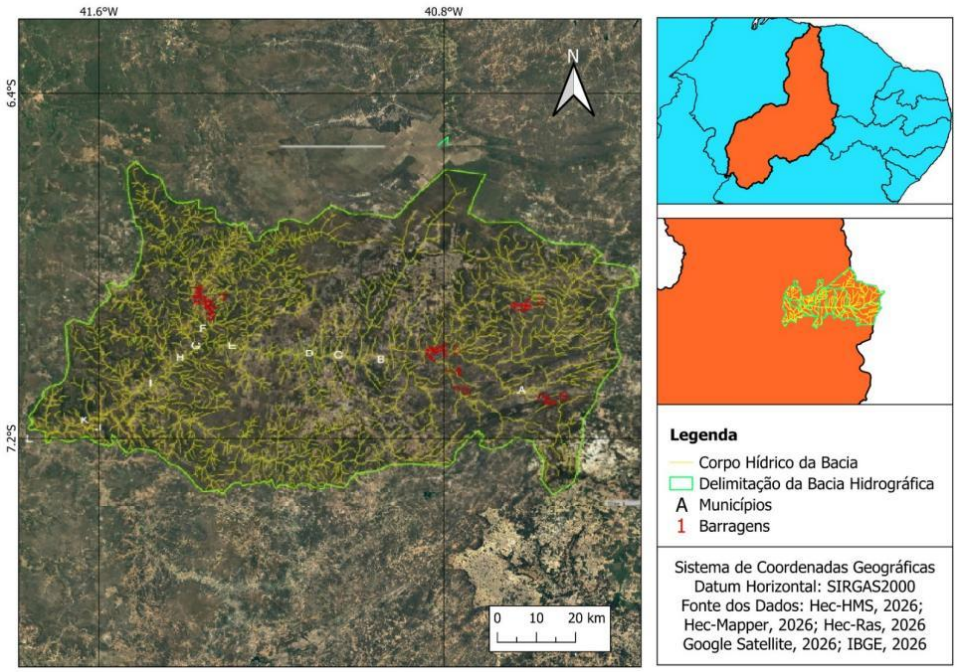
Fonte: Santos et al. (2012).

O clima é semiárido, com chuvas irregulares concentradas no início e no final do ano, seguidas por um período seco bem definido entre junho e setembro. As temperaturas variam pouco ao longo do ano (19 °C a 33 °C), confirmando a predominância de longos períodos de estiagem e precipitações concentradas em poucos meses (CLIMA TEMPO, 2025).

Corroborando esse cenário, a natureza dos solos predominantes — associados ao escudo cristalino e caracterizados por baixa capacidade de infiltração (BARROS, 2022) —, aliada às condições climáticas semiáridas, favorece a ocorrência de escoamento superficial intenso, resultando em cheias rápidas e eventos de inundação que afetam áreas rurais e urbanas. As estruturas de contenção hídrica operam sob regimes hidrológicos variáveis, alternando entre cheias e vazios, o que aumenta as solicitações estruturais e pode favorecer falhas, inclusive rupturas em casos extremos.

Para o estudo, foram considerados os corpos hídricos e espelhos d'água previamente definidos, incluindo as barragens: Bocaina, Cajazeiras, Piaus, São Julião 2, Emparedada e Barreiras. As áreas potencialmente afetadas compreendem municípios limítrofes aos cursos d'água, enumerados em ordem alfabética de montante à jusante: A-Fronteiras, B-Alagoinha do Piauí, C-Monsenhor Hipólito, C-Francisco Santos, D-Santo Antônio de Lisboa, E-Bocaina, F-Carnaubal, G-Sussuapara, H-Picos, I-Altos, J-Angical e K-Santa Cruz do Piauí (Figura 2). As simulações foram estendidas além do exutório da bacia, alcançando Santa Cruz do Piauí, às margens do rio Itaim, com o objetivo de evitar perdas de dados e assegurar a continuidade dos cálculos na área de estudo.

Figura 2 – Mapa da Bacia Hidrográfica do Rio Guaribas com localização dos corpos hídricos e barragens analisadas no estudo.



Fonte: Autores (2026).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em conformidade com a metodologia estabelecida pela NBR 17188 (ABNT, 2024), os resultados serão apresentados a partir dos seguintes parâmetros: envoltória máxima de inundação, tempo de chegada da onda de ruptura, profundidade máxima da lâmina d'água, velocidade máxima do escoamento e propagação da inundação, além da avaliação do risco hidrodinâmico (relação entre velocidade e profundidade) e da segmentação das áreas em Zona de Autossalvamento (ZAS) e Zona de Salvamento Secundária (ZSS).

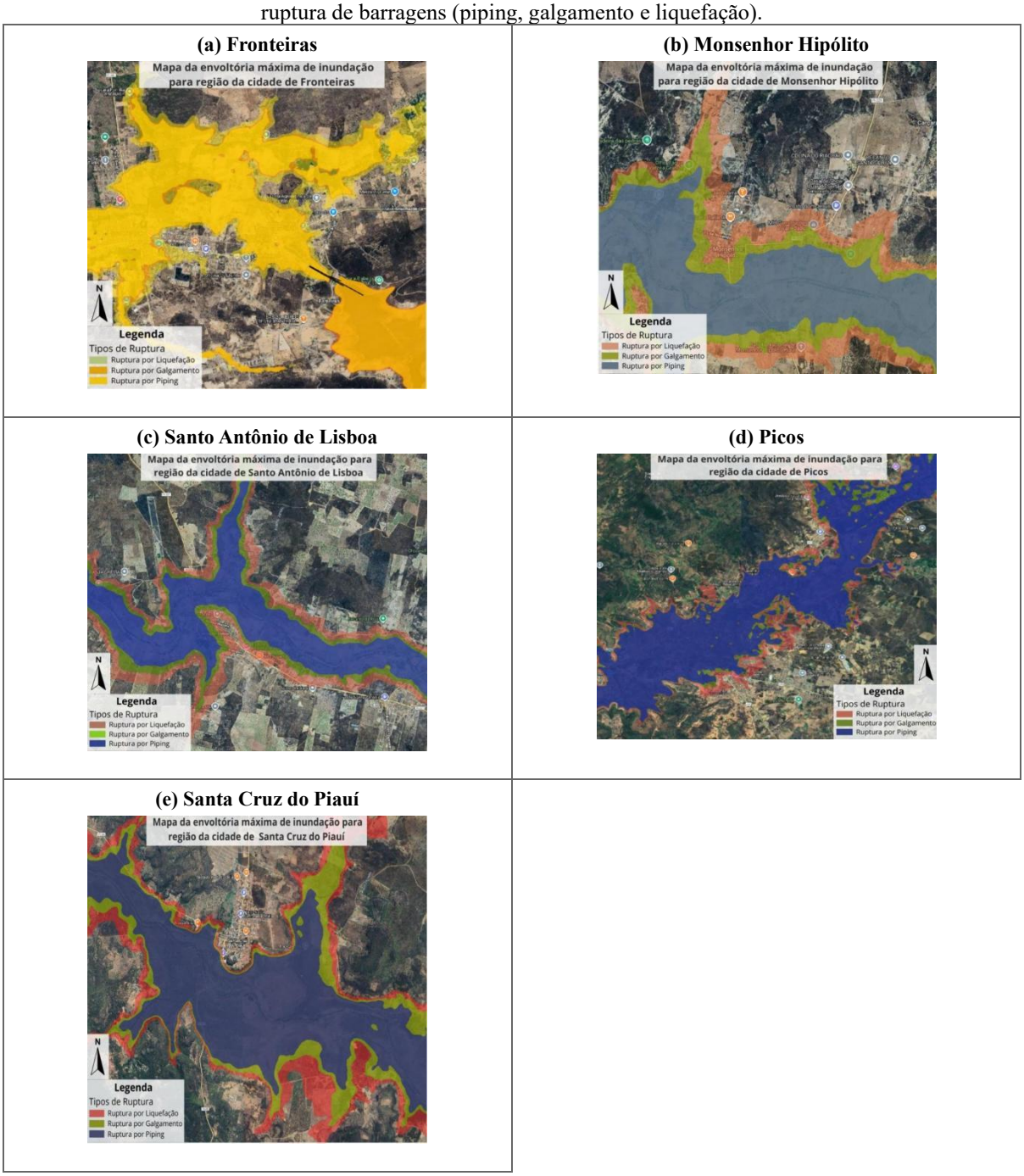
Destaca-se que os resultados das simulações apresentados referem-se às áreas urbanizadas dos municípios em que foram identificados episódios de extravasamento da inundação, a saber: Fronteiras, Monsenhor Hipólito, Santo Antônio de Lisboa, Picos e Santa Cruz do Piauí. Observa-se que os parâmetros de ruptura variaram entre as barragens analisadas — como tempo total de formação da brecha e largura da crista —, sendo, entretanto, todos determinados com base nas equações do método de Von Thun & Gillette.

3.1 ENVOLTÓRIA MÁXIMA DE INUNDAÇÃO

A envoltória máxima de inundação foi obtida diretamente a partir das simulações no modelo hidrodinâmico, sendo os resultados espacializados apresentados de forma condensada na Figura 3, em

função da ampla extensão da área de estudo, contemplando as regiões dos municípios citados anteriormente.

Figura 3 – Envoltória máxima de inundação em diferentes municípios da bacia do rio Guaribas (PI) para cenários de ruptura de barragens (piping, galgamento e liquefação).



Fonte: Autores (2026).

A análise dos cenários evidencia que o mecanismo de ruptura por liquefação apresentou os maiores impactos, resultando nas maiores áreas inundadas. Tal comportamento está associado ao reduzido tempo de formação da brecha, o que promove a liberação mais rápida e concentrada do

volume armazenado, intensificando o escoamento e ampliando a propagação da onda de ruptura a jusante.

Por outro lado, os cenários de galgamento e erosão interna (piping) apresentaram envoltórias de inundação menos extensas. Esse resultado indica que, para as condições analisadas, o tempo de desenvolvimento da brecha exerce influência direta na magnitude da inundação, uma vez que tempos mais longos tendem a dissipar a energia do escoamento, reduzindo a área potencialmente afetada.

Assim, os resultados reforçam a relevância do parâmetro "tempo de formação da brecha" na definição da severidade dos impactos hidrodinâmicos associados à ruptura de barragens.

3.2 TEMPO DE CHEGADA DA ONDA DE RUPTURA, PROFUNDIDADE MÁXIMA DE INUNDAÇÃO, VELOCIDADE MÁXIMA DE FLUXO

Este item foi detalhado para todos os municípios, conforme observa-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros hidrodinâmicos resultantes das simulações de ruptura (tempo de chegada, profundidade e velocidade) para os diferentes cenários (piping, galgamento e liquefação) nos municípios analisados.

Cidade	T. Piping	T. Galg.	T. Liq.	P. Piping	P. Galg.	P. Liq.	V. Piping	V. Galg.	V. Liq.
Fronteiras	00:00:16:16	00:00:14:59	00:00:03:11	9,17	10,46	13,18	6,97	7,90	8,16
Alagoinha do Piauí	00:00:53:14	00:01:14:36	00:00:27:08	18,60	11,39	20,26	6,52	3,48	1,56
Monsenhor Hipólito	00:02:14:26	00:04:06:06	00:01:35:36	14,81	15,02	21,48	3,84	1,69	4,14
Francisco Santos	00:03:48:22	00:07:20:40	00:02:54:46	16,25	16,40	22,60	2,96	1,77	3,40
Santo Antônio de Lisboa	00:05:01:44	00:09:29:07	00:04:10:57	15,43	16,03	21,97	2,78	1,94	3,61
Bocaina	00:00:23:54	00:00:19:25	00:00:06:19	17,71	17,24	17,66	4,93	4,88	5,91
Carnaubal	00:01:29:37	00:01:25:08	00:00:56:46	11,65	13,02	12,80	3,52	3,40	3,54
Sussuapara	00:01:40:05	00:01:38:35	00:01:08:48	11,16	10,53	11,39	3,31	3,40	3,98
Ipueiras	00:03:33:36	00:03:33:37	00:03:05:14	12,09	12,16	12,15	2,11	2,14	2,14
Picos	00:04:03:35	00:04:01:59	00:03:39:35	11,99	12,01	12,23	2,64	2,63	3,13
Altos	00:09:42:34	00:09:41:04	00:09:09:42	13,43	13,45	17,57	2,14	1,73	3,03
Angical	00:10:27:23	00:10:27:22	00:09:53:01	10,50	10,64	11,91	2,65	2,08	3,83
Santa Cruz do Piauí	00:17:28:38	00:17:34:36	00:16:16:56	13,22	13,24	17,69	2,24	1,99	2,50

T. = Tempo de chegada (Dias : Horas : Minutos : Segundos) | P. = Profundidade máxima (m) | V. = Velocidade máxima (m/s)
Fonte: Autores (2026).

Observa-se que o aumento do tempo de chegada da onda de ruptura está diretamente relacionado à posição dos municípios ao longo da bacia hidrográfica e do eixo principal dos cursos d'água. Verifica-se, contudo, um comportamento atípico no município de Monsenhor Hipólito, no

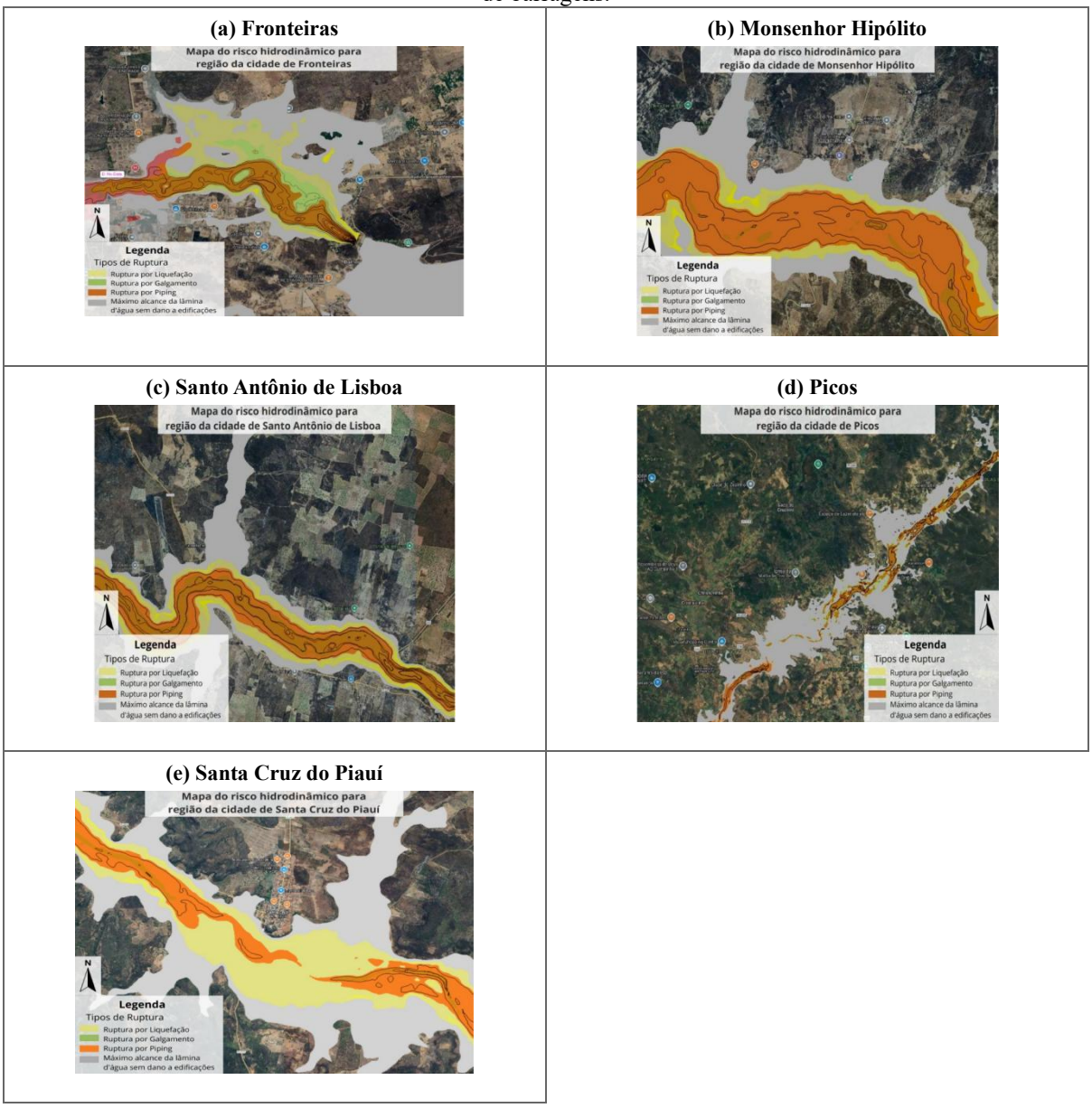
cenário de galgamento, decorrente das diferenças nos tempos de formação total da brecha entre as barragens analisadas.

Destaca-se que, para o município de Fronteiras, o cenário de liquefação apresentou tempo de chegada da onda de apenas 3 minutos e 11 segundos, o que inviabiliza a adoção de medidas efetivas de resposta e evacuação. De modo geral, os menores tempos de chegada estão associados ao mecanismo de liquefação, que também apresentou os maiores valores de profundidade máxima de inundação e velocidade do escoamento. Por fim, ressalta-se que, devido à indisponibilidade de dados do rio Itaim, não foi possível determinar com precisão a máxima extensão da propagação da onda de inundação.

3.3 RISCO HIDRODINÂMICO (RELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE E ALTURA DA LÂMINA D'ÁGUA)

A apresentação deste tópico seguiu a mesma estrutura adotada na subseção 3.1, sendo a visualização dos resultados fundamental para a identificação das áreas de maior risco. A Figura 4 ilustra essas informações por município. Ressalta-se que os valores apresentados correspondem aos limites mínimos para ocorrência de destruição total, considerando o produto entre altura da lâmina d'água e velocidade do escoamento ($H \times V \geq 7{,}0$), conforme Moscardi e Moscardi (2024).

Figura 4. Mapas do risco hidrodinâmico nas regiões dos municípios afetados, considerando diferentes cenários de ruptura de barragens.



Fonte: Autores (2026).

A análise dos mapas de risco hidrodinâmico demonstra que as áreas de maior potencial destrutivo concentram-se ao longo do leito principal dos rios, onde a combinação entre profundidade e velocidade do escoamento resulta em maiores valores do parâmetro H×V. Em Fronteiras, observa-se risco elevado e concentrado a jusante; em Monsenhor Hipólito e Santo Antônio de Lisboa, há uma faixa contínua de risco ao longo do canal; em Picos, verifica-se maior dispersão lateral; e em Santa Cruz do Piauí, um comportamento intermediário.

Os cenários de liquefação apresentam os maiores níveis de risco, seguidos por galgamento e piping, evidenciando a influência do tempo de formação da brecha. Destaca-se, ainda, a sobreposição

das áreas de risco com zonas urbanizadas, indicando elevada vulnerabilidade e a necessidade de planejamento e medidas preventivas, especialmente em cenários de ruptura em cascata.

No que se refere à delimitação das zonas de salvamento, conforme a NBR 17188 (ABNT, 2024), ressalta-se que uma análise mais detalhada envolve múltiplas variáveis — como a presença do empreendedor, o estado de conservação da barragem, entre outras —, as quais não integram o escopo do presente estudo. Ainda assim, é possível realizar uma aproximação com base nos dados apresentados na Tabela 1, utilizando como critério o tempo de chegada da onda de ruptura.

Dessa forma, identificam-se duas classes principais: (i) áreas com tempo inferior a 30 minutos, classificadas como Zona de Alto Salvamento; e (ii) áreas com tempo superior a esse limite, enquadradas como Zona de Salvamento Secundária. Com base nesse critério, os municípios de Fronteiras e Bocaina inserem-se na primeira categoria, enquanto os demais pertencem à segunda. Adicionalmente, a própria norma estabelece como critério complementar a distância de até 10 km para ações de salvamento, o que reforça a mesma classificação, mantendo Fronteiras e Bocaina na primeira zona e os demais municípios na segunda.

Os resultados obtidos no presente estudo estão em consonância com a literatura recente sobre ruptura de barragens em sistemas interligados. Pereira et al. (2024) evidenciam que falhas em cascata potencializam os impactos a jusante, enquanto Santa Rita et al. (2023) demonstram que tais eventos podem gerar inundações extensas, com elevadas profundidades, velocidades e tempos de chegada significativos, afetando tanto áreas rurais quanto urbanas.

Adicionalmente, assim como apontado na literatura, os cenários de liquefação apresentaram maior severidade, reforçando a influência do tempo de formação da brecha na magnitude dos impactos. A sobreposição das áreas de risco com zonas urbanizadas, também observada por Santa Rita et al. (2023), evidencia a elevada vulnerabilidade das populações expostas, destacando a necessidade de aprimoramento do planejamento territorial e da implementação de Planos de Ação de Emergência.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As simulações indicaram variações significativas em todas as variáveis analisadas — envoltória máxima de inundação, tempo de chegada da onda de ruptura, profundidade e velocidade do escoamento, propagação da inundação, risco hidrodinâmico (H×V) e segmentação das zonas de autossalvamento (ZAS) e salvamento secundário (ZSS) — quando consideradas metodologias de ruptura simultânea.

Destaca-se a ausência, na literatura disponível, de estudos que abordem a ruptura individualizada das barragens analisadas, o que limita comparações quanto ao incremento ou

decréscimo dos impactos. Observou-se, ainda, que a barragem de Piaus apresenta papel estratégico, com potencial, dentro das incertezas do modelo, para atenuar a propagação da onda de cheia proveniente das demais estruturas.

Para estudos futuros, recomenda-se a adoção de coeficientes de Manning espacialmente variáveis, embora tal abordagem demande maior capacidade computacional, não disponível no presente trabalho. Sugere-se, também, a simulação de cenários adicionais, como eventos em condições chuvosas e rupturas parciais.

Conclui-se que as rupturas em cenário simultâneo tendem a intensificar os impactos hidrodinâmicos a jusante, contribuindo para a ampliação das áreas inundadas, o aumento da intensidade do escoamento e maior exposição de áreas urbanizadas, o que indica a relevância da adoção de medidas preventivas e de planejamento adequadas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Resolução nº 265, de 4 de setembro de 2025. Estabelece critérios complementares de classificação de barragens reguladas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA, quanto ao Dano Potencial Associado - DPA. Brasília, DF: ANA, 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Catálogo de Metadados do SNIRH – ANADEM: Modelo Digital de Terreno para América do Sul. Brasília: ANA/Superintendência de Estudos Hídricos e Socioeconômicos, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 17188: segurança de barragens — terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

BARROS, J. S. Geologia da Bacia do Rio Guaribas. Revista da Academia de Ciências do Piauí, v. 3, n. 3, p. 336-352, 2022. Disponível em: https://periodicos.ufpi.br/index.php/acipi/article/view/1649. Acesso em: dez. 2025.

CLIMATEMPO. Climatologia – Guaribas, PI. Disponível em: https://www.climatempo.com.br/climatologia/6242/guaribas-pi. Acesso em: dez. 2025.

FAN, X. et al. The formation and impact of landslide dams – State of the art. Earth-Science Reviews, v. 203, abr. 2020, 103116. DOI: https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103116.

FREITAS, M. A. S. Usos múltiplos da água na Bacia Hidrográfica do Rio Guaribas (Estado do Piauí). In: VI SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 2002, Maceió. Anais eletrônico. Porto Alegre: ABRH, 2002.

GIL, A. C. Métodos e técnicas de pesquisa social. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

LI, N.; HE, Y. A comprehensive review of cascade dam break hydrodynamics. Water Resources Management, v. 34, p. 4081-4100, 2020.

MOSCARDI, J. P.; MOSCARDI, M. F. N. O método das compensações aplicado à drenagem urbana como ferramenta para minimizar danos ambientais: um estudo de caso. Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, v. 11, p. 137-157, 2024.

PEREIRA, A. M. et al. Análise da propagação de cheias resultante de rompimentos em cascata hipotéticos de barragens localizadas no município de Caruaru-PE. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 17, n. 1, p. 529–546, 2024. DOI: https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.1.p529-546.

PORTO, R. de M. Hidráulica básica. 4. ed. rev. São Carlos: EESC-USP, 2006.

SANTA RITA, L. C. S. et al. Segurança de barragens em Sergipe: simulação do rompimento hipotético em cascata das barragens Jacarecica I e Jacarecica II. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 28, e32, 2023. DOI: https://doi.org/10.1590/2318-0331.282320230041.

SANTOS, L. A. et al. Bacia Hidrográfica do Rio Guaribas, Piauí: aspectos da geomorfologia fluvial. Universidade Federal do Piauí. SINAGEO. Anais... Disponível em: https://www.sinageo.org.br/2012/trabalhos/2/2-662-369.html. Acesso em: dez. 2025.

SILVA JÚNIOR, L. P. da. Soluções para instabilidade numérica em simulações em regime transitório no modelo HEC-RAS para canais de elevada declividade. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/46681. Acesso em: dez. 2025.

YIN, R. K. Estudo de caso: planejamento e métodos. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

ZHONG, Q. et al. Risk analysis of cascade dam break based on Bayesian network. Environmental Earth Sciences, v. 77, n. 18, p. 1-15, 2018.