



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

THAYNÁ PRATA OLIVEIRA

**Avaliação da atenuação do pico de cheia causado pelo rompimento
hipotético de pequenas barragens no Espírito Santo**

VITÓRIA - ES
2025

THAYNÁ PRATA OLIVEIRA

**Avaliação da atenuação do pico de cheia causado pelo rompimento
hipotético de pequenas barragens no Espírito Santo**

Projeto de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Ambiental do Centro
Tecnológico da Universidade Federal do Espírito
Santo, como requisito para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Diogo Costa Buarque

VITÓRIA - ES
2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me sustentou, fortaleceu e guiou em cada etapa, permitindo-me chegar a este momento de conquista.

À minha família, por ser meu alicerce: ao meu pai, por me ensinar que o peso da caneta é mais leve que o da enxada; à minha mãe, por me ensinar a nunca desistir; aos meus sogros, meus irmãos, e às minhas cunhadas, pelo carinho e paciência durante essa trajetória.

Ao meu namorado, Vinícius Lima, meu companheiro de vida, dedico minha mais sincera gratidão. Seu apoio incondicional, incentivo constante e presença durante toda a minha graduação, tornou meus dias mais leves.

Ao Laboratório de Hidráulica e Monitoramento Ambiental (LABHIDRO) pela oportunidade de realizar minha iniciação científica, experiência que contribuiu de forma significativa para minha formação acadêmica.

Ao Laboratório de Hidrologia, Geoprocessamento e Gestão de Água (LABHIG) pelo acolhimento e suporte durante a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso. Minha gratidão especial ao meu orientador, o professor Dr. Diogo Buarque por me orientar e partilhar seu conhecimento comigo. Agradeço ao Mino Sorribas e Murilo Brazzali, pela colaboração, paciência e disposição em compartilhar conhecimentos ao longo dessa jornada.

Ao Departamento de Engenharia Ambiental, a todo o corpo docente, em especial ao professor Dr. Bruno Furieri, pelo apoio constante e pela orientação generosa durante toda a graduação.

À Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), pela oportunidade de cursar uma graduação pública, gratuita e de qualidade, reafirmando o valor do ensino como um direito de todos e um instrumento de transformação social.

À QualityAmb, empresa de consultoria ambiental onde realizei meu estágio, pelo apoio e incentivo ao meu desenvolvimento profissional.

Às pessoas que tornaram minha caminhada mais leve: ao clube do livro, Nem Li, pelas conversas e reflexões que alimentaram não apenas a mente, mas também o coração;

ao Quinta Fire, onde encontrei no futsal com mulheres um refúgio de amizade, alegria e motivação; aos amigos e colegas de graduação pelo companheirismo e trocas de conhecimento durante a graduação.

A todos que encontrei durante essa trajetória e que, de alguma forma, contribuíram para que esta conquista se tornasse possível, deixo registrada minha mais sincera gratidão.

"O que vale na vida não é o ponto de partida, e sim a caminhada. Caminhando e semeando, no fim, terás o que colher."

— Cora Coralina

RESUMO

As inundações advindas do rompimento de barragens são eventos hidrológicos catastróficos que impactam severamente a sociedade e o meio ambiente. Trata-se de um desafio relevante para a gestão dos recursos hídricos. Embora o foco regulatório e técnico seja geralmente direcionado às grandes barragens, com exceção de barragens classificadas com alto e médio Dano Potencial Associado (DPA) ou de alto risco, a vulnerabilidade das pequenas barragens, cujasseguranças são frequentemente negligenciadas, revela a necessidade de ferramentas analíticas acessíveis para avaliação rápida e confiável dos riscos associados. O presente trabalho objetiva avaliar a aplicabilidade de um modelo simplificado, proposto por Paiva e Lima (2024), para estimativas das atenuações dos picos das ondas de cheia decorrentes dos rompimentos hipotéticos de algumas barragens localizadas no Estado do Espírito Santo, contemplando as delimitações das áreas suscetíveis à inundação. A metodologia adotada combina a análise de dados secundários referentes às características hidrológicas e geomorfológicas das bacias estudadas, o emprego de imagens de satélite de alta resolução para caracterização cartográfica, e a simulação hidráulica mediante equações consolidadas da engenharia hídrica. Estudos de caso foram conduzidos em três pequenas barragens de irrigação do Espírito Santo. Os resultados indicam que o modelo utilizado pode fornecer subsídios técnicos para estimativa de atenuação de picos de ondas de cheia, mapeamento das áreas inundáveis, gestão de riscos, planejamento territorial e políticas públicas direcionadas à segurança hídrica. Este trabalho busca contribuir para o avanço do conhecimento aplicado à mitigação de desastres hidrológicos, especialmente no que tange à gestão de pequenas barragens, promovendo uma abordagem integrada e pragmática em contextos de dados limitados.

Palavras chaves: Inundação; Rompimento de barragem; Modelagem; Risco; Atenuação de ondas de cheia.

ABSTRACT

Floods resulting from the rupture of dams are catastrophic hydrological events that severely impact society and the environment. Although the regulatory and technical focus is generally directed towards large dams, with the exception of dams classified with high and medium Associated Potential Damage (APD) or high risk, the vulnerability of small dams, whose safety is often neglected, reveals the need for accessible analytical tools for quick and reliable assessment of the associated risks. The present work aims to evaluate the applicability of a simplified model, proposed by Paiva and Lima (2024), for the estimation of the attenuation of the peak of flood waves resulting from the hypothetical rupture of some dams located in the State of Espírito Santo, Brazil, contemplating the delimitation of the areas susceptible to flooding. The methodology adopted combines the analysis of secondary data referring to the hydrological and geomorphological characteristics of the studied basins, the use of high-resolution satellite images for cartographic characterization, and the hydraulic simulation through consolidated equations of water engineering. Case studies were conducted to small irrigation dams in Espírito Santo. The results indicate that the model used can provide technical support for estimating the attenuation of flood wave peaks, mapping flood-prone areas, risk management, territorial planning, and public policies aimed at water security. This work seeks to contribute to the advancement of knowledge applied to the mitigation of hydrological disasters, especially regarding the management of small dams, promoting an integrated and pragmatic approach in contexts of limited data.

Keywords: Flooding; Dam rupture; Modeling; Risk; Attenuation of flood waves.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de causa e efeito dos fatores que influenciam a segurança de barragens.....	13
Figura 2 - Fluxograma das etapas do gerenciamento da segurança de barragens com base nas diretrizes da PNSB Brasil (2010).	15
Figura 3 - PNSB — Características para enquadramento (Lei nº 12.334/2010, Art. 1º).....	16
Figura 4 - Fluxograma da metodologia empregada neste trabalho.....	23
Figura 5 - Localização das Barragens SNISB 27748 e 27757 em Aracruz, com base em dados da CPRM (2025).	27
Figura 6 - Área de estudo e entorno da Barragem SNISB 27748.	28
Figura 7 - Área de estudo e entorno da Barragem SNISB 27757.	29
Figura 8 - Localização da Barragem SNISB 21640 em Conceição da Barra, com base em dados da CPRM (2025).	30
Figura 9 - Área de estudo e entorno da Barragem SNISB 21640.	31
Figura 10 - Mapa de localização da barragem SNISB 27748 e parâmetros de classificação de risco.	33
Figura 11 - Mapa de localização da barragem SNISB 27757 e parâmetros de classificação de risco.	34
Figura 12 - Mapa de localização da barragem SNISB 21640 e parâmetros de classificação de risco.	35
Figura 13 – Representação da onda de cheia pelo modelo de atenuação da onda de cheia: a) Seção transversal do rio ativa com parâmetros de classificação de fluxo α e β e armazenamento da planície de inundação com a razão entre a largura da planície e do rio (wt/w); b) Hidrogramas de vazão a montante e jusante volume V, formato, e curvatura relativa C' no pico constantes; c) Perfil longitudinal de vazões mostrando a onda de cheia se deslocando com celeridade c e difusividade hidráulica Dh; d) O modelo de atenuação prevendo a redução da vazão de pico ao longo da distância x de Q_0 para $Q(x)$ em função do fator de atenuação φ.	39
Figura 14 - Comportamento da onda de inundação ao longo da propagação da barragem SNISB 27748.	51

Figura 15 - Comportamento da onda de inundação ao longo da propagação da barragem SNISB 27757.	51
Figura 16 - Comportamento da onda de inundação ao longo da propagação da barragem SNISB 21640.	52
Figura 17 - Influência do tempo total do hidrograma (T) sobre a vazão de pico.	53
Figura 18 - Efeito da simetria do hidrograma (s) na vazão de pico nas barragens analisadas.	53
Figura 19 - Variação da vazão de pico em função da declividade média do canal (S_0) nas barragens analisadas.	54
Figura 20 - Influência da razão largura efetiva de inundação/largura do canal (wtw) sobre a vazão de pico nas barragens analisadas.	54
Figura 21 - Influência do tempo total do hidrograma (T) sobre a vazão de pico.	55
Figura 22 - Efeito da simetria do hidrograma (s) na vazão de pico nas barragens analisadas.	55
Figura 23 - Variação da vazão de pico em função da declividade média do canal (S_0) nas barragens analisadas.	56
Figura 24 - Influência da razão largura efetiva de inundação/largura do canal (wtw) sobre a vazão de pico nas barragens analisadas.	56
Figura 25 - Influência do tempo total do hidrograma (T) sobre a vazão de pico.	57
Figura 26 - Efeito da simetria do hidrograma (s) na vazão de pico nas barragens analisadas.	57
Figura 27 - Variação da vazão de pico em função da declividade média do canal (S_0) nas barragens analisadas.	58
Figura 28 - Influência da razão largura efetiva de inundação/largura do canal (wtw) sobre a vazão de pico nas barragens analisadas.	58
Figura 29 - Curva Cota × Área × Volume da Barragem SNISB 27748.	61
Figura 30 - Curva Cota × Área × Volume da Barragem SNISB 27757.	62
Figura 31 Curva Cota × Área × Volume da Barragem SNISB 21640.	62

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Informações Fest (2024) a respeito das barragens de pequeno porte.	24
Quadro 2 - Classificação final feita pela Fest (2024) das pequenas barragens selecionadas quanto ao potencial impacto devido a um eventual rompimento.	25
Quadro 3 - Comparativo da classificação de risco e impacto potencial das barragens analisadas.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de entrada provenientes da Fest (2024) utilizados na construção das curvas cota-área-volume simplificadas das barragens analisadas.....	42
Tabela 2 - Dados de entrada no modelo.....	47
Tabela 3 - Resultados obtidos por meio da modelo simplificado de Paiva e Lima (2024).	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PSB	Plano de Segurança da Barragem
DPA	Dano Potencial Associado
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
FEST	Fundação Espírito-santense de Tecnologia
CRI	Categoria de Risco
MDE	Modelos Digitais de Elevação
CAV	Curvas Cota–Área–Volume
CDA	Canadian Dam Association
AGERH	Agência Estadual de Recursos Hídricos
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	3
2.	OBJETIVO	7
2.1.	Objetivo geral	7
2.2.	Objetivos específicos.....	7
3.	JUSTIFICATIVA.....	8
4.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
4.1.	Segurança de Barragens	11
4.2.	Simulação de Rompimento de Barragens	17
4.3.	Barragens no Espírito Santo.....	19
5.	METODOLOGIA	22
5.1.	Área de Estudo	23
5.2.	Estimativas das ondas de cheia	36
5.2.1.	Modelo de atenuação de ondas de cheia	37
5.2.2.	Coleta de dados de picos de inundação e características dos reservatórios	
	41	
5.2.3.	Estimativa do volume e tempo de subida	41
5.2.4.	Uso de imagens de satélite	41
5.2.5.	Curva Cota–Área–Volume simplificada	42
5.2.6.	Coeficiente de <i>Manning</i> e cálculos hidráulicos	42
5.2.7.	Cenário de ruptura de barragem analisado	43
5.2.8.	Simulação com modelo simplificado.....	44
5.2.9.	Sensibilidade dos parâmetros	44
5.3.	Dados utilizados	44
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
6.1.	Avaliação do impacto da variação de parâmetros do modelo nos resultados obtidos.....	52

6.1.1.	Barragem SNISB 27748	53
6.1.2.	Barragem SNISB 27757	55
6.1.3.	Barragem SNISB 21640	57
6.1.4.	Discussão	59
6.2.	Análise dos indicadores hidrodinâmicos e limitações do modelo	60
6.3.	Curva Cota–Área–Volume simplificada	61
6.4.	Comparação com classificações oficiais e técnicas	63
6.5.	Contribuições para a gestão de riscos e o planejamento territorial	65
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	66
8.	REFERÊNCIAS	69

1. INTRODUÇÃO

As inundações estão entre os eventos catastróficos mais devastadores, com potencial de gerar um impacto extremamente prejudicial para a sociedade, capazes de acarretar perdas humanas, lesões, deslocamento de indivíduos, danos à infraestrutura, cultura, patrimônio ambiental e atividades econômicas (CRED-UNDRR, 2020; Doocy et al., 2013).

Esses eventos podem ocorrer devido a processos naturais, como o transbordamento de rios, rompimento de taludes fluviais, tempestades costeiras, marés ou chuvas intensas em áreas urbanas. Além disso, ações antrópicas também podem ser responsáveis, como falhas em estruturas hidráulicas, liberação descontrolada de água decorrente de acidentes, além de colapso parcial ou total de barragens (Maranzoni et al., 2023; ICOLD 2022; Merz et al., 2021). As inundações decorrentes do rompimento de barragens devido a falhas na estrutura são frequentemente muito maiores em comparação às causadas por eventos de chuvas (Costa, 1985).

De acordo com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), no ano de 2024 havia aproximadamente 26 mil barragens registradas no Brasil (ANA, 2024). A maioria dessas barragens é utilizada para armazenamento de água (96%), e a grande parte enfrenta dificuldades na implementação dos instrumentos da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Mesmo quando os instrumentos da PNSB são elaborados para as barragens, ainda existem diversos desafios para integrar esses produtos com as políticas de defesa civil para auxiliar na tomada de decisões (Paiva; Lima, 2024).

Diante das muitas ocorrências envolvendo inundações, diversos estudos têm explorado diferentes abordagens para descrever as ondas de cheia geradas por um rompimento de barragem, abrangendo soluções analíticas (Henderson, 1966), semi-analíticas (Ponce et al., 2003; Ponce e Simons, 1997) e empíricas (Rossi et al., 2021; USBR, 1989; Rutschmann e Hager, 1996; Costa, 1985; Wetmore e Fread, 1981). No entanto, apesar dos estudos realizados até o momento, não é fácil encontrar um modelo abrangente, de fácil aplicação, baseado em equações simples e com parâmetros comumente disponíveis na natureza, capaz de estimar com precisão a

atenuação do pico da onda de cheia após um eventual rompimento de barragem (Paiva; Lima, 2024).

Diante desse contexto, Paiva e Lima (2024) propuseram um modelo analítico que utiliza parâmetros de fácil estimativa e uma equação simplificada, dispostos em uma planilha eletrônica, para estimar com boa precisão a atenuação do pico de uma onda de cheia. Essa metodologia permite realizar estimativas rápidas e conservadoras, facilitando a avaliação de riscos e tomada de decisões em eventos de inundação e rompimento de barragens.

Nesse contexto, a análise de sensibilidade dos parâmetros hidrológicos e geométricos empregados no modelo torna-se um complemento essencial, uma vez que possibilita avaliar em que medida variações nessas variáveis podem modificar os resultados obtidos. Esse procedimento contribui para aferir a robustez da metodologia proposta e direcionar a atenção para os parâmetros que exercem maior influência na propagação da onda de cheia, ampliando, assim, a confiabilidade das simulações e a aplicabilidade prática do modelo em estudos de ruptura de barragens.

Além das grandes barragens destinadas para geração de energia, existe também muitas pequenas barragens, geralmente de terra, principalmente em áreas rurais, construídas com a finalidade de irrigação ou dessedentação de animais (Lima et al., 2022). Os problemas com essas pequenas barragens também são frequentes, especialmente em períodos de muita chuva, quando estão mais sujeitas a um eventual rompimento.

No Brasil, a Lei nº 12.334/2010, alterada pela Lei nº 14.066/2020, instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), que abrange o armazenamento de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e o acúmulo de resíduos industriais (Brasil, 2020). A PNSB se aplica a todas as barragens destinadas à acumulação de água, rejeitos ou resíduos industriais. No entanto, a exigência da elaboração e implementação do Plano de Segurança da Barragem (PSB) é obrigatória apenas para as estruturas classificadas como de alto risco ou de alto e médio Dano Potencial Associado (DPA), bem como para aquelas que se enquadram em critérios de grande porte definidos pelos órgãos fiscalizadores. São consideradas barragens de grande porte aquelas que apresentam altura superior a 15 metros ou possuem

reservatórios com volume maior que 3,106 milhões de m³. Nesses casos, é obrigatória a elaboração do PSB. Dessa forma, muitas pequenas barragens, por não se enquadrarem nesses critérios, acabam não sendo submetidas a inspeções regulares e avaliações de segurança adequadas, aumentando o risco de rompimento (Lima et al., 2022).

As barragens podem ser classificadas segundo diferentes critérios estabelecidos pela legislação e por normas técnicas específicas. O Critério de Risco (CRI) está relacionado às características técnicas do empreendimento, abrangendo aspectos como o método construtivo, o estado de conservação, a idade da estrutura e o atendimento ao Plano de Segurança da Barragem (PSB). Já o Dano Potencial Associado (DPA) refere-se à magnitude das consequências decorrentes de um possível rompimento, considerando o risco de perdas de vidas humanas, bem como os impactos econômicos, sociais e ambientais. Em ambos os parâmetros (CRI e DPA), as barragens são categorizadas em níveis baixo, médio e alto, conforme estabelecido pela Lei nº 12.334/2010 (BRASIL, 2010).

Complementando essas classificações, um estudo conduzido pela Fundação Espírito-Santense de Tecnologia (FEST, 2024) avaliou barragens de pequeno porte localizadas em um trecho de 2 km ao longo da rodovia BR-101/ES, com o objetivo de analisar o impacto potencial de um rompimento hipotético sobre a rodovia. A avaliação contemplou variáveis como a posição espacial em relação à rede hidrográfica e à rodovia, o volume armazenado, a área de drenagem do barramento, a vazão máxima estimada para um tempo de retorno de 100 anos e a existência de outras barragens a jusante. A partir desses critérios, as estruturas foram classificadas em quatro níveis de impacto: baixo, médio, alto e crítico.

No contexto da gestão de recursos hídricos, as barragens de pequeno porte, frequentemente utilizadas para irrigação, abastecimento e controle de cheias, assumem papel relevante, como no Espírito Santo. Essas construções muitas vezes não dispõem de dados fundamentais, como área e volume do reservatório, altura e largura do barramento, ou as curvas cota–área–volume, o que compromete sua avaliação técnica e os planos de monitoramento (Bocchiola et al., 2014). Além disso, grande parte dessas barragens foi erguida sem projeto técnico adequado,

responsabilidade profissional ou autorização dos órgãos reguladores, o que reforça a necessidade de ações específicas de fiscalização e gestão (Pacheco et al., 2022).

Diante disso, neste trabalho, será apresentado uma análise do modelo simplificado proposto por Paiva e Lima (2024), para avaliação da atenuação do pico de inundação causado pelo rompimento hipotético de pequenas barragens localizadas no Estado do Espírito Santo. Com isso, espera-se avaliar o possível impacto a jusante do eventual rompimento.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo geral

Analisar os impactos de ondas de cheias geradas pelos rompimentos hipotéticos de algumas barragens localizadas no Espírito Santo e as respectivas áreas de inundação.

2.2. Objetivos específicos

- Estabelecer os parâmetros de barragens rurais para as quais existe escassez de informações, levando em consideração parâmetros comumente disponíveis na literatura e dados disponíveis;
- Analisar o uso de um modelo simplificado para estimativa das atenuações de vazões máximas das ondas de inundação geradas pelos rompimentos de barragens;
- Avaliar o impacto da variação de parâmetros do modelo nos resultados obtidos;
- Verificar os resultados obtidos com o modelo simplificado em relação às classificações de impactos já existentes das barragens de estudo.

3. JUSTIFICATIVA

O rompimento de uma barragem pode provocar consequências devastadoras para as comunidades e o meio ambiente, com a propagação de ondas de inundação que resultam em perda de vidas, danos à infraestrutura e degradação ambiental. Contudo, muitas barragens, especialmente as de pequeno porte, carecem de estudos aprofundados sobre o comportamento das ondas de cheia geradas em caso de ruptura, o que compromete a adoção de medidas eficazes de prevenção e mitigação dos impactos.

A segurança de uma barragem envolve aspectos estruturais, geotécnicos, hidráulicos, operacionais e ambientais, além da medição e acompanhamento de parâmetros relevantes. Além do mais, a gestão da segurança de pequenas barragens deve envolver o poder público, os proprietários e a comunidade (Pacheco et al., 2020; Lima et al., 2021). Apesar de algumas barragens serem pequenas, elas podem representar riscos à população, pois muitas vezes são construídas sem projeto adequado, sem responsabilidade técnica ou autorização do órgão regulador competente. Assim, também necessitam de inspeções para monitoramento adequado de seu comportamento, exigindo ação conjunta dos órgãos reguladores e dos proprietários para a gestão da segurança dessas estruturas (Dam et al., 2012).

A Lei nº 12.334/2010, alterada pela Lei nº 14.066/2020, instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) no Brasil, que se aplica a todas as barragens destinadas ao armazenamento de água, rejeitos ou resíduos industriais (Brasil, 2020). Entretanto, a obrigatoriedade da elaboração do Plano de Segurança da Barragem (PSB) recai apenas sobre estruturas de grande porte ou aquelas classificadas com alto ou médio Dano Potencial Associado (DPA). Com isso, pequenas barragens, muitas vezes não se enquadram nesses critérios e, consequentemente, não passam por inspeções regulares nem avaliações de segurança adequadas, aumentando seu risco de rompimento e os impactos potenciais à população (Lima et al., 2022).

No Brasil, na região Nordeste, entre 1887 e 1906, 129 pequenas barragens se romperam, além de outros acidentes registrados nos estados do Ceará e do Pará (Pisaniello et al., 2011; 2015; Aguiar et al., 2015; Říha et al., 2020; Nava et al., 2021). Nos últimos anos, diversos incidentes com pequenas barragens reforçam a vulnerabilidade dessas estruturas: em 2004, a barragem de Camará, na Paraíba,

rompeu-se, causando a morte de quatro pessoas e deixando mais de 800 famílias desabrigadas; em março de 2019, uma barragem em Machadinho d'Oeste, Rondônia, foi atingida por tromba d'água, destruindo pontes e isolando cerca de 50 famílias (Gambarra; Vieira, 2024; Rede Amazônica, 2019). Em dezembro de 2022, um incidente em Jaguaré, no Espírito Santo, provocou o rompimento de três barragens resultando na decretação de estado de emergência e na interdição da BR-101, no norte do estado, devido ao desabamento de parte da pista da rodovia (Miranda, 2022). Casos semelhantes ocorreram em 2022 nos municípios de São Mateus, onde o rompimento de uma represa gerou uma cratera na rodovia, inviabilizando o tráfego (Maciel, 2022), e em Colatina, com o rompimento parcial de uma barragem, causando alagamentos e transtornos à comunidade local (Bachetti, 2022). Esses eventos destacam que barragens de pequeno porte, muitas vezes construídas de forma irregular, apresentam risco elevado de rompimento, especialmente em períodos de chuvas intensas, evidenciando a necessidade de fiscalização rigorosa, manutenção preventiva e políticas públicas voltadas para a segurança dessas estruturas (Barragens irregulares no ES, 2023; Amorim, 2025).

Diante da falta de estudos detalhados sobre o comportamento das ondas de inundação causadas pelo rompimento de pequenas barragens, torna-se essencial o desenvolvimento de modelos simplificados para avaliar a atenuação do pico de inundação. Esses modelos são ferramentas importantes para a gestão do risco, permitindo a implementação de planos de contingência, a definição de zonas de segurança e a avaliação do impacto de eventos extremos, mesmo em áreas com dados limitados.

A escolha deste tema para o projeto de graduação justifica-se pela necessidade de integrar conhecimentos de hidráulica, geoprocessamento e modelagem computacional para fornecer uma avaliação mais acessível e precisa dos impactos de rompimentos de pequenas barragens, geralmente com escassez de informações. Utilizando dados de bases secundárias e imagens de satélite de alta resolução, é possível compensar parcialmente a escassez de informações disponíveis para a análise das características locais das áreas afetadas.

Diante disso, avaliação da sensibilidade dos parâmetros hidrológicos e geométricos constitui uma etapa importante em estudos de modelagem. Isso porque variações em

parâmetros influenciam diretamente os resultados de simulação, afetando o resultado obtido. A análise de sensibilidade permite identificar quais parâmetros apresentam maior impacto sobre os resultados, auxiliando na calibração e na confiabilidade do modelo. Segundo Saltelli et al. (2008), esse tipo de análise é fundamental para compreender a robustez de modelos numéricos e direcionar esforços de coleta de dados em campo, reduzindo incertezas associadas às previsões.

As simulações previstas poderão fornecer subsídios para aprimoramento da gestão de riscos e da otimização do planejamento urbano e rural, contribuindo para a minimização de danos em casos de rompimento de barragens. O tema escolhido para o presente estudo é de grande importância para a segurança hídrica e a gestão de desastres relacionados com rompimento de barragens, fundamentais para a proteção de vidas e bens em áreas vulneráveis.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Segurança de Barragens

As inundações constituem eventos hidrológicos de elevada recorrência, caracterizados por impactos significativos sobre a sociedade, a economia e o meio ambiente (Blöschl, 2022; Mishra et al., 2022). Esses fenômenos podem decorrer tanto de processos naturais, como chuvas intensas, quanto da falha de estruturas hidráulicas, como barragens (ICOLD, 2022; Merz et al., 2021). Além do mais, as inundações são a principal força motriz dos processos em rios e planícies de inundaçāo (Junk et al., 1989; Poff et al., 1997). Quando há inundaçāo, as ondas se propagam no fluxo do rio, de modo que, elas aumentam a vazão, profundidade e velocidade da água do rio. É essencial entender como as ondas de inundaçāo se desenvolvem ao longo do rio, considerando sua velocidade de propagação, forma, volume e, especialmente, o pico máximo atingido (Chow et al., 1988; Dingman, 2009; Ponce, 2014).

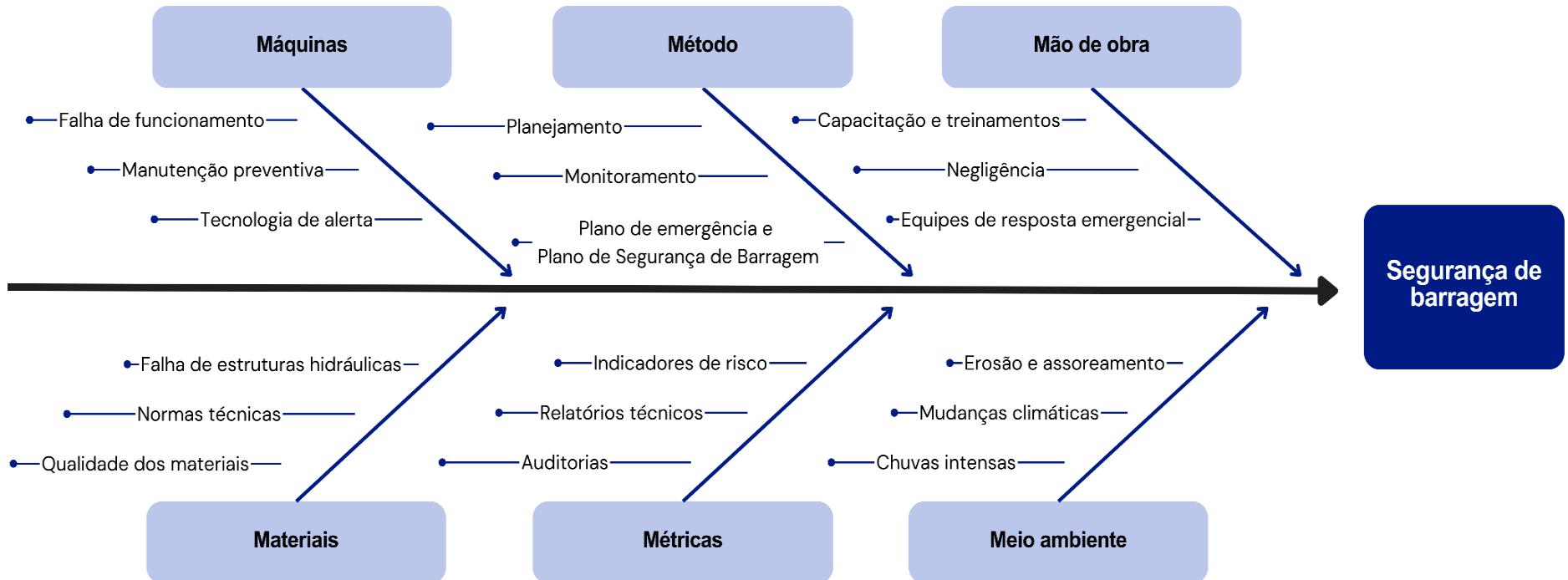
Por mais que, fatores como uso do solo e mudanças climáticas como mudar as inundações possam mudar, os processos de planície de inundaçāo do rio e as intervenções hidráulicas podem afetar significativamente as ondas de inundaçāo (Blöschl, 2022; Brunner et al., 2021; Fleischmann et al., 2016; Merz et al., 2021; Paiva et al., 2013; Wong; Laurenson, 1983). É importante a compreensão da dinâmica das ondas de inundaçāo e de sua atenuação durante a propagação rio para a estimativa e gestão de riscos relacionados a inundações naturais e de barragens, bem como para o planejamento de projetos de engenharia, operação de reservatórios e estudos ambientais (Paiva; Lima, 2024).

A Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, institui a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), que estabelece diretrizes e procedimentos voltados à manutenção da integridade estrutural e funcional dessas obras, prevenindo falhas que possam gerar riscos à população, ao meio ambiente e às atividades econômicas a jusante. A PNSB determina a realização de inspeções periódicas, monitoramento constante, fiscalização e elaboração de planos de segurança e de emergência, além de criar o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), responsável por centralizar dados técnicos de todas as barragens do país, promovendo maior transparéncia e controle (BRASIL, 2010). A segurança de

barragens é essencial, pois o rompimento de uma estrutura pode gerar inundações súbitas de grande magnitude, com perdas humanas, danos materiais expressivos, destruição de ecossistemas e impactos socioeconômicos significativos (ICOLD, 2022; Xu; Zhang, 2009). Dessa forma, a adoção de práticas preventivas, manutenção adequada, monitoramento contínuo e planejamento de ações emergenciais é fundamental para reduzir os riscos e assegurar a proteção da população, bem como o uso sustentável dos recursos hídricos (Lima; Costa e Silva, 2021).

A **Figura 1** apresenta, por meio de um diagrama de causa e efeito (Ishikawa), os principais fatores apontados pela literatura que influenciam a segurança de barragens. O diagrama evidencia como elementos relacionados a máquinas, métodos, mão de obra, materiais, métricas e meio ambiente podem contribuir para falhas estruturais e operacionais. Assim, fica claro que a segurança de barragens depende não apenas da qualidade construtiva, mas também do monitoramento contínuo, da capacitação da equipe, do planejamento adequado e das condições ambientais externas, reforçando a complexidade do gerenciamento de riscos dessas estruturas.

Figura 1 - Diagrama de causa e efeito dos fatores que influenciam a segurança de barragens.

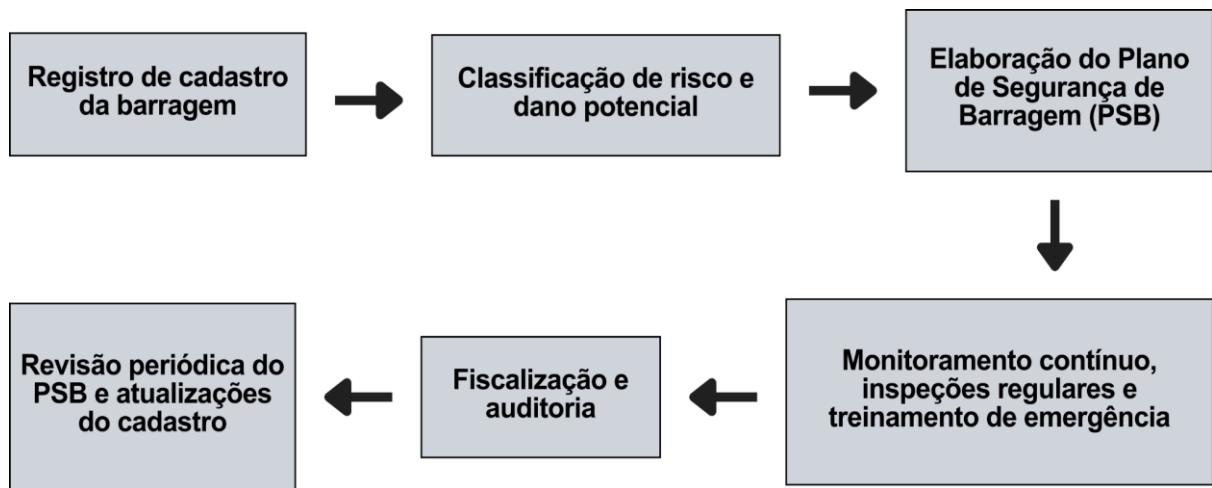


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O gerenciamento da segurança de barragens envolve um conjunto de etapas interligadas que garantem a integridade da estrutura e a proteção da população e do meio ambiente. Inicialmente, ocorre o cadastro, quando a barragem é registrada em sistemas oficiais com informações sobre localização, tipo, uso, capacidade e histórico. Em seguida, realiza-se a classificação de risco e dano potencial, determinando o potencial de impacto em função da população, meio ambiente e patrimônio, e definindo se o risco é baixo, médio ou alto. Com base nisso, é elaborado o Plano de Segurança de Barragem (PSB), que detalha medidas de segurança, inspeções, monitoramento, manutenção e ações de emergência. Após a elaboração, ocorre a implantação de medidas de segurança e monitoramento, incluindo instrumentação, inspeções visuais e manutenção preventiva. Paralelamente, há a fiscalização e auditoria pelo órgão regulador, garantindo conformidade com normas técnicas e legais. Também são realizadas revisões periódicas do PSB e atualizações do cadastro, assegurando que os planos estejam atualizados diante de alterações estruturais ou ambientais. Além de ser fundamental a preparação e treinamento para emergências, envolvendo simulações, protocolos de comunicação e rotas de evacuação para a equipe e a comunidade.

A **Figura 2** exibe um fluxograma com o ciclo completo de gerenciamento da segurança de barragens, conforme recomenda a PNSB, desde o cadastro e classificação de risco até a elaboração do PSB, implantação de medidas de monitoramento, fiscalização, revisões periódicas e preparação para emergências. Ele evidencia a natureza contínua e integrada das ações necessárias para garantir a segurança estrutural e operacional das barragens, bem como a proteção da população e do meio ambiente.

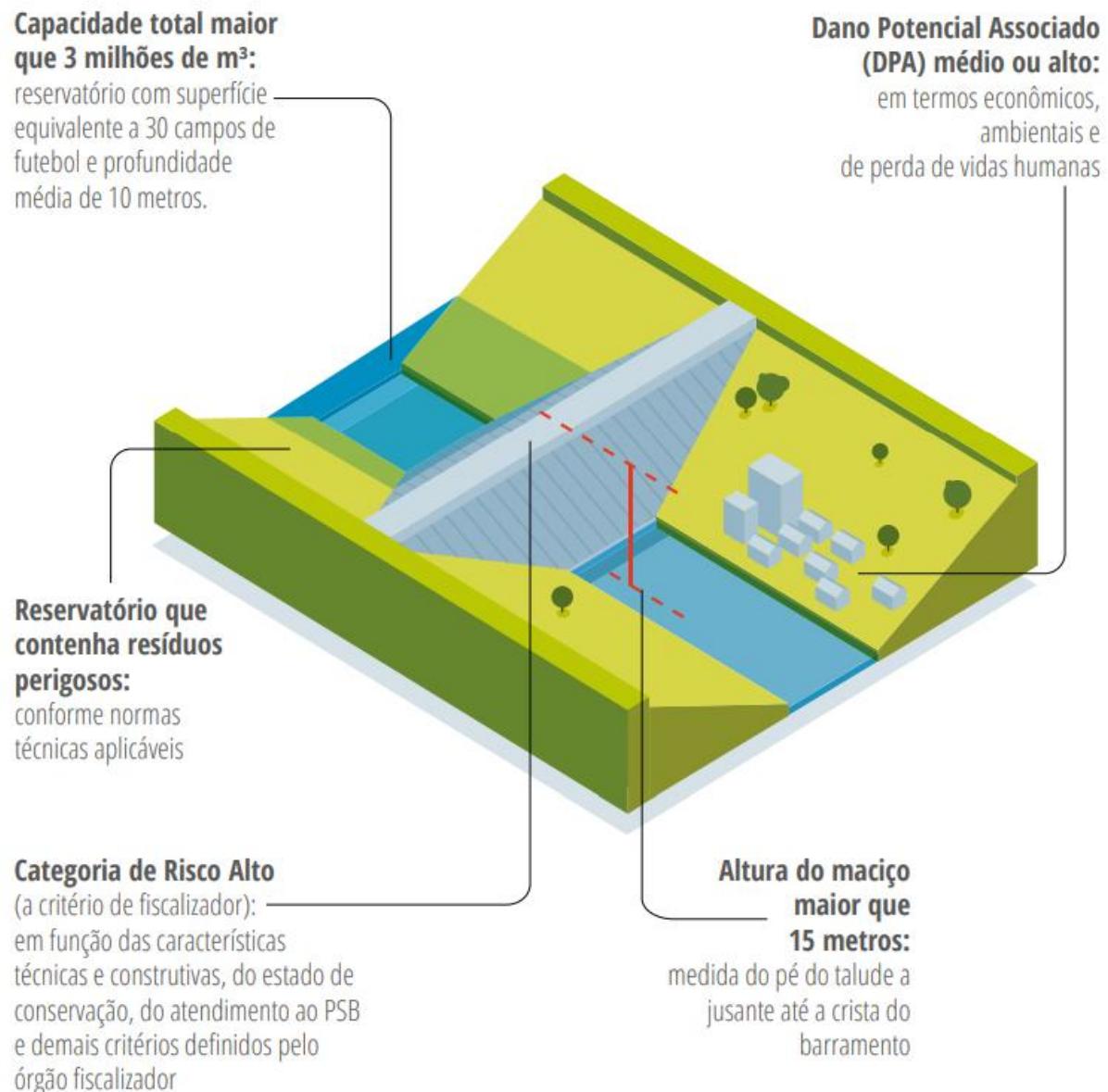
Figura 2 - Fluxograma das etapas do gerenciamento da segurança de barragens com base nas diretrizes da PNSB Brasil (2010).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A classificação das barragens no Brasil é realizada com base na metodologia da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), que considera aspectos de risco e potencial de dano associados à estrutura (BRASIL, 2024). A Resolução nº 143 do CNRH, de 10 de julho de 2012, estabelece os critérios gerais de classificação das barragens por categoria de risco e dano potencial associado, e pelo seu volume, com base no art. 7º da Lei nº 12.334. Nesse contexto, cada barragem recebe uma avaliação quanto ao Dano Potencial Associado (DPA), que pode ser classificado como baixo, médio ou alto, refletindo o impacto esperado em caso de rompimento, incluindo perdas humanas, danos econômicos e impactos ambientais. Além disso, é atribuída uma Categoria de Risco (CRI), também dividida em baixa, média ou alta, que considera a probabilidade de falha da barragem em função de suas características construtivas, operação, manutenção e vulnerabilidade a eventos hidrológicos extremos. Essa classificação é fundamental para orientar ações de monitoramento, fiscalização e elaboração de planos de segurança de barragem (PSB), permitindo priorizar intervenções e reduzir riscos à população e ao meio ambiente a jusante (BRASIL, 2024; ANA, 2016). A **Figura 3** apresenta de forma esquemática esses parâmetros definidos na legislação, ilustrando os critérios que determinam o enquadramento das barragens segundo a PNSB.

Figura 3 - PNSB — Características para enquadramento (Lei nº 12.334/2010, Art. 1º).



Fonte: ANA (2025).

Além das classificações propostas pela PNSB, existe ainda uma categorização realizada pela Fundação Espírito-Santense de Tecnologia (FEST, 2024), que avaliou pequenas barragens em um trecho de 2 km da rodovia BR-101/ES, com o objetivo de estimar o impacto potencial de um rompimento hipotético sobre a via. Foram analisadas variáveis como a posição das barragens em relação à rede hidrográfica e à rodovia, o volume armazenado, a área de drenagem, a vazão máxima prevista para um tempo de retorno de 100 anos e a presença de estruturas a jusante. Com base nesses critérios, as barragens foram classificadas em quatro níveis de impacto: baixo, médio, alto e crítico.

4.2. Simulação de Rompimento de Barragens

A simulação de inundações causadas por falhas de barragens é uma metodologia importante para avaliar a exposição ao risco e elaborar planos de evacuação a jusante das barragens. Após a estimativa de um hidrograma de vazão defluente com base em um cenário de falha de barragem, a onda de cheia resultante a jusante pode ser simulada usando uma variedade de métodos diferentes (Chen; Capart, 2020) e a mancha de inundaçāo estimada com base em topografia local ou em Modelos Digitais de Elevação (MDE).

As Curvas Cota–Área–Volume (CAV) exercem papel crucial ao relacionarem a variação da elevação do reservatório com a área alagada correspondente e o volume armazenado, fundamental para a modelagem hidráulica e o dimensionamento de cenários de colapso. Entretanto, em pequenas barragens, frequentemente não há disponibilidade dessas curvas ou os dados topográficos necessários para sua elaboração. Nesses casos, utiliza-se abordagem alternativa e simplificada, conforme recomendada pelo Parecer Técnico n. 11/2021-SRE da ANA (ANA, 2021), o qual apresenta uma metodologia para estimar, de maneira indireta e automática, a altura e o volume dos barramentos com base em variáveis acessíveis e MDE, possibilitando o preenchimento do SNISB e a priorização das estruturas sob o escopo da Lei n. 12.334/2010. Ana (2021, p 1) explica que:

“O presente parecer técnico apresenta uma metodologia para estimar, de forma simplificada, a altura e o volume de barragens/reservatórios nos quais essa informação não é conhecida, para fins de segurança de barragens, preenchimento do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) e classificação preliminar.”

Em situações que exigem respostas rápidas, recomenda-se recorrer a modelos simplificados e de fácil aplicação. Diversas soluções analíticas foram propostas para a propagação a jusante de ondas de inundaçāo de ruptura de barragens. Entre elas, algumas soluções analíticas foram formuladas para o fluxo de ruptura de barragens em canal sem atrito (por exemplo, Chen et al., 2011, Wang et al., 2017, Wang et al., 2020, Zanuttigh e Lamberti, 2001), outras são baseadas na hipótese de onda de inundaçāo cinemática (Chen e Capart, 2020). No entanto, a escolha de um modelo completo é preferível, pois negligenciar termos como atrito ou termos iniciais pode ter consequências significativas nos resultados numéricos (Ferrari et al., 2023, Fread, 1982).

Um estudo mais recente, realizado por Wang et al. (2023), considera a resistência hidráulica, bem como os termos iniciais, assumindo de qualquer maneira um canal horizontal. No entanto, a inclinação longitudinal também deve ser levada em consideração para que a solução proposta possa ser aplicada a um caso real (Macchione; Graziano, 2024).

A avaliação do impacto hidráulico de rompimentos de barragens constitui uma etapa fundamental no gerenciamento de riscos, permitindo estimar cenários de inundação e parâmetros hidrodinâmicos essenciais, como velocidade, profundidade e vazão, além de identificar áreas de risco para planejamento de ações emergenciais (Wahl, 1998; Singh; Snorrason, 2004; USACE, 2010). Nessa avaliação, a simulação matemática tem sido amplamente utilizada.

A modelagem pode ser realizada por métodos analíticos, empíricos ou numéricos, sendo estes últimos os mais utilizados devido à sua capacidade de representar a complexidade do fenômeno (Andrade et al., 2024). Métodos numéricos baseiam-se na discretização de equações de escoamento, como as equações de *Saint-Venant* (1D ou 2D) ou de *Navier-Stokes* (3D), utilizando malhas computacionais estruturadas ou não, e algoritmos explícitos ou implícitos (Fread, 1991; Wahl, 1998).

Softwares bidimensionais, como *RiverFlow 2D*, *Flo 2D*, *Mike 21* e *HEC-RAS*, permitem simular escoamentos predominantemente horizontais, com menor custo computacional e tempo de processamento, sendo amplamente empregados em estudos hidrológicos e hidráulicos (Andrade et al., 2024). Por outro lado, softwares tridimensionais, como *FLOW-3D* e *OpenFoam*, possibilitam capturar efeitos verticais complexos, turbulência e interações com estruturas, sendo indicados para situações em que a variação vertical da velocidade e da pressão é significativa, incluindo o comportamento de fluidos não newtonianos, como os encontrados em barragens de rejeitos (Konečný; Ševčík, 2016; FLOW-3D, 2023; Andrade et al., 2024).

Estudos de simulação de eventos históricos, como os rompimentos das barragens de Malpasset (França, 1959), Gleno (Itália, 1923), Vajont (Itália, 1963) e Fundão (Brasil, 2015), demonstraram a aplicabilidade e as limitações de diferentes softwares em termos de precisão, discretização, tratamento de condições de contorno e representação de propriedades reológicas (Dias et al., 2019; O'Brien et al., 2014; Zhao et al., 2018; Silva et al., 2019; Andrade et al., 2024). A escolha do software adequado

deve considerar o objetivo do estudo, a complexidade do escoamento, a disponibilidade de dados e recursos computacionais, sendo fundamental para garantir resultados confiáveis para a mitigação de riscos e a proteção das comunidades a jusante, conforme recomenda a Canadian Dam Association (CDA, 2021).

Além do mais, a avaliação do impacto da variação de parâmetros em modelos hidrológicos constitui uma etapa fundamental para verificar a robustez dos resultados e reduzir as incertezas associadas às simulações. Nesse contexto, adota-se a análise de sensibilidade como ferramenta metodológica, a qual consiste em variar sistematicamente determinados parâmetros enquanto os demais permanecem constantes, de modo a quantificar a influência relativa de cada um sobre os resultados obtidos. Tal abordagem contribui para aprimorar os processos de calibração e validação, além de fornecer subsídios para a interpretação mais confiável dos cenários de simulação (Saltelli, 2008).

A análise conjunta dos parâmetros considerados permite compreender diferentes aspectos dos comportamentos das ondas de cheia. A celeridade indica o tempo disponível para adoção de medidas emergenciais, fornecendo uma estimativa da rapidez com que a inundação se propaga, importante parâmetro a ser considerado no plano de emergência no caso de ruptura de barragem. A extensão da mancha de inundação evidencia o grau de ocupação da planície fluvial e o alcance lateral dos impactos. Já o fator de atenuação representa a taxa de dissipaçāo da energia da onda ao longo do percurso. Além do mais, a distância de atenuação de 50% permite estimar o alcance espacial da cheia e sua persistência no canal, funcionando como um indicador da intensidade do evento a jusante.

4.3. Barragens no Espírito Santo

Com o desenvolvimento agrícola e a maior necessidade de produção de alimentos, houve um aumento na construção de pequenas barragens, especialmente em áreas rurais e regiões áridas. Elas são utilizadas para irrigação, dessedentação de animais e até para minimizar problemas com inundações, contribuindo de forma significativa para o desenvolvimento socioeconômico de pequenas propriedades rurais. Além disso, possuem potencial para mitigar consequências futuras das mudanças climáticas. No entanto, devido à falta de manejo adequado por parte dos proprietários,

podem se tornar uma ameaça para a região onde estão instaladas (Bocchiola et al., 2014; Alahiane et al., 2016; Agoramoorthy et al., 2016).

Conforme o Relatório Estadual de Segurança de Barragens 2024 da Agência Estadual de Recursos Hídricos (Agerh), o estado do Espírito Santo possui 421 barragens cadastradas, sendo que aproximadamente 64% delas estão classificadas com Categoria de Risco (CRI) alta. No entanto, apenas 19 Planos de Segurança de Barragem (PSB) foram apresentados à Agerh até 2024, sendo apenas 1 no ano de 2024. Isso indica que, apesar da alta classificação de risco, a adoção de PSBs ainda é limitada (AGERH, 2025).

Segundo a Agerh (2025), o Espírito Santo possui um número significativo de barragens, com destaque para as de pequeno porte, utilizadas principalmente para armazenamento de água em propriedades rurais. Essas estruturas desempenham um papel crucial na segurança hídrica, especialmente em períodos de estiagem. No entanto, muitas dessas barragens não estão regularizadas ou são desconhecidas pelas autoridades competentes.

No estado do Espírito Santo, a Agerh estimou que 40% das 35 mil barragens em território capixaba estavam em situação irregular em 2023 (Barragens irregulares no ES, 2023). Além disso, muitas barragens e represas não estão contabilizadas ou são desconhecidas pelo poder público, pois foram construídas irregularmente, sem manutenção regular, documentação ou cumprimento de normas de engenharia. Desta forma, o expressivo número de barragens no estado, potencializado por estruturas irregulares, vem aumentando o risco de rompimentos.

Um estudo realizado pela Fundação Espírito-santense de Tecnologia (FEST) (2024) analisou e priorizou pequenas barragens localizadas em uma faixa de 2 km ao longo da rodovia BR-101/ES, sob concessão da Ecorodovias Ecovias 101 no estado do Espírito Santo, considerando o potencial impacto de seu rompimento hipotético sobre a rodovia. As barragens pré-selecionadas foram avaliadas quanto à posição espacial em relação à hidrografia local e à rodovia, volume reservado, área de drenagem no barramento, vazão máxima com tempo de retorno de 100 anos e existência de barragens a jusante. Cada métrica recebeu pontuações de 1 a 4, correspondentes aos níveis de impacto Baixo, Médio, Alto e Crítico. O estudo estabeleceu uma classificação relativa das barragens, priorizando aquelas com maior risco potencial de

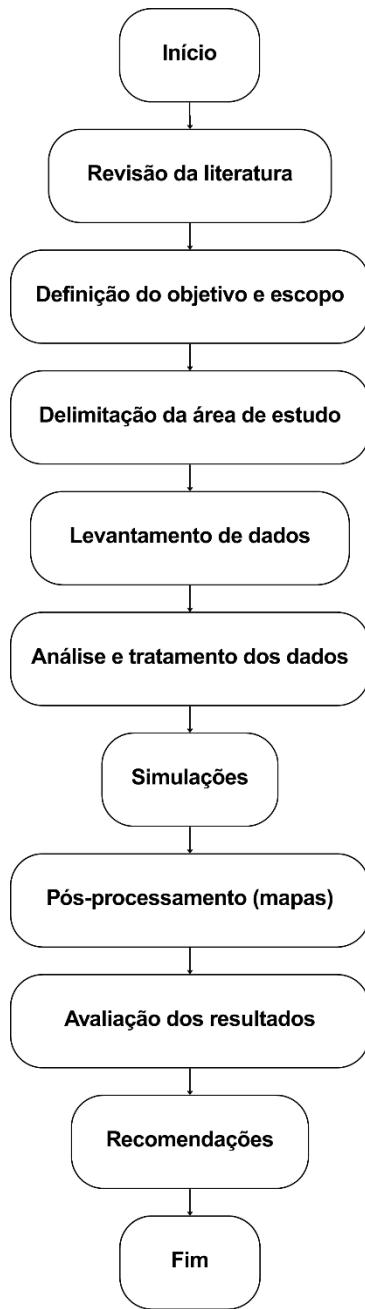
impacto, que requerem monitoramento constante e intervenções urgentes. Embora a avaliação não tenha considerado modelagem detalhada de propagação de cheias, fornece uma base sólida para direcionamento de recursos e planejamento de estudos futuros mais completos sobre o rompimento das barragens e seus efeitos sobre a infraestrutura rodoviária (FEST, 2024).

5. METODOLOGIA

A metodologia adotada fundamenta-se na aplicação de um modelo simplificado de propagação e atenuação de ondas de cheia decorrentes de rompimento de barragens, proposto por Paiva e Lima (2024), a partir da integração de dados hidrológicos, geomorfológicos e cartográficos. Foram utilizados parâmetros secundários referentes às características físicas das bacias hidrográficas (área de drenagem, declividade, tempo de concentração), bem como informações sobre a geometria e a capacidade de armazenamento das barragens. Para a caracterização espacial, foram empregadas imagens de satélite de alta resolução e bases cartográficas digitais. Esses dados serviram de insumo para a simulação hidráulica do comportamento das ondas de cheia, permitindo a estimativa da atenuação do pico e a delimitação das áreas suscetíveis à inundação, com foco em pequenas barragens e uma grande barragem do Espírito Santo, mas que apresentam elevado risco em caso de rompimento.

A **Figura 4** mostra, por meio de um fluxograma, as etapas seguidas na realização deste trabalho.

Figura 4 - Fluxograma da metodologia empregada neste trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.1. Área de Estudo

A área de estudo abrange algumas barragens situadas no estado do Espírito Santo, com foco em estruturas de pequeno porte, mas com diferentes classificações de DPA e características, permitindo avaliar o comportamento de diferentes tipos de estruturas sob cenários de ruptura. Foram selecionadas barragens representativas de pequeno

porte, localizadas nos municípios de Aracruz (códigos SNISB 27748 e 27757) e Conceição da Barra (código SNISB 21640).

As pequenas barragens estão incluídas no estudo desenvolvido pela Fundação Espírito-Santense de Tecnologia (FEST), voltado à análise e priorização de barragens localizadas próximas à rodovia BR-101/ES, no trecho sob concessão da Eco101. Neste estudo, o potencial impacto de um eventual rompimento foi avaliado por meio de métricas que receberam pontuações de 1 a 4, correspondentes aos níveis baixo, médio, alto e crítico. Com base nessas pontuações, foi estabelecida uma classificação relativa das barragens, permitindo priorizar aquelas com maiores riscos potenciais de impacto, que demandam monitoramento constante e intervenções urgentes.

As barragens de pequeno porte selecionadas para este estudo estão localizadas nos municípios de Aracruz (códigos SNISB 27748 e 27757) e Conceição da Barra (código SNISB 21640).

Quadro 1 - Informações Fest (2024) a respeito das barragens de pequeno porte.

Código SNISB	Município	Categoria de Risco	DPA	Região Hidrográfica	Curso D'água Barrado
27748	Aracruz	Médio	Médio	Atlântico Sudeste	Córrego São José
27757	Aracruz	Médio	Médio	Atlântico Sudeste	Córrego São José
21640	Conceição da Barra	Médio	Baixo	Atlântico Leste	Córrego Braço do Rio

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Essas barragens foram avaliadas quanto ao potencial impacto em caso de rompimento, através de métricas que consideram risco à população, danos ambientais e à infraestrutura local. A classificação final atribuída a cada barragem, seguindo os critérios do estudo da FEST é apresentada no Quadro 2.

Quadro 2 - Classificação final feita pela Fest (2024) das pequenas barragens selecionadas quanto ao potencial impacto devido a um eventual rompimento.

Código SNISB	Município	Classificação potencial impacto
27748	Aracruz	Médio
27757	Aracruz	Alto
21640	Conceição da Barra	Crítico

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Essa categorização permitiu a priorização de ações de monitoramento, manutenção e intervenções preventivas, por parte dos autores, considerando a vulnerabilidade de cada estrutura.

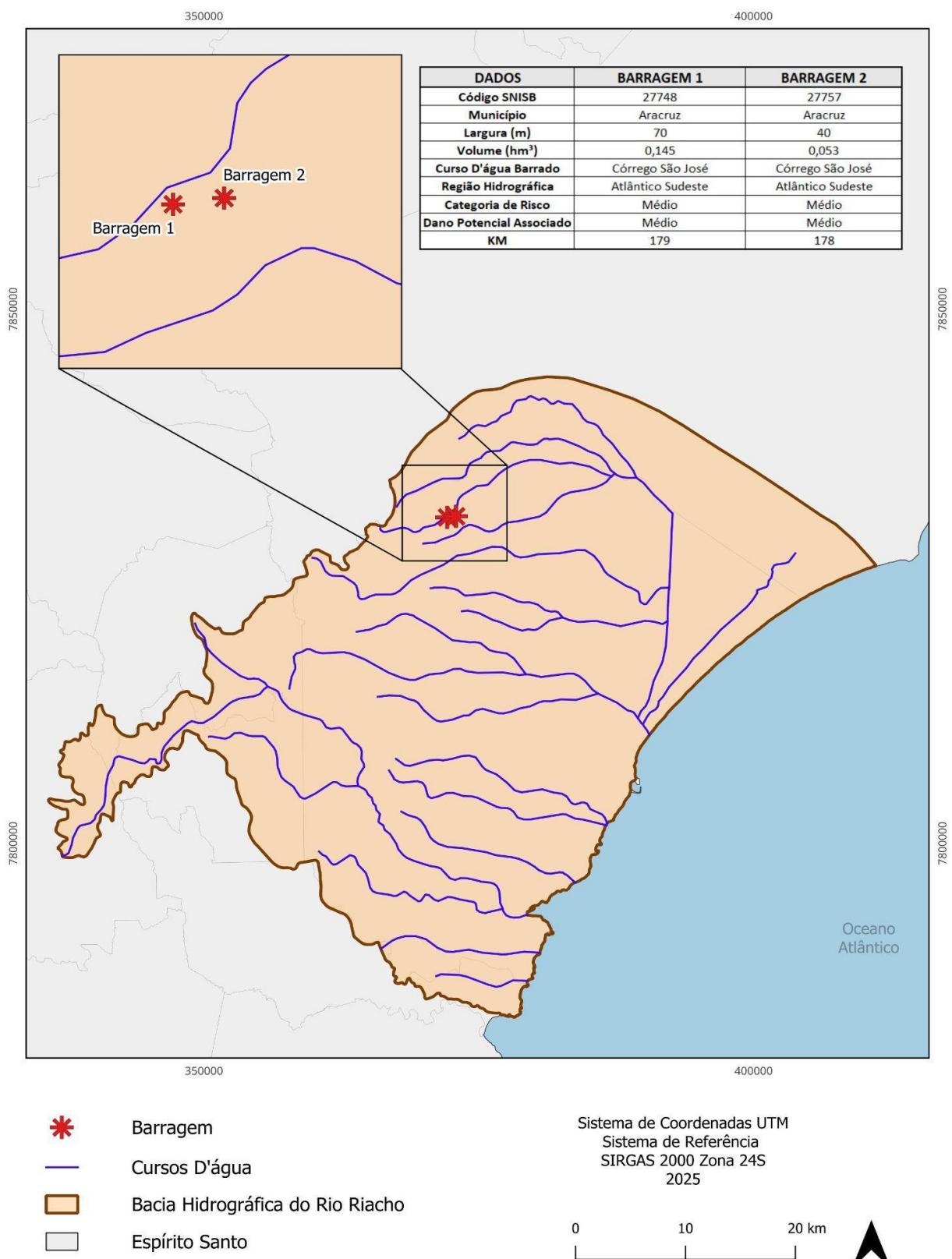
As **Figuras 5 a 9** apresentam as localizações das barragens cadastradas no SNISB sob os códigos 27748, 27757 e 21640. Estão situadas nos municípios de Aracruz e Conceição da Barra, no estado do Espírito Santo. Os mapas foram elaborados a partir de imagens de satélite (Google Satélite), utilizando o sistema de coordenadas SIRGAS 2000, UTM zona 24S, com escalas variando entre 1:4.000 e 1:5.000.

A análise espacial permite observar que as três estruturas estão inseridas em áreas rurais, com predominância de atividades agropecuárias e fragmentos de vegetação nativa no entorno. As barragens SNISB 27748 e 27757, localizadas em Aracruz, situam-se próximas a áreas de cultivo agrícola, sendo possível identificar a presença de estradas vicinais e, no caso da barragem 27748, também a proximidade de uma rodovia estadual, o que indica maior potencial de impacto econômico e logístico em cenários de falha. A barragem SNISB 21640, em Conceição da Barra, encontra-se em uma área caracterizada por extensas plantações e mosaicos de vegetação, sem evidências significativas de ocupação populacional no entorno imediato, o que reduz o risco direto à vida humana, mas não elimina a possibilidade de prejuízos ambientais e produtivos.

Em síntese, os mapas evidenciam que, apesar de estarem inseridas em contextos rurais, as barragens analisadas apresentam particularidades quanto ao uso do solo e à infraestrutura presente em suas proximidades. Enquanto as barragens de Aracruz

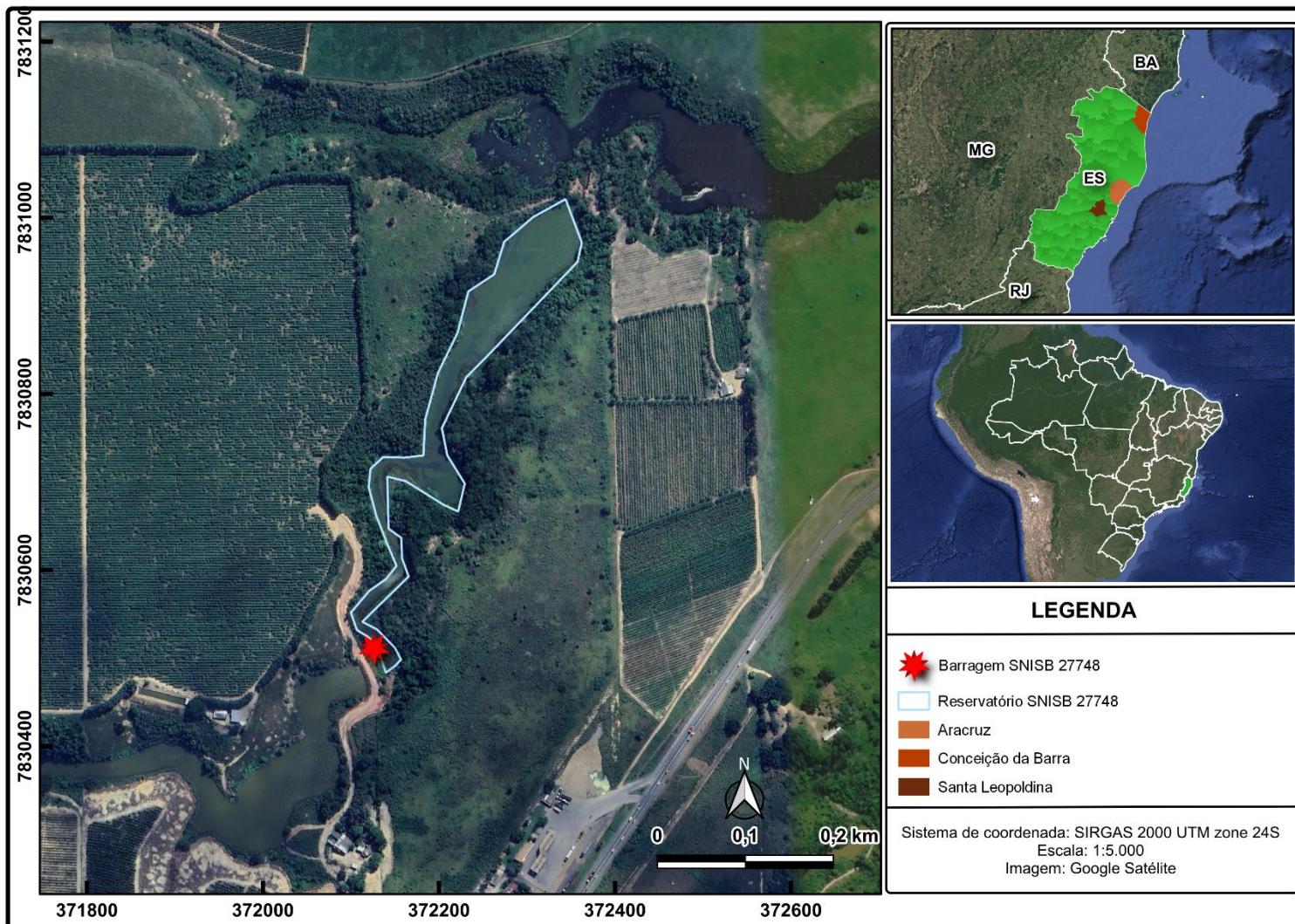
possuem maior proximidade com vias de circulação e atividades agrícolas diversificadas, a barragem de Conceição da Barra apresenta um entorno mais homogêneo, marcado por áreas agrícolas contínuas. Essas diferenças são relevantes para a avaliação do impacto potencial associado a cada estrutura, tanto no que se refere a riscos socioeconômicos quanto ambientais.

Figura 5 - Localização das Barragens SNISB 27748 e 27757 em Aracruz, com base em dados da CPRM (2025).



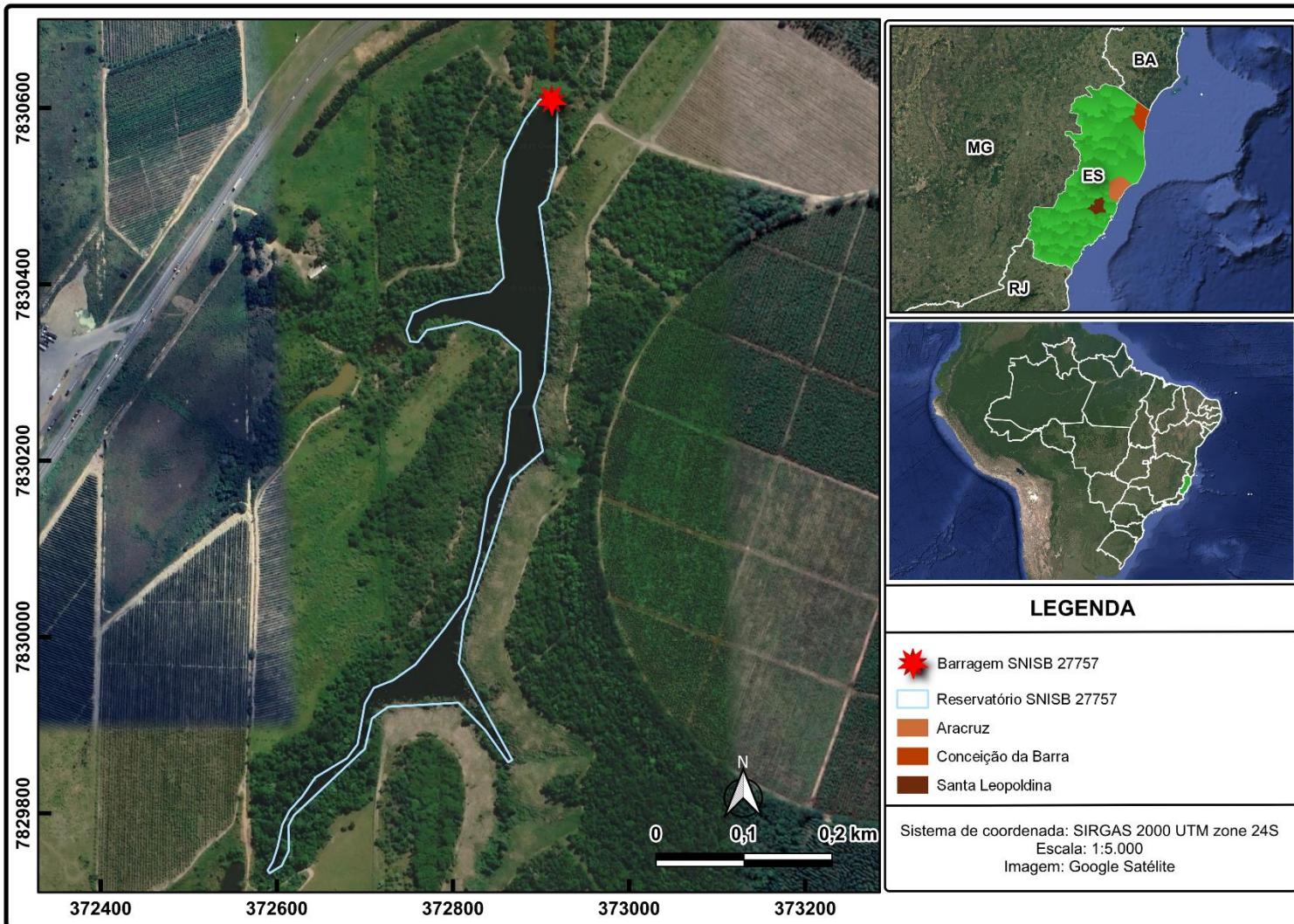
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 6 - Área de estudo e entorno da Barragem SNISB 27748.



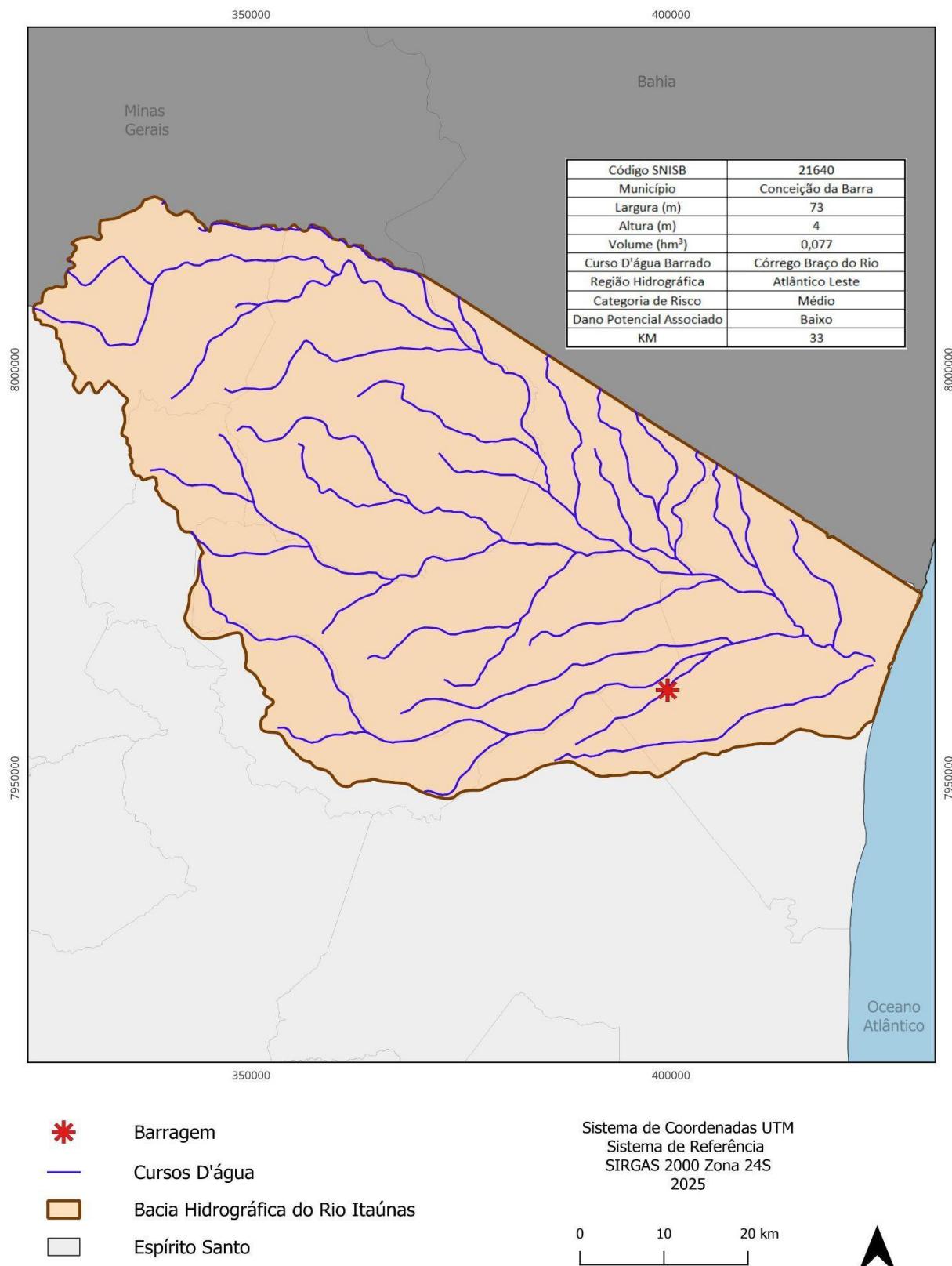
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 7 - Área de estudo e entorno da Barragem SNISB 27757.



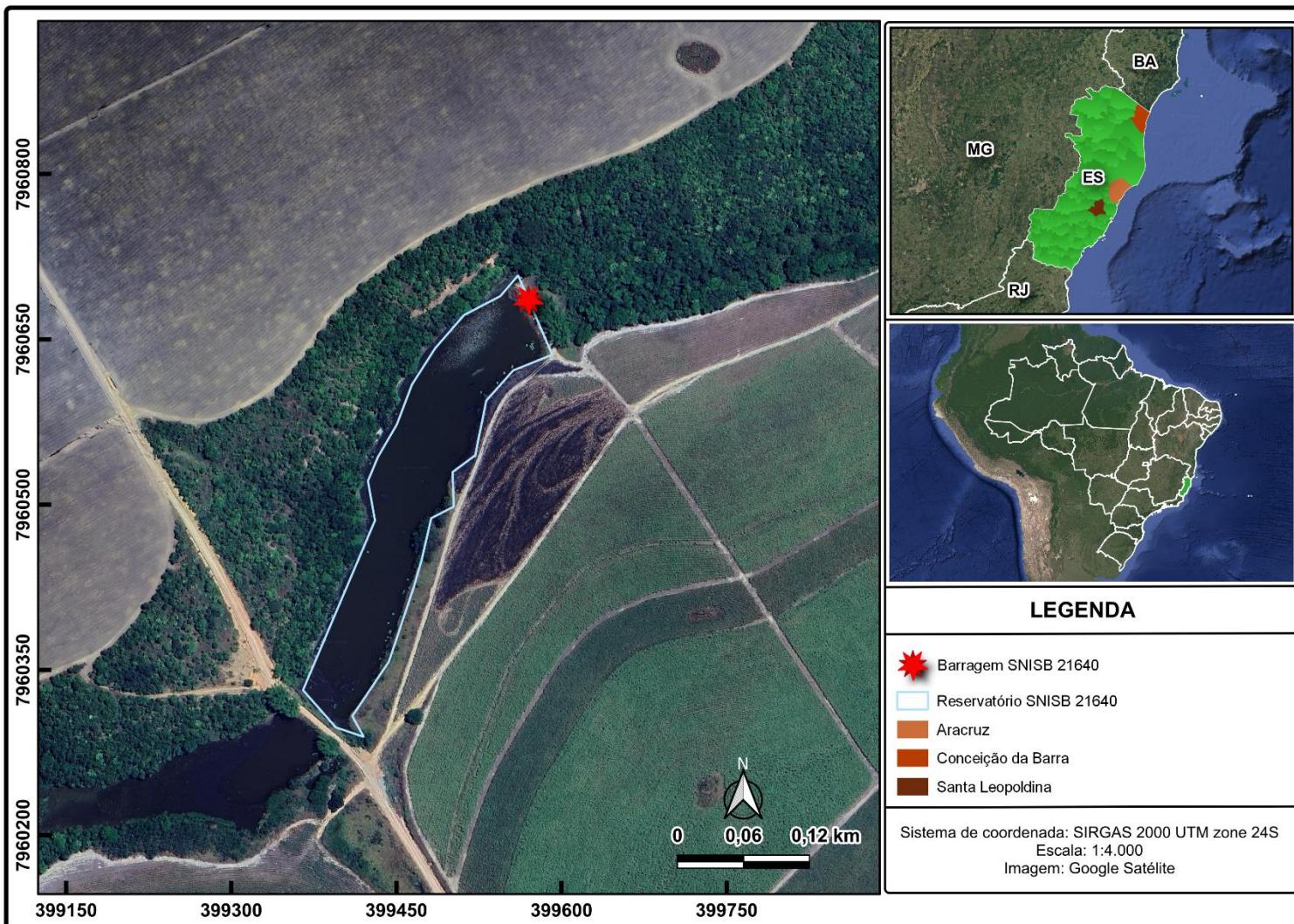
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 8 - Localização da Barragem SNISB 21640 em Conceição da Barra, com base em dados da CPRM (2025).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

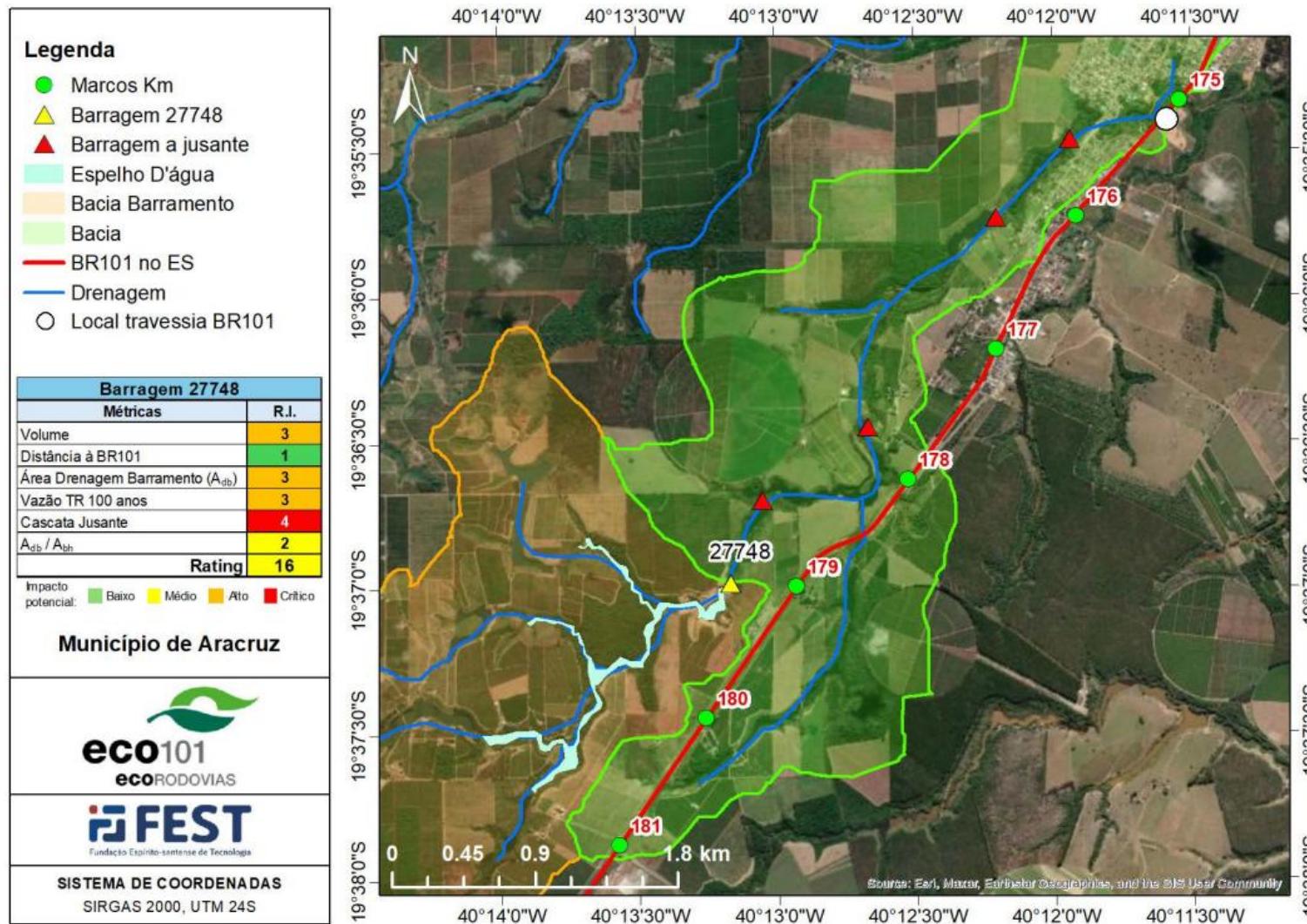
Figura 9 - Área de estudo e entorno da Barragem SNISB 21640.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

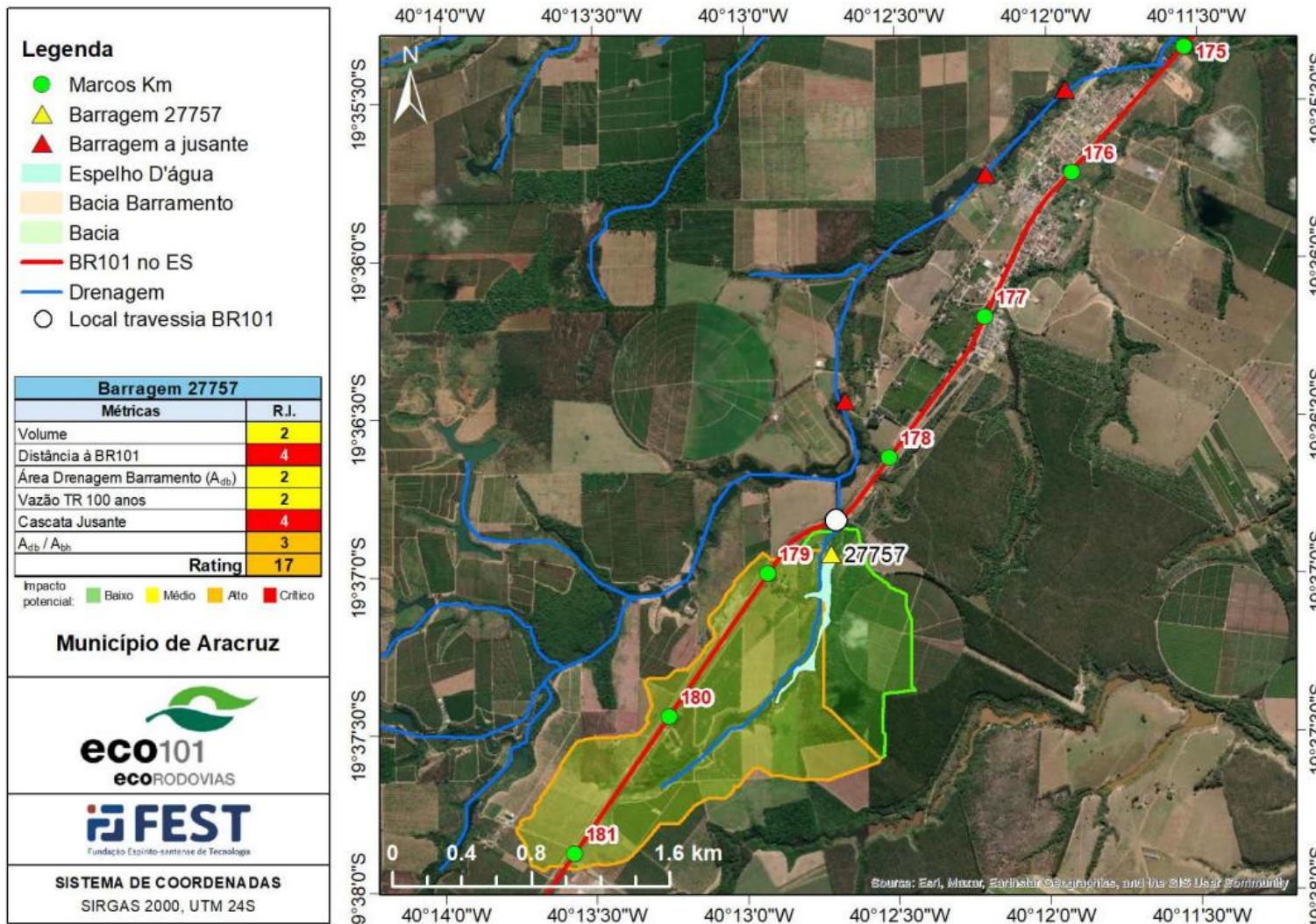
Da **Figura 10** à **Figura 12** são apresentados os mapas de localização das barragens SNISB 27748 e SNISB 27757, situadas no município de Aracruz – ES, e da barragem SNISB 21640, localizada em Conceição da Barra – ES, com destaque para elementos considerados no estudo realizado pela FEST (2024). Esse mapeamento evidencia a posição das barragens em relação à rodovia BR-101, ressaltando ainda a rede de drenagem, bacias de contribuição e demais barragens a jusante, aspectos que foram utilizados como métricas para avaliar o risco potencial de impacto em caso de rompimento. Essa representação espacial permite visualizar a proximidade da infraestrutura rodoviária e a área potencialmente influenciada em caso de rompimento, constituindo um importante subsídio para a análise de risco e definição de medidas de segurança. Vale ressaltar que a avaliação desenvolvida no estudo da FEST (2024) para classificar as barragens contempla variáveis como a posição espacial em relação à rede hidrográfica e à rodovia, o volume armazenado, a área de drenagem do barramento, a vazão máxima estimada para um tempo de retorno de 100 anos e a existência de outras barragens a jusante.

Figura 10 - Mapa de localização da barragem SNISB 27748 e parâmetros de classificação de risco.



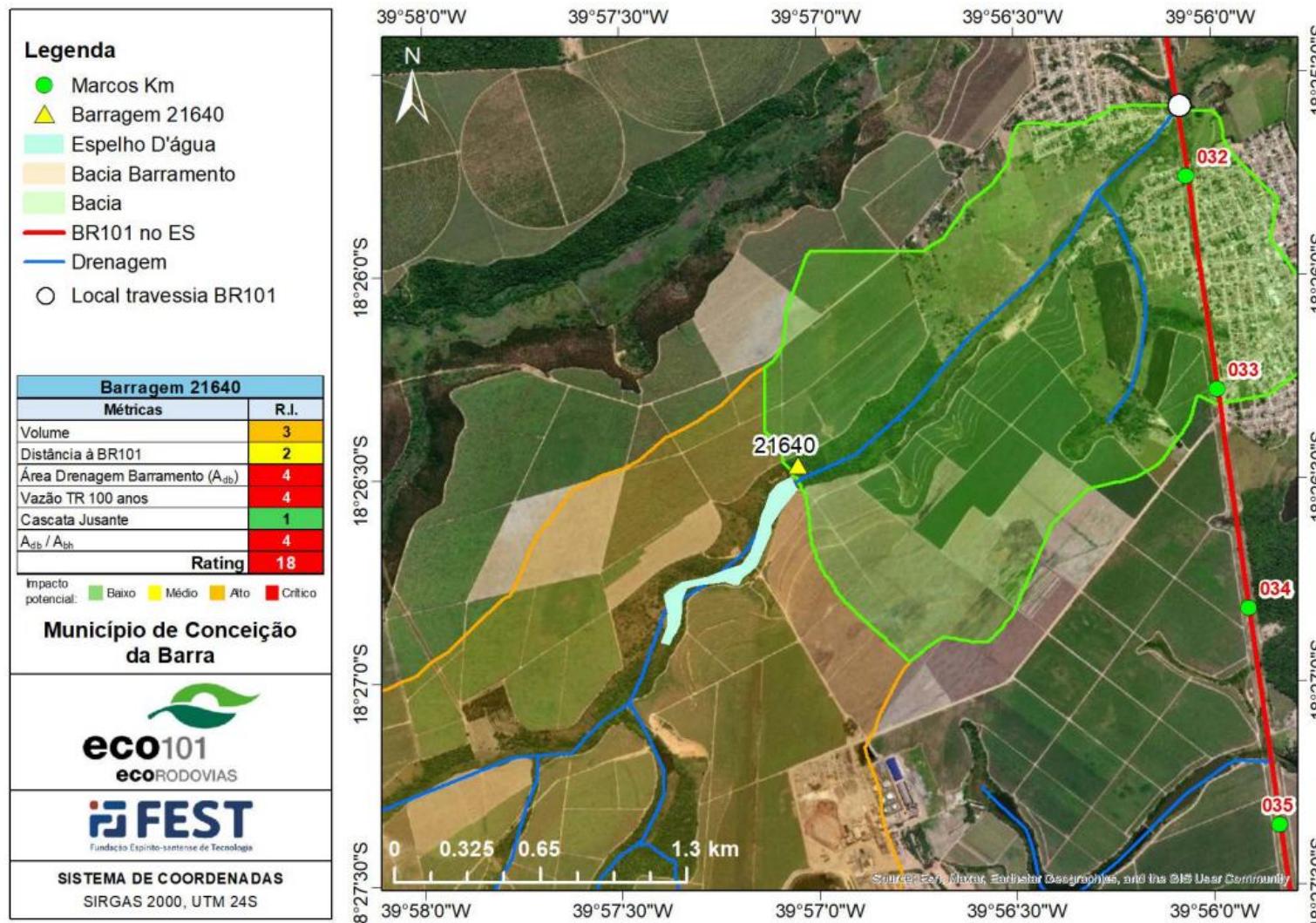
Fonte: FEST (2024).

Figura 11 - Mapa de localização da barragem SNISB 27757 e parâmetros de classificação de risco.



Fonte: FEST (2024).

Figura 12 - Mapa de localização da barragem SNISB 21640 e parâmetros de classificação de risco.



Fonte: FEST (2024).

5.2. Estimativas das ondas de cheia

As estimativas das ondas de cheia resultantes dos rompimentos de barragens constituem etapas essenciais para a análise de riscos hidrológicos e para a compreensão de impactos potenciais a jusante. O processo de formação e propagação das ondas depende de variáveis associadas tanto às características do reservatório quanto às condições geomorfológicas e hidráulicas dos canais receptores.

A definição dos parâmetros hidrológicos e hidráulicos necessários fundamentou-se em bases de dados secundárias e em informações extraídas de imagens de satélite, utilizadas para caracterizar os cursos d'água e suas planícies de inundação. Essa estratégia, embora limitada pela disponibilidade dos dados, mostrou-se adequada para estudos preliminares, nos quais o objetivo principal é identificar tendências gerais dos comportamentos das ondas. Os volumes das ondas de cheia foram assumidos como equivalentes aos volumes totais armazenados nos reservatórios nos momentos das rupturas, enquanto os tempos de subida foram associados aos intervalos de formação das brechas, conforme indicado na literatura por Wahl (1998).

A resistência ao escoamento foi representada por meio do coeficiente de Manning, atribuído em função das características locais, e os cálculos subsequentes foram realizados com base em formulações consagradas de hidráulica fluvial (Singh & Snorrason, 1984). Ainda que a adoção de um valor único para o coeficiente simplifique os cálculos, ela não captura a heterogeneidade espacial típica dos canais fluviais, o que constitui limitação a ser considerada na interpretação dos resultados. Os parâmetros e resultados foram sistematizados em planilha eletrônica, possibilitando a organização dos cenários simulados.

Com base nessas premissas, procedeu-se à aplicação de um modelo simplificado para simulação da propagação da onda de cheia, permitindo avaliar a atenuação do pico de vazão ao longo do curso do rio em diferentes condições. Essa abordagem, ainda que baseada em formulação simplificada, possibilita identificar tendências gerais do comportamento hidrodinâmico associado à ruptura de barragens e fornece subsídios para a análise comparativa de cenários em distintas situações. Embora esse tipo de modelo não substitua ferramentas hidrodinâmicas completas, sua utilização representa alternativa eficiente para análises exploratórias, sobretudo em regiões

onde não há disponibilidade de séries históricas ou de levantamentos topográficos detalhados.

5.2.1. Modelo de atenuação de ondas de cheia

Para elaboração deste estudo, foi utilizado o modelo de atenuação da onda de cheia desenvolvido para prever a atenuação da vazão de pico da onda de cheia proposto por Paiva e Lima (2024). Esse modelo, fundamentado em princípios físicos, o modelo pode ser aplicado de forma simples utilizando uma equação simplificada (**Equação 1**) que incorpora parâmetros comumente disponíveis relacionados às características do rio e do hidrograma afluente (**Equação 2**). Ele representa a onda de cheia ao longo da sua trajetória, tendo como base o modelo de difusão com efeitos inerciais (Paiva e Lima, 2024). O modelo também considera que o hidrograma e perfil da onda possuem forma e volume constantes e considera uma curva chave de vazões genérica, armazenamento na planície de inundação e celeridade e difusividade variáveis representados na **Figura 13** (Paiva e Lima, 2024).

As demais equações a seguir constituem foram empregadas no desenvolvimento do modelo simplificado de atenuação da onda de cheia de Paiva e Lima (2024). Tais expressões permitem representar, de forma simplificada, os principais processos hidrodinâmicos envolvidos na propagação da onda resultante do rompimento hipotético de barragens, abrangendo desde a caracterização das condições iniciais do escoamento até a estimativa dos efeitos de difusão e atenuação ao longo do canal. As fórmulas contemplam parâmetros hidráulicos e geométricos fundamentais para viabilizar a análise do comportamento da vazão em função da distância e, consequentemente, a avaliação dos impactos potenciais associados à propagação da onda de cheia.

$$\frac{Q(x)}{Q_0} = \frac{1}{[1 + \varphi x]^{\beta/3}} \quad \text{Equação 1}$$

$$\varphi = \frac{3}{\beta} \frac{D h_0}{c_0^3} \left(\frac{w_t}{w} \right)^2 C' \frac{Q_0^2}{V^2} \quad \text{Equação 2}$$

$$Q_0 = \frac{2 * V}{T * 3600} \quad \text{Equação 3}$$

$$T_{rise} = \frac{T}{2} \times s \quad \text{Equação 4}$$

$$C' = 5,78 \times s^{-0,33} \quad \text{Equação 5}$$

$$h_0 = \left(\frac{Q_0 \times n}{S_0^{0,5} / w} \right)^{3/5} \quad \text{Equação 6}$$

$$U = \frac{Q_0}{h_0 \times w} \quad \text{Equação 7}$$

$$c_0 = \frac{5}{3} \times U \quad \text{Equação 8}$$

$$c_0^* channel = \left(c_0 \times \left(\frac{1 + h_0}{\left(\frac{w_t}{w} \times T_{rise} \times 3600 \times S_0 \right)} \right) \right)^{0,5} \quad \text{Equação 9}$$

$$c_0^* = \frac{c_0^* channel}{\frac{w_t}{w}} \quad \text{Equação 10}$$

$$c_d = \sqrt{9,81 \times h_0} \quad \text{Equação 11}$$

$$\nu = \frac{c_0^*}{c_d} \quad \text{Equação 12}$$

$$F_r^2 = \left(\frac{\nu}{2/3} \right)^2 \quad \text{Equação 13}$$

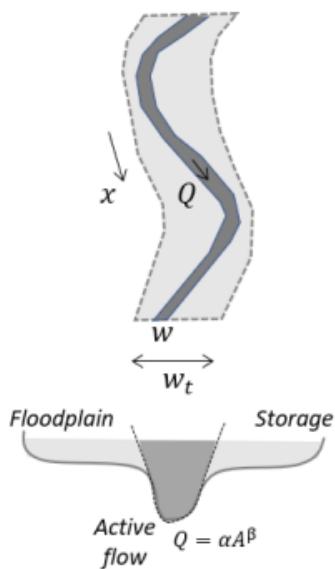
$$Dh_0 = \left(\frac{Q_0}{2 \times w \times S_0} \right) \times (1 - \nu^2) \quad \text{Equação 14}$$

$$F_{atenuação} = \frac{3}{\left(\frac{5}{3} \right) \times \left(\frac{Dh_0}{c_0^* channel} \right)^3 \times \left(\frac{w_t}{w} \right)^2 \times C' \times Q_0^2 \div V^2} \quad \text{Equação 15}$$

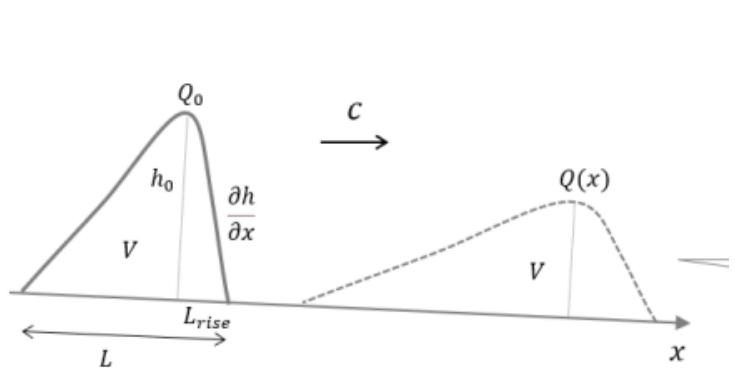
$$L_{atenuação} 50\% (km) = \frac{0,00248}{F_{atenuação}} \quad \text{Equação 16}$$

Figura 13 – Representação da onda de cheia pelo modelo de atenuação da onda de cheia: a) Seção transversal do rio ativa com parâmetros de classificação de fluxo α e β e armazenamento da planície de inundação com a razão entre a largura da planície e o rio (w_t/w); b) Hidrogramas de vazão a montante e jusante volume V , formato, e curvatura relativa C' no pico constantes; c) Perfil longitudinal de vazões mostrando a onda de cheia se deslocando com celeridade c e difusividade hidráulica D_h ; d) O modelo de atenuação prevendo a redução da vazão de pico ao longo da distância x de Q_0 para $Q(x)$ em função do fator de atenuação φ .

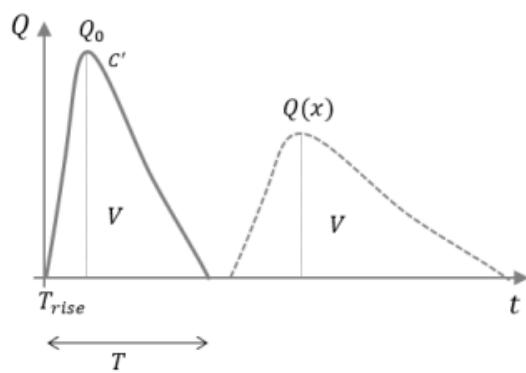
a) River-floodplain



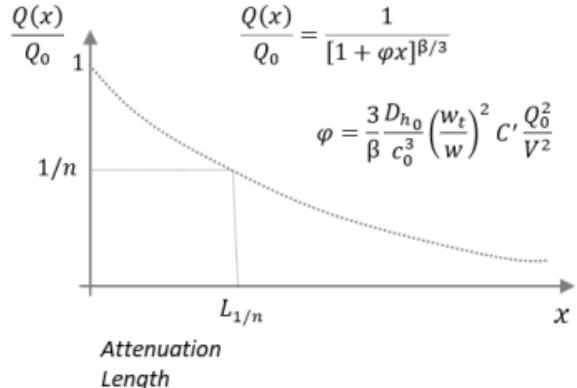
c) Flood wave longitudinal profile



b) Flood wave hydrograph



d) Peak discharge attenuation



Fonte: Paiva e Lima (2024).

onde,

Q_0 : vazão no trecho analisado (m^3/s);

$Q(x)$: vazão imediatamente a jusante do trecho analisado (m^3/s);

φ : fator de atenuação do pico da onda de cheia;

x : comprimento do trecho analisado (m);

β : expoente de vazão (em rios naturais, $\beta = 5/3$).

Dh_0 : difusividade hidráulica (m^2/s);

c_0 : celeridade iterativa da planície de inundação (m/s);

w_t : largura da planície de inundação (m);

w : largura do canal (m);

C' : curvatura do hidrograma (para o hidrograma sintético de NERC (1975), $C' \cong 5.78s^{-0.33}$);

s : simetria do hidrograma;

V : volume do hidrograma (m^3);

T : tempo total do hidrograma de cheia (h);

T_{rise} : Tempo de subida da onda (h);

$\frac{w_t}{w}$: Razão entre largura efetiva de inundação e largura do canal (adimensional);

S_0 : Declividade (m/m);

n : Coeficiente de Manning (adimensional);

h_0 : Altura inicial da onda (m);

U : Velocidade média do escoamento (m/s);

c_0^* : Celeridade ajustada da onda (m/s);

c_d : Velocidade de difusão (m/s);

v : Difusividade hidráulica (m^2/s);

Fr : Número de Froude (adimensional);

Dh_0 : Comprimento característico da onda (m);

Fator de atenuação da onda (adimensional);

Comprimento de atenuação 50% (km).

5.2.2. Coleta de dados de picos de inundação e características dos reservatórios

Os picos das ondas de cheia, a celeridade (velocidade de propagação da onda) e o volume dos reservatórios foram obtidos de uma base de dados secundários disponíveis, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), SNISB, ANA, entre outras. Em pequenas barragens, onde o volume nem sempre está disponível e/ou não há curvas cota-área volume, essas informações foram consideradas de forma simplificada como, por exemplo, a sugerida pelo Parecer Técnico-11-2021-SRE da ANA.

5.2.3. Estimativa do volume e tempo de subida

O volume da onda de inundação foi considerado igual ao volume total do reservatório no momento do rompimento. Enquanto o tempo de subida da onda foi assumido como o tempo de formação da brecha na barragem, conforme descrito por Wahl (1998).

5.2.4. Uso de imagens de satélite

Imagens de satélite de alta resolução foram utilizadas para traçar as linhas centrais dos cursos d'água a jusante das barragens, permitindo medir características geomorfológicas relevantes, tais como extensão, largura média, declividade e a presença de planícies de inundação nos locais afetados e dos reservatórios dos barramentos.

As imagens de satélite de alta resolução foram empregadas como fonte complementar de dados para suprir lacunas de informações referentes à altura de cota e à área dos reservatórios. A interpretação e mensuração das feições presentes nas imagens possibilitaram a estimativa das dimensões planimétricas e altimétricas, assegurando maior robustez na caracterização dos reservatórios. Esses parâmetros foram fundamentais para a elaboração das curvas Cota–Área–Volume, uma vez que permitiram estimar, de forma consistente, o volume acumulado em cada barragem e fornecer subsídios confiáveis para a simulação da onda de cheia em cenários de ruptura hipotética.

5.2.5. Curva Cota–Área–Volume simplificada

Considerando a área do espelho d'água no volume máximo, foi estimada a curva cota-área-volume para diferentes incrementos de altura, desde cota zero (volume e área zero) até cota máxima (altura da barragem) a partir dos dados de área e volume conhecidos. A **Tabela 1**, a seguir, dispõe dos dados de entrada para elaboração das curvas cota-área-volume simplificada para cada barragem.

Tabela 1 - Dados de entrada provenientes da Fest (2024) utilizados na construção das curvas cota-área-volume simplificadas das barragens analisadas.

Barragem	Cota (m)	Volume (hm ³)	Área (m ²)
SNISB 27748	17,0	0,145	23166
SNISB 27757	19,0	0,053	33220
SNISB 21640	4,0	0,077	26779

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Na construção da CAV das barragens de pequeno porte analisadas foi adotada uma simplificação, considerando uma relação linear entre cota, área e volume, partindo da cota zero (volume e área zero) até cota máxima (altura da barragem), de forma que a área alagada cresce de proporcionalmente à elevação da lâmina d'água. Essa abordagem permite estimar de forma simples os valores da curva, especialmente em pequenas barragens onde nem sempre estão disponíveis dados detalhados de armazenamento. Tal simplificação equivale a assumir um reservatório com margens regulares e inclinações constantes, em contraste com a morfologia real da topografia local, que normalmente resulta em curvas não lineares. A simplificação facilita a modelagem e análise preliminar do comportamento volumétrico de pequenos reservatórios sem dados, sem comprometer a consistência dos resultados para estudos de caráter exploratório ou de risco hidrológico.

5.2.6. Coeficiente de *Manning* e cálculos hidráulicos

O coeficiente de resistência ao fluxo de água (Coeficiente de *Manning*) foi assumido como constante, e avaliado para cada caso dependendo das características locais.

Outras variáveis relacionadas à propagação da onda de inundação e à atenuação do pico foram estimadas utilizando equações de engenharia hidráulica, como as equações de *Manning*, *Singh* e *Snorrason* (1984), e uma planilha para organizar os cálculos.

5.2.7. Cenário de ruptura de barragem analisado

No presente estudo, foi considerado um cenário de ruptura hipotética das barragens selecionadas no estado do Espírito Santo, assumindo a liberação total do volume armazenado em um intervalo de tempo reduzido. O hidrograma de cheia resultante foi caracterizado a partir de parâmetros hidrológicos e hidráulicos simplificados, de modo a representar a onda de inundação inicial e sua subsequente propagação ao longo do canal fluvial.

A formulação do modelo adotado contempla variáveis como a vazão de pico inicial, o volume total liberado, a duração e o tempo de ascensão da cheia, bem como características geométricas e hidráulicas do canal receptor, incluindo largura do leito principal, extensão relativa da planície de inundação, declividade média e rugosidade de *Manning*. A partir desses dados, é possível estimar grandezas derivadas, tais como a profundidade média de escoamento, a velocidade e a celeridade de propagação da onda.

O processo de propagação é avaliado considerando diferentes distâncias a jusante do ponto de ruptura. Em cada seção de controle, o modelo calcula a razão entre a vazão de pico atenuada e a vazão de pico inicial, permitindo verificar a redução progressiva da intensidade da onda de cheia. Observa-se que, à medida que a onda se desloca ao longo do canal, ocorre amortecimento gradual, condicionado principalmente pelo armazenamento lateral na planície de inundação e pela dissipação de energia devido à rugosidade do leito.

Assim, ainda que se trate de uma formulação simplificada, os resultados obtidos possibilitam identificar tendências de atenuação do pico de inundação em função das condições geométricas e hidráulicas locais. Este tipo de abordagem, embora não substitua modelagens hidrodinâmicas mais avançadas, constitui ferramenta preliminar relevante para a compreensão dos efeitos hidrológicos associados ao rompimento de barragens e para a análise comparativa de cenários em diferentes contextos fluviais.

5.2.8. Simulação com modelo simplificado

As simulações do rompimento das barragens foram conduzidas com base em um modelo simplificado de propagação da onda de cheia, desenvolvido em uma planilha Excel a partir de parâmetros hidrológicos e hidráulicos extraídos da literatura. Foram considerados diferentes valores para variáveis-chave, como tempo de formação da brecha, coeficiente de *Manning*, largura média do canal e declividade do leito, de modo a avaliar a sensibilidade dos resultados a pequenas alterações nos parâmetros de entrada. Essa ferramenta permitiu observar como variações em condições hidráulicas e geométricas influenciam a magnitude da vazão de pico, a velocidade de propagação da onda (celeridade) e a extensão potencial da área inundada a jusante.

5.2.9. Sensibilidade dos parâmetros

Uma análise de sensibilidade foi conduzida por meio da variação sistemática dos parâmetros T , s , S_0 e Wt/W , considerando o modelo simplificado de atenuação de Paiva e Lima (2024) aplicado ao estudo de rompimento hipotético de pequenas barragens. Os cenários de simulação foram organizados a partir da planilha de cálculo do modelo de Paiva e Lima (2024), na qual cada parâmetro foi alterado individualmente, mantendo-se os demais constantes, o que possibilitou avaliar de forma isolada a sensibilidade dos resultados. Como indicadores de resposta, foram considerados: a celeridade da onda de inundação (m/s) e a razão $Q(x)/Q_0$, que expressa a relação entre a vazão ao longo do percurso da onda, $Q(x)$, e a vazão de pico inicial, Q_0 .

5.3. Dados utilizados

A aplicação do modelo simplificado para avaliação da atenuação do pico de inundação exigiu a definição de um conjunto de parâmetros hidrológicos, hidráulicos e geométricos, utilizados como dados de entrada para a simulação. Esses parâmetros foram organizados em planilha eletrônica, de modo a sistematizar os cálculos e permitir a análise comparativa entre diferentes distâncias a jusante do ponto de ruptura.

Os parâmetros hidrológicos incluíram a vazão de pico inicial do hidrograma e o volume total associado à onda de cheia, que representam a condição de escoamento no instante imediatamente posterior ao rompimento da barragem. Também foram

definidos o tempo total de duração do hidrograma e o tempo de ascensão até o pico, elementos que caracterizam a forma da onda de cheia e influenciam diretamente a magnitude da descarga máxima.

Do ponto de vista geométrico e hidráulico, consideraram-se a largura do canal principal, a razão entre a planície de inundação e a largura do canal, a declividade média do leito e o coeficiente de rugosidade de *Manning*. Esses parâmetros determinam a capacidade de escoamento do sistema fluvial e a resistência ao movimento da onda, condicionando a taxa de atenuação do pico de vazão ao longo do percurso.

Adicionalmente, foram incorporados parâmetros relacionados à forma do hidrograma, como o coeficiente de assimetria e o fator de curvatura relativa no pico, que ajustam a representação da onda e permitem maior realismo na simulação. A partir desses valores iniciais, o modelo estimou grandezas derivadas como a profundidade média de escoamento, a velocidade média no canal e a celeridade da onda de cheia, utilizadas para caracterizar o processo de propagação.

Esse conjunto de dados constitui a base para a simulação hidrológica, permitindo a avaliação do amortecimento do pico de inundação ao longo do canal receptor e a análise da influência das condições locais na dissipação da energia da onda.

Os dados de entrada do modelo foram definidos a partir de parâmetros hidrológicos e hidráulicos essenciais. O tempo total do hidrograma de cheia pode ser calculado pela relação:

$$T \cong \frac{2V}{Q_p} \quad \text{Equação 17}$$

Em que, V é o volume da cheia e Q_p a vazão de pico, assumindo-se um hidrograma triangular. A forma desse hidrograma é controlada pelo coeficiente de assimetria, que representa a diferença entre os tempos de subida e descida; valores de $s=1$ indicam simetria perfeita, enquanto $0 < s < 10$ traduzem uma subida mais rápida e descida mais lenta, típica de cheias naturais. Neste estudo foi adotado $s=0,5$ em consonância com o cenário de referência discutido na literatura por Paiva e Lima (2024). Outro parâmetro importante é a razão entre a largura total da planície de inundação (W_t) e a largura do canal principal (w), que mede a contribuição da planície lateral para o

armazenamento e a atenuação da onda. Conforme o estudo-base, valores típicos variam entre

- $W_t/W = 1$ rio encaixado,
- $W_t/W = 3$ condição média e
- $W_t/W = 10$ planície ampla.

Para aplicação prática, adotou-se $W_t/W = 4$ para as barragens que estão situadas em trechos de planície mais aberta. Foram fixados também a declividade do canal $S_0 = 0,002$ para a barragem SNISB 27748 e as demais barragens, SNISB 27757 e SNISB 21640, a declividade foi de $S_0 = 0,0028$ e o coeficiente de Manning $n=0,035$, valores típicos de rios naturais. As informações de vazão de pico e largura do canal foram obtidas junto à Fest (2024).

Tabela 2 - Dados de entrada no modelo.

Barragem	Volume (hm ³) ¹	Vazão (m ³ /s) ¹	Tempo (h)	Largura (m)	W_t/W	Declividade	Coeficiente de rugosidade de Manning (n)	Parâmetro de assimetria do hidrograma (s)
SNISB 27748	0,145	6,92	0,2	70	4	0,002	0,035	0,5
SNISB 27757	0,053	1,36	0,2	40	4	0,0028	0,035	0,5
SNISB 21640	0,077	14,91	0,2	73	4	0,0028	0,035	0,5

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

¹ Dados extraídos de Fest (2024).

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Antes da apresentação dos resultados, é importante enfatizar que os cenários analisados devem ser interpretados como aproximações da realidade, elaborados a partir de um modelo simplificado. Tais simplificações resultam incertezas que podem comprometer a precisão absoluta dos resultados, sendo recomendável complementá-las com análises mais detalhadas em situações de maior criticidade ou quando se exige maior confiabilidade nos cenários simulados. O objetivo principal é fornecer suporte preliminar à avaliação de risco e ao planejamento de medidas preventivas, reconhecendo as limitações metodológicas inerentes que podem afetar os valores absolutos reportados.

As aplicações do modelo simplificado para análise dos rompimentos de barragens permitiram avaliar os comportamentos das ondas de cheia para diferentes cenários. Os parâmetros característicos relativos às três barragens consideradas foram utilizados para as simulações: SNISB 27748, SNISB 27757 e SNISB 21640. Os resultados destas aplicações são apresentados na **Tabela 3**, a seguir:

Tabela 3 - Resultados obtidos por meio da modelo simplificado de Paiva e Lima (2024).

Barragem	Celeridade da onda de inundação (m/s)	Profundidade hidráulica (m)	Fator de atenuação da onda (%)	Distância de atenuação de 50% (m)
SNISB 27748	4,86	3,45	0,33	744,92
SNISB 27757	3,60	1,71	0,40	621,58
SNISB 21640	4,18	2,13	0,35	712,10

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A análise dos parâmetros obtidos pela modelagem evidencia diferenças significativas no comportamento das ondas de inundação correspondentes às barragens consideradas, que se refletem diretamente nas magnitudes dos impactos potenciais para os diferentes cenários de rompimento.

A celeridade da onda de inundação indica a velocidade com que a frente da onda se propaga ao longo do curso d'água após o rompimento. Observa-se que a barragem

SNISB 27748 apresentou o maior valor (4,86 m/s), seguida pela SNISB 21640 (4,18 m/s) e, por último, a SNISB 27757 (3,60 m/s). Isso sugere que o rompimento da barragem 27748 resultaria em uma onda com capacidade de deslocamento mais rápido, o que implica no risco de impacto imediato em áreas a jusante maior do que as que possui valor de celeridade menor.

A profundidade hidráulica na barragem apresentou diferenças significativas entre as barragens analisadas. A SNISB 27748 registrou a maior profundidade, com 3,45 m, indicando maior volume de água e, consequentemente, maior potencial de impacto em caso de rompimento. A SNISB 21640 apresentou valor intermediário (2,13 m), enquanto a SNISB 27757 apresentou a menor profundidade (1,71 m), sugerindo menor intensidade da onda de cheia e menor risco imediato para áreas a jusante.

O fator de atenuação da onda representa a taxa de redução relativa da altura da onda ao longo do percurso. O maior valor foi observado na barragem SNISB 27757 (0,40), evidenciando maior dissipação de energia hidráulica em menor distância. Já a SNISB 27748 apresentou o menor fator de atenuação (0,33), o que indica que sua onda de cheia se mantém mais persistente ao longo do curso do rio.

Por fim, a distância de atenuação de 50% expressa o espaço necessário para que a altura da onda seja reduzida à metade do valor inicial. Os resultados mostram que a barragem SNISB 27757 requer a menor distância (621,58 m), enquanto a SNISB 27748 demanda o maior percurso (744,92 m), confirmando o comportamento mais resistente à dissipação observado anteriormente.

As **Figuras 14 a 16** expõem as relações entre as vazões normalizadas $Q(x)/Q_0$ e as distâncias x , em km, ao longo dos trechos analisados para todas as barragens incluídas no estudo por meio de gráficos elaborados com o modelo simplificado de atenuação proposto por Paiva e Lima (2024). Observa-se comportamentos decrescentes das vazões relativas $Q(x)$ à medida que as distâncias das barragens aumentam. Tal tendência sugere processos de atenuação, dissipação ou decaimento de determinadas grandezas físicas ao longo do espaço. Estes resultados foram obtidos a partir da modelagem hidrológica realizada, considerando os dados de volume armazenado em cada barragem e os parâmetros hidráulicos simplificados

adotados no estudo. A análise permite avaliar as propagações das ondas de cheia e identificação dos trechos mais críticos em termos de potenciais de inundações.

A análise dos gráficos de propagação da onda de inundação evidencia o processo de atenuação do pico de vazão ao longo da distância a jusante das barragens estudadas.

Em todos os casos, observa-se uma tendência decrescente da razão $Q(x)/Q_0$, indicando que a energia da onda é progressivamente dissipada durante sua propagação. Esse comportamento é característico de reservatórios e canais onde a geometria, a rugosidade e a interação com a planície de inundação exercem papel relevante na redução da magnitude da onda.

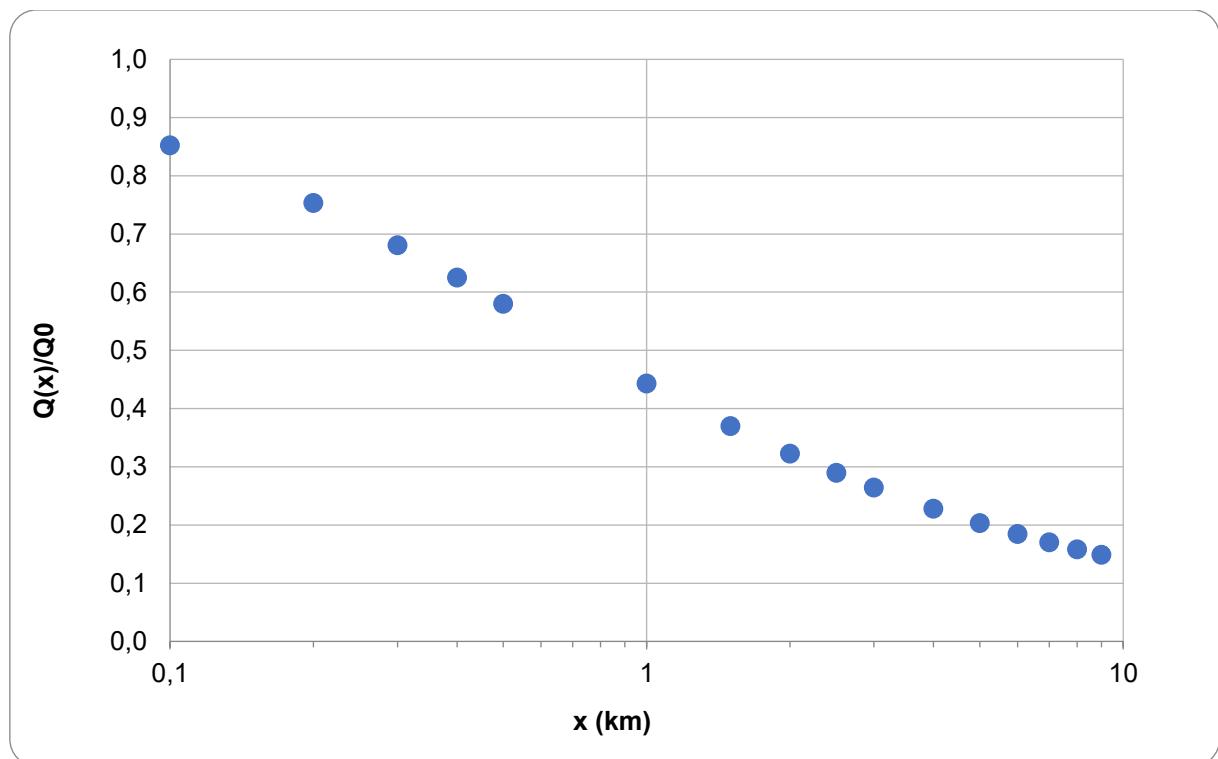
Na barragem SNISB 27748, a atenuação inicial apresenta maior intensidade nos primeiros quilômetros, passando de aproximadamente 0,85 para valores próximos de 0,45 em torno de 1 km de propagação. A partir desse ponto, a taxa de decréscimo se mantém mais gradual, atingindo cerca de 0,15 ao final do trecho analisado (10 km).

De forma semelhante, na barragem SNISB 27757, a curva demonstra padrão de atenuação consistente, partindo de 0,84 e chegando a aproximadamente 0,13 após 10 km. Nota-se, entretanto, uma dissipação ligeiramente mais uniforme ao longo do percurso, com declínio menos acentuado nos trechos iniciais em comparação à barragem SNISB 27748.

Por fim, a barragem SNISB 21640 apresenta comportamento intermediário entre os dois casos anteriores. O decréscimo da relação $Q(x)/Q_0$ ocorre de forma progressiva, partindo de valores próximos de 0,87 e atingindo em torno de 0,14 ao longo dos 10 km. Esse resultado sugere que, embora o processo de atenuação seja similar entre os três reservatórios, pequenas variações geométricas e hidráulicas influenciam na taxa de dissipação observada.

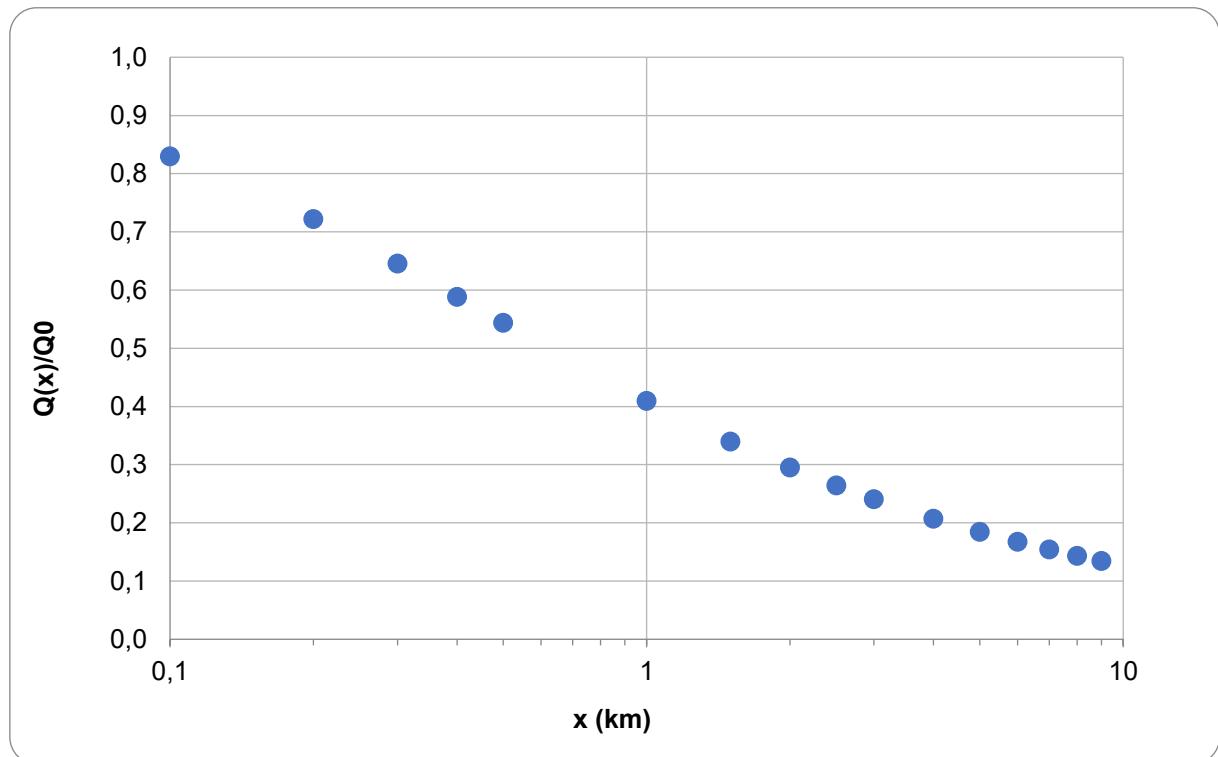
De modo geral, os resultados apresentam uma representação da perda de intensidade da onda de cheia ao longo da propagação, reforçando a importância de parâmetros locais precisos, como profundidade hidráulica e configuração da calha, na definição do comportamento hidrodinâmico do escoamento.

Figura 14 - Comportamento da onda de inundação ao longo da propagação da barragem SNISB 27748.



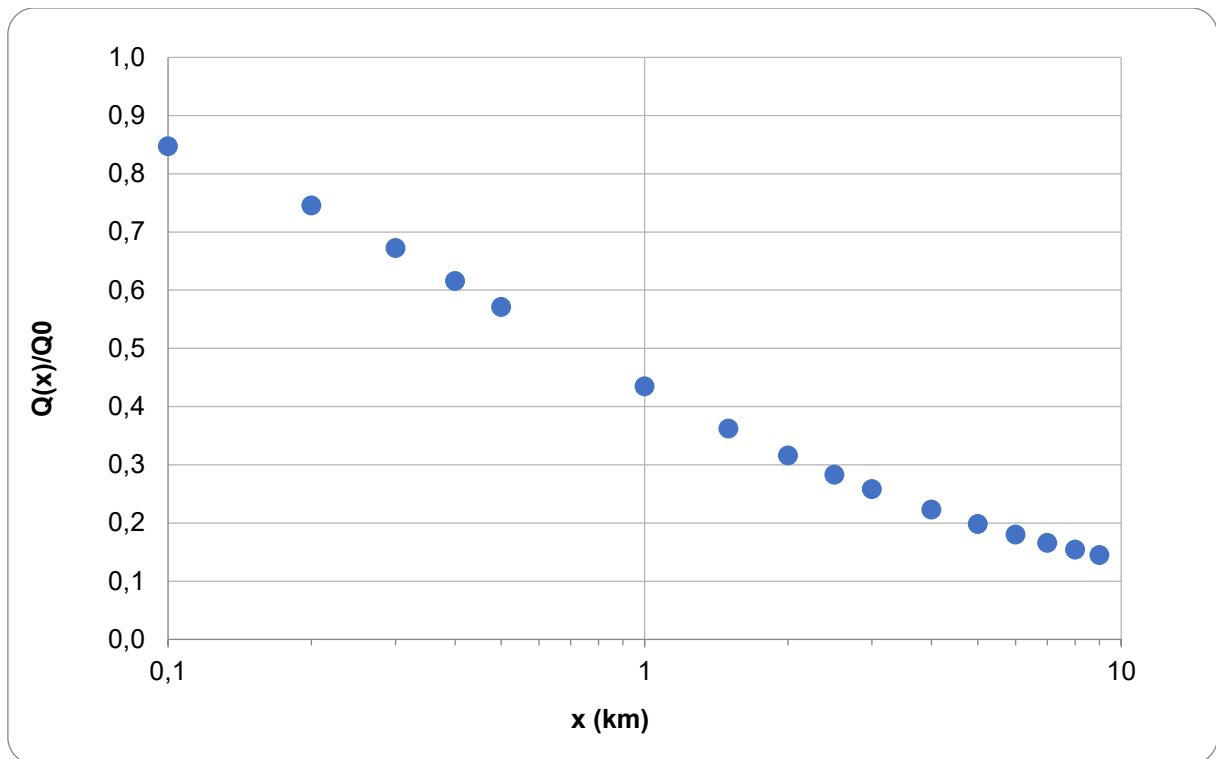
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 15 - Comportamento da onda de inundação ao longo da propagação da barragem SNISB 27757.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 16 - Comportamento da onda de inundação ao longo da propagação da barragem SNISB 21640.



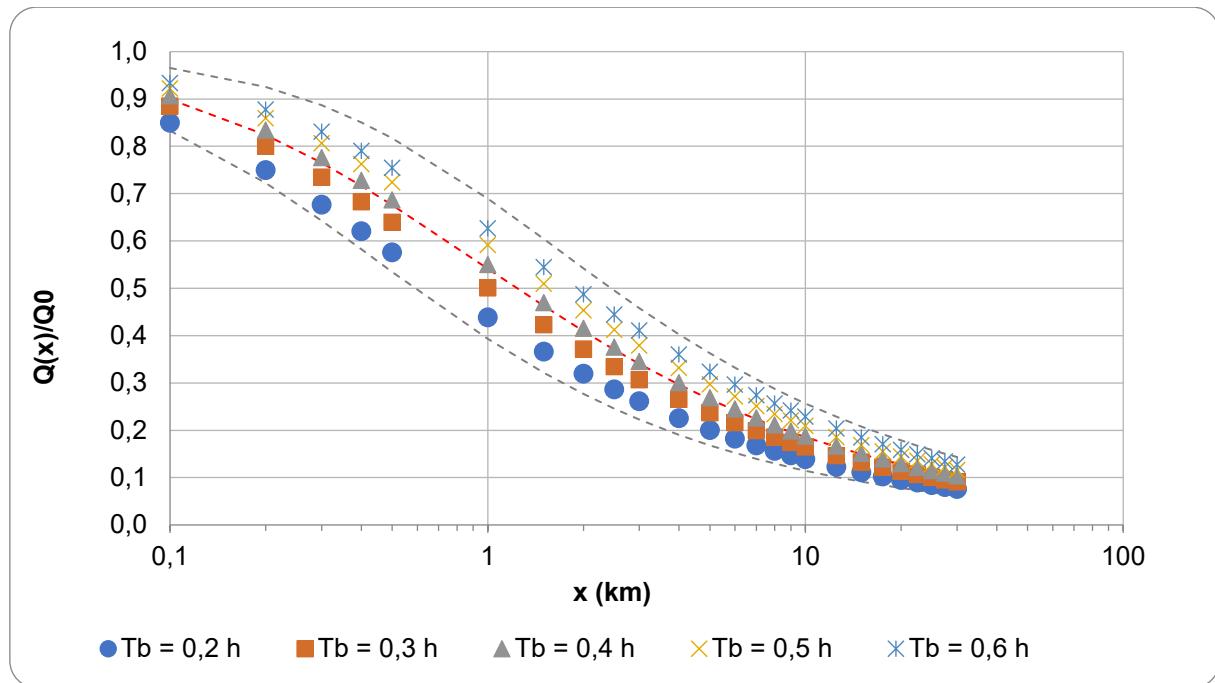
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

6.1. Avaliação do impacto da variação de parâmetros do modelo nos resultados obtidos

As Figuras dispostas a seguir apresentam os resultados da análise de sensibilidade, considerando a variação dos parâmetros T , s , S_0 e $\frac{w_t}{w}$, respectivamente. Sendo que, as Figuras 17 a 20 para a barragem SNISB 27748, as Figuras 21 a 24 correspondem aos resultados obtidos para a barragem SNISB 27757, enquanto as Figuras 25 a 28 ilustram os resultados referentes à barragem SNISB 21640. Os gráficos permitem comparar, de maneira sistemática, o efeito de cada variável sobre a vazão de pico nas diferentes estruturas analisadas.

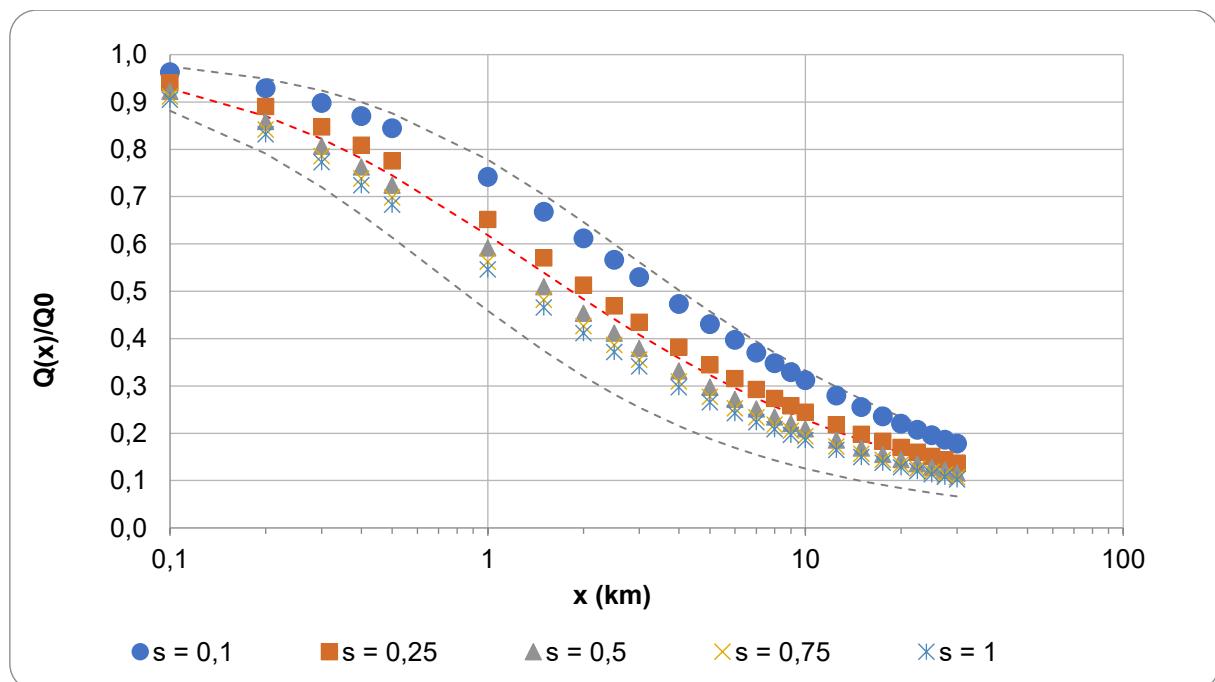
6.1.1. Barragem SNISB 27748

Figura 17 - Influência do tempo total do hidrograma (T) sobre a vazão de pico.



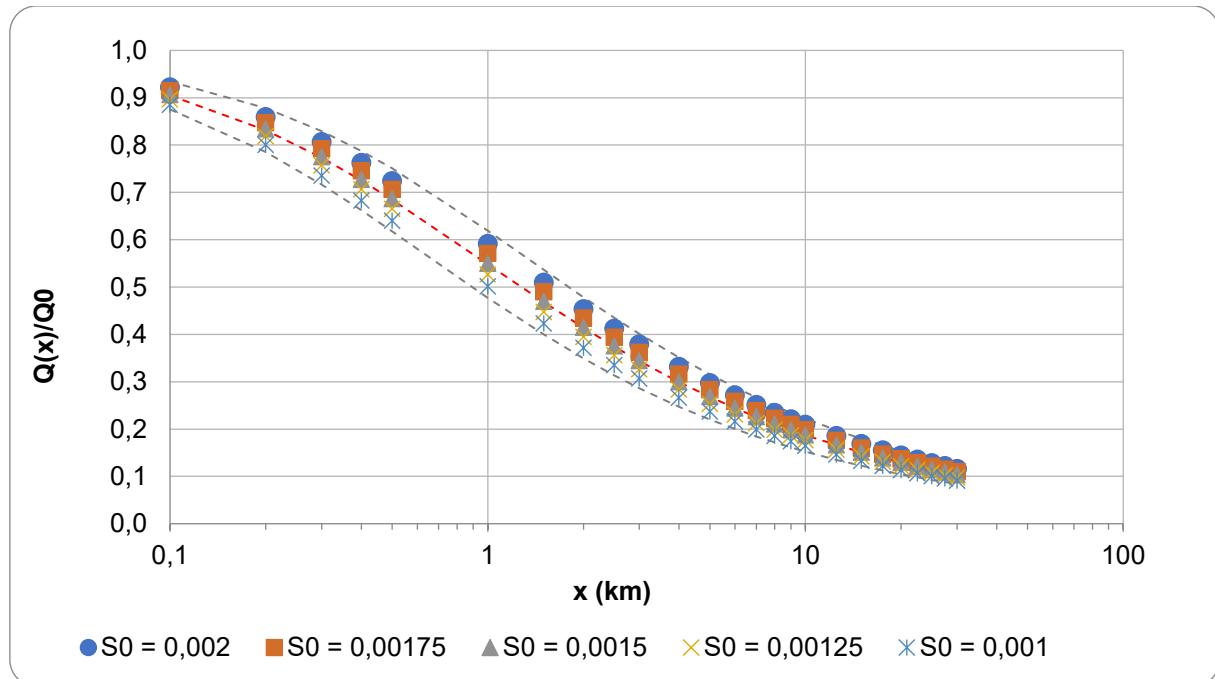
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 18 - Efeito da simetria do hidrograma (s) na vazão de pico nas barragens analisadas.



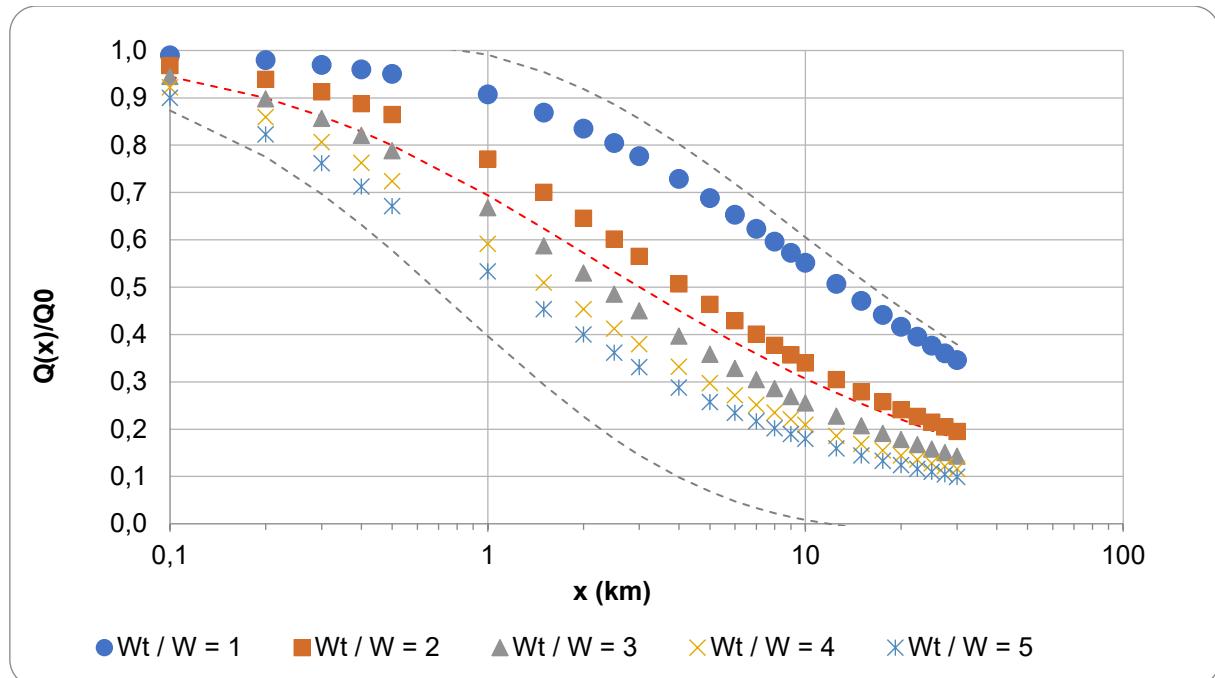
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 19 - Variação da vazão de pico em função da declividade média do canal (S_0) nas barragens analisadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

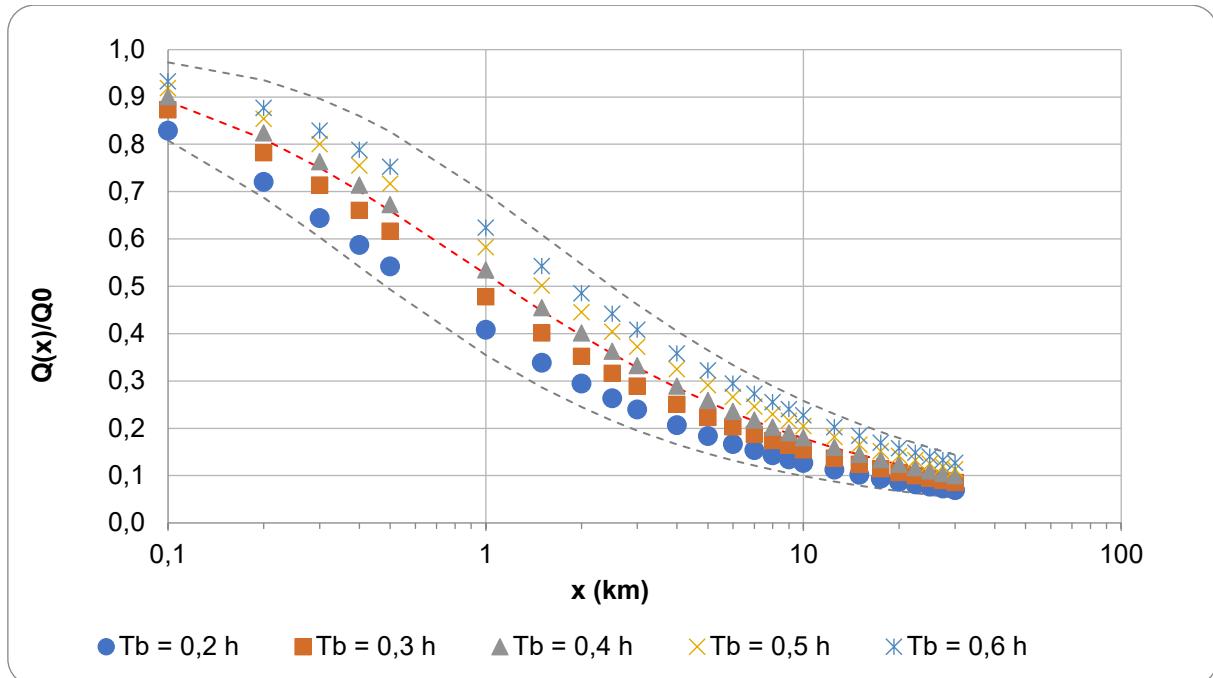
Figura 20 - Influência da razão largura efetiva de inundação/largura do canal ($\frac{W_t}{W}$) sobre a vazão de pico nas barragens analisadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

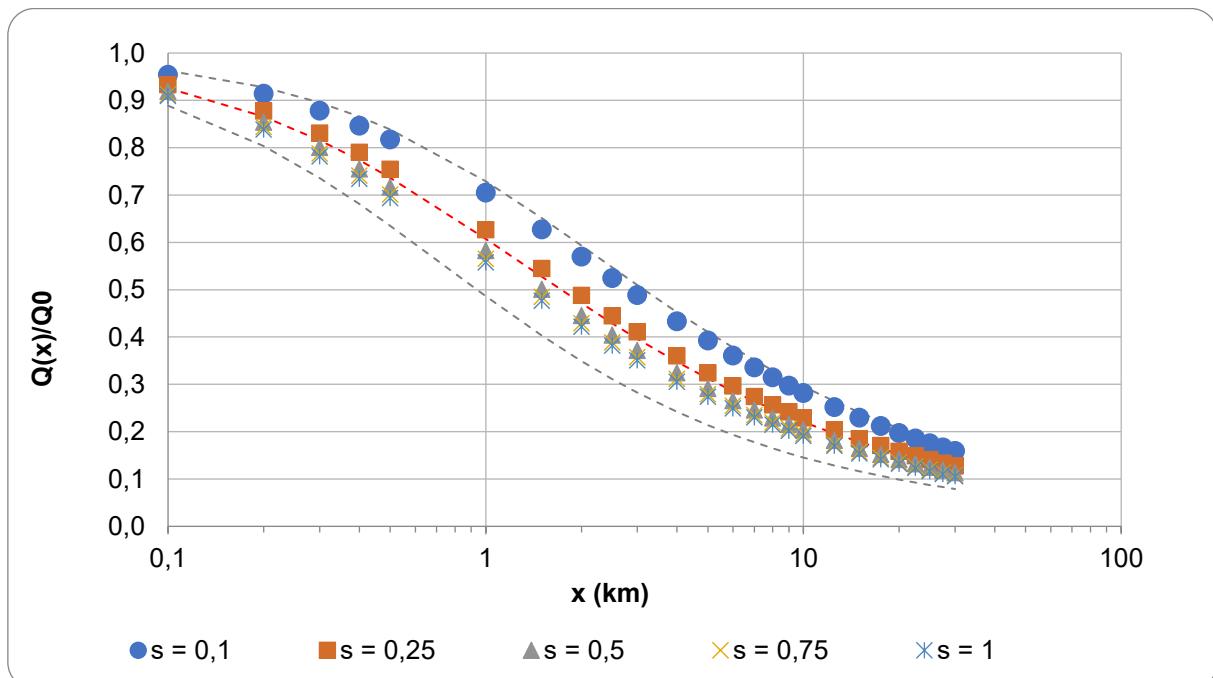
6.1.2. Barragem SNISB 27757

Figura 21 - Influência do tempo total do hidrograma (T) sobre a vazão de pico.



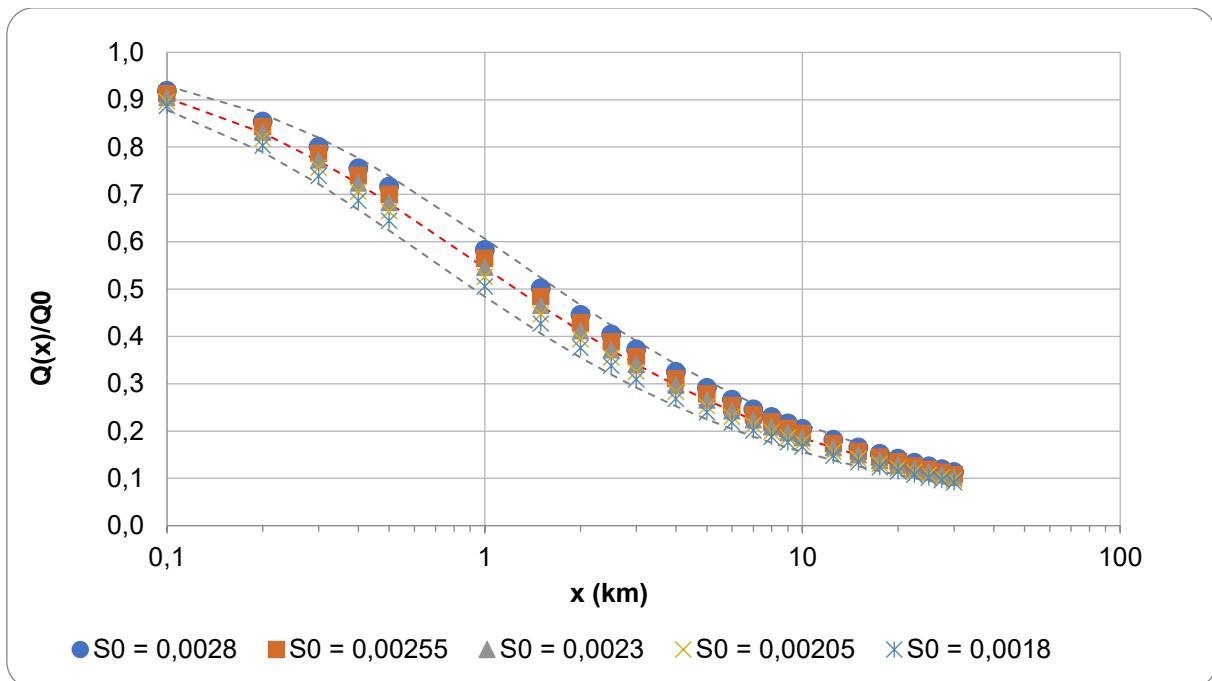
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 22 - Efeito da simetria do hidrograma (s) na vazão de pico nas barragens analisadas.



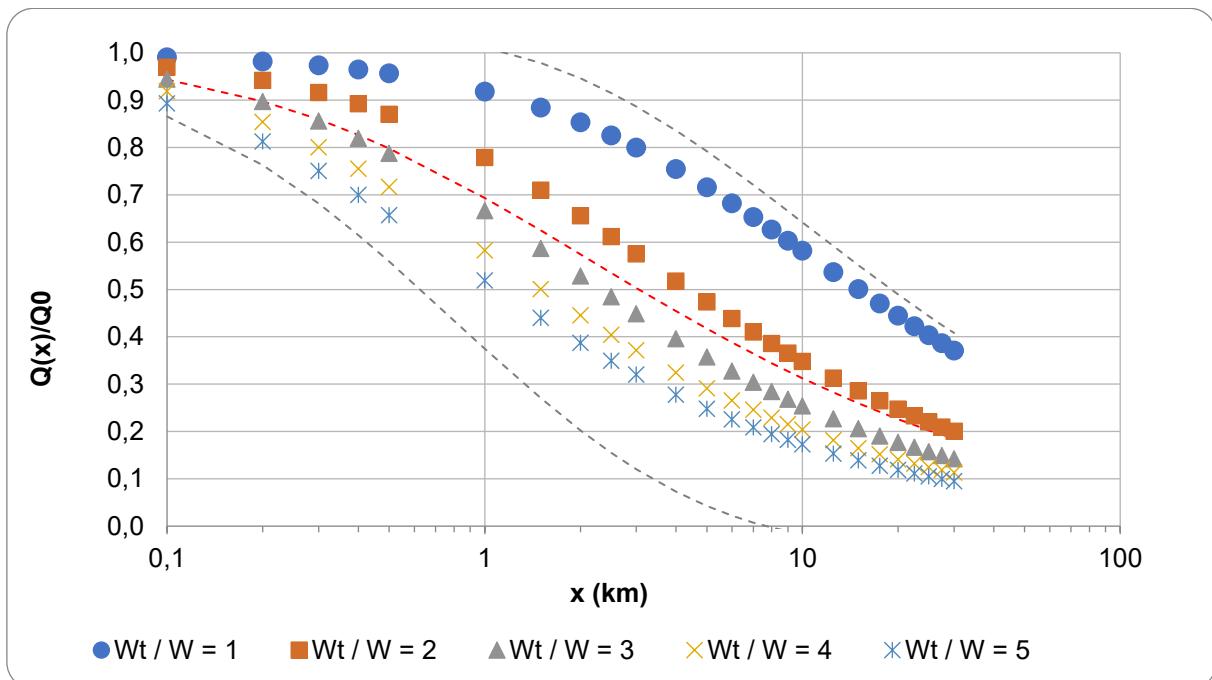
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 23 - Variação da vazão de pico em função da declividade média do canal (S_0) nas barragens analisadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

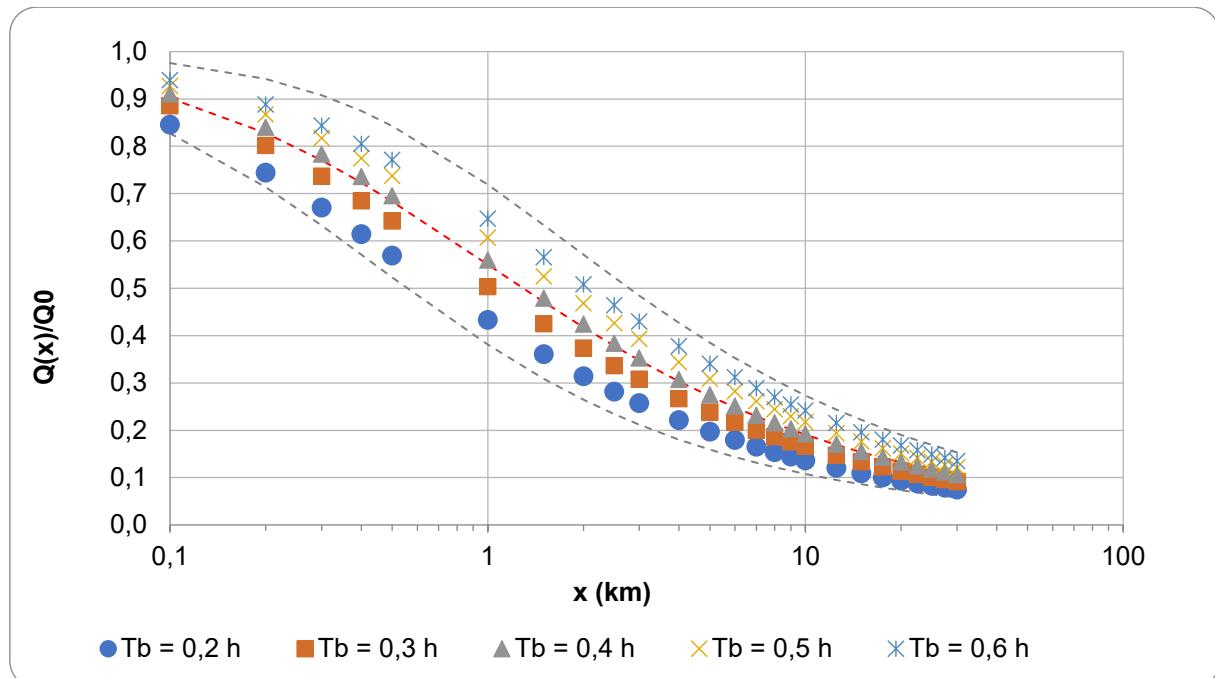
Figura 24 - Influência da razão largura efetiva de inundação/largura do canal ($\frac{w_t}{w}$) sobre a vazão de pico nas barragens analisadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

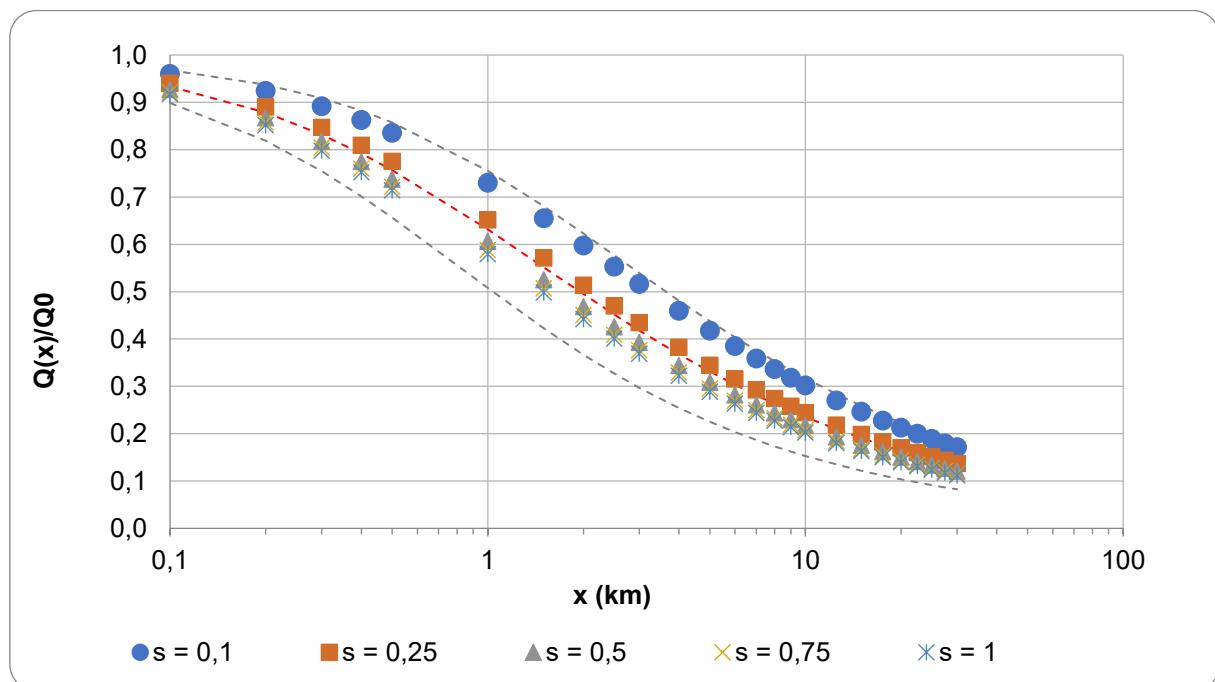
6.1.3. Barragem SNISB 21640

Figura 25 - Influência do tempo total do hidrograma (T) sobre a vazão de pico.



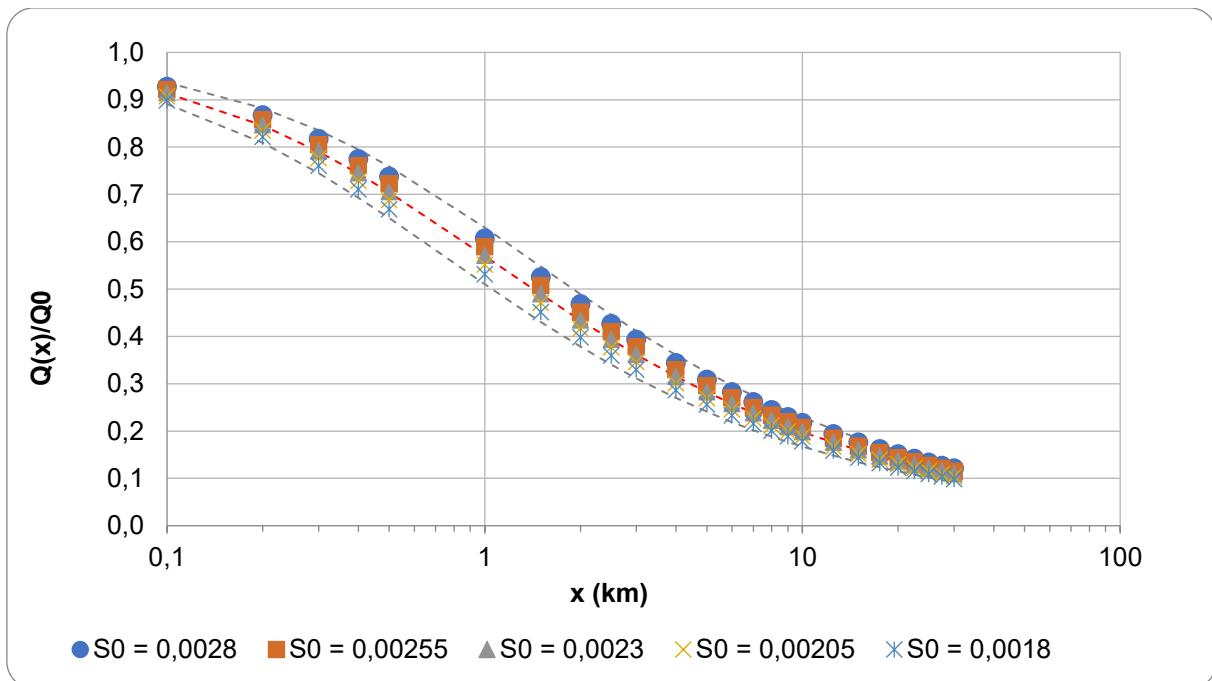
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 26 - Efeito da simetria do hidrograma (s) na vazão de pico nas barragens analisadas.



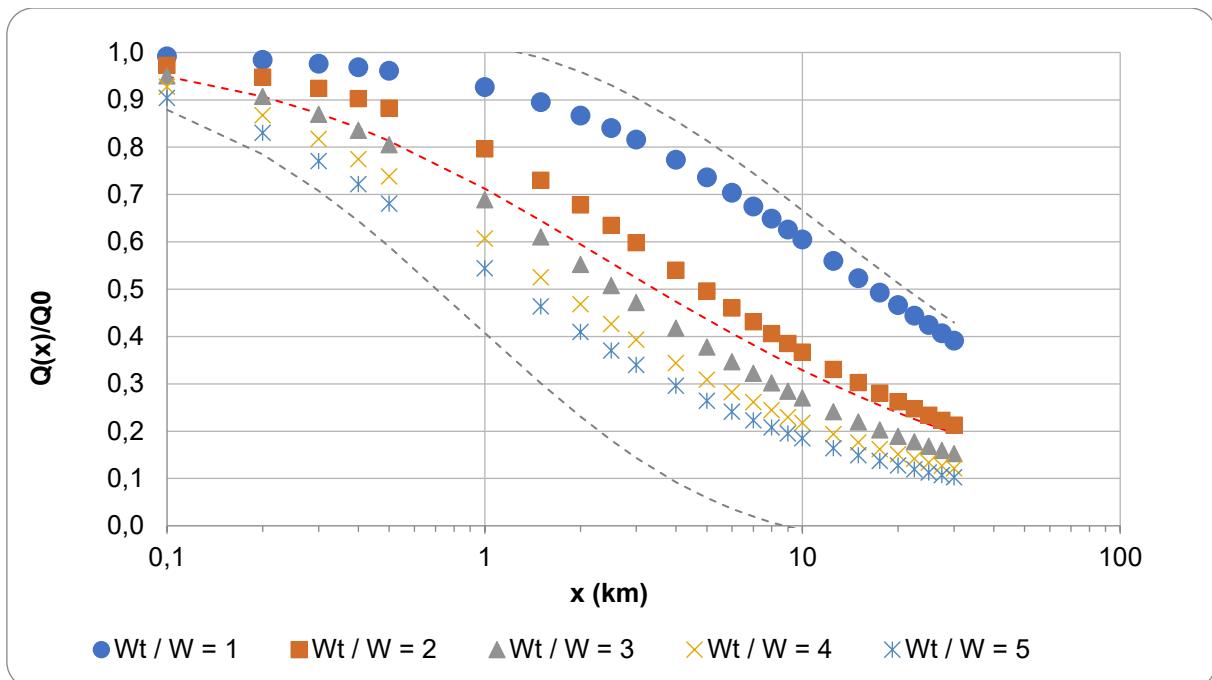
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 27 - Variação da vazão de pico em função da declividade média do canal (S_0) nas barragens analisadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 28 - Influência da razão largura efetiva de inundação/largura do canal ($\frac{W_t}{w}$) sobre a vazão de pico nas barragens analisadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

6.1.4. Discussão

O parâmetro que apresentou maior sensibilidade foi o tempo total do hidrograma (T). Para todas as barragens, o aumento de T de 0,2 h para 0,6 h resultou em uma redução significativa de aproximadamente 67% na vazão de pico. Na barragem SNISB 27748, Q_0 foi reduzido de 402,78 m³/s para 134,26 m³/s; na SNISB 27757, de 147,22 m³/s para 49,07 m³/s; e na SNISB 21640, de 213,89 m³/s para 71,30 m³/s. Esse comportamento demonstra que maiores tempos de base favorecem maior dispersão do escoamento, reduzindo a concentração dos volumes e atenuando a intensidade da onda de cheia.

Por outro lado, o parâmetro de simetria do hidrograma (s) não apresentou qualquer influência sobre a vazão de pico. Em todas as barragens, os valores de Q_0 permaneceram inalterados diante da variação deste coeficiente, evidenciando ausência de sensibilidade do modelo a essa variável no intervalo considerado.

O mesmo ocorreu para a declividade média do canal (S_0). Apesar de seu papel reconhecido na propagação de cheias em modelos hidrodinâmicos mais detalhados, neste modelo simplificado não houve alteração dos resultados quando S_0 foi variado, com os valores de Q_0 permanecendo constantes em cada barragem.

De maneira análoga, a razão entre a largura efetiva de inundação e a largura do canal ($\frac{w_t}{w}$) também não provocou mudanças nos valores de vazão de pico, reforçando a baixa sensibilidade do modelo a essa variável.

Assim, a análise de sensibilidade demonstra que apenas o tempo total do hidrograma (T) exerce influência significativa nos resultados do modelo, enquanto os parâmetros s , S_0 e $\frac{w_t}{w}$ permaneceram invariáveis. Este resultado reforça a predominância do tempo de base como fator de controle sobre a atenuação da onda de cheia, embora não se deva desconsiderar que, na realidade física, as demais variáveis desempenham papel importante na dinâmica do escoamento, o que poderia ser mais bem captado em modelos hidrológicos ou hidrodinâmicos mais robustos.

6.2. Análise dos indicadores hidrodinâmicos e limitações do modelo

A interpretação integrada dos indicadores é essencial para o planejamento de ações de emergência, definição de zonas de risco e elaboração de mapas de inundação. Além disso, os resultados destacam a importância de adaptação dos modelos às características locais, considerando que barragens de diferentes portes e geometrias apresentam comportamentos hidrológicos bastante distintos.

É importante salientar as limitações inerentes à aplicação do modelo simplificado, uma vez que sua formulação não contempla de forma explícita processos físicos relevantes para a dinâmica de ruptura de barragens. Entre essas restrições, destacam-se a ausência da simulação de processos erosivos e instabilidades progressivas no corpo da estrutura, a representação média da rugosidade e da morfologia do canal, bem como a não consideração da variabilidade sazonal das condições hidrológicas de base, como a vazão afluente e o nível inicial do reservatório. Tais simplificações implicam incertezas que podem influenciar a precisão absoluta dos resultados, de modo que os valores obtidos devem ser interpretados como tendências aproximadas do comportamento hidrodinâmico.

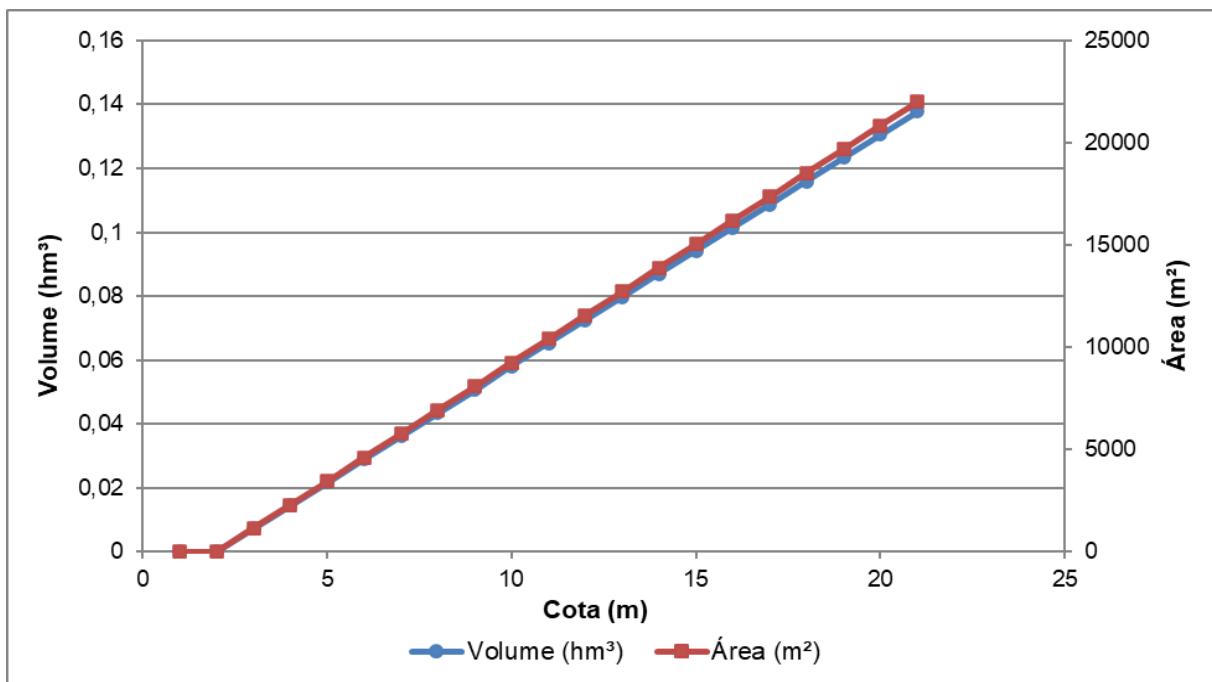
Assim, o modelo mostra-se adequado como ferramenta preliminar de avaliação de risco, especialmente em contextos de barragens de pequeno e médio porte, mas deve ser complementado por análises mais detalhadas em situações de maior criticidade ou quando se exige maior grau de confiabilidade nos cenários simulados.

Com base em análises realizadas, o modelo foi validado pelos autores Paiva e Lima (2024), evidenciando sua aplicabilidade no contexto de estudos de barragens. Especificamente, o modelo mostra-se adequado para estruturas de pequeno porte, o que assume particular relevância quando se considera a realidade brasileira, caracterizada por significativa variabilidade em termos de dimensões, finalidades e condições construtivas das barragens. Ressalta-se, ainda, que a simplicidade de formulação e a facilidade de aplicação do modelo possibilitam a condução de análises preliminares de segurança sem a necessidade de recursos computacionais avançados, ampliando, assim, sua acessibilidade e potencial de utilização prática.

6.3. Curva Cota–Área–Volume simplificada

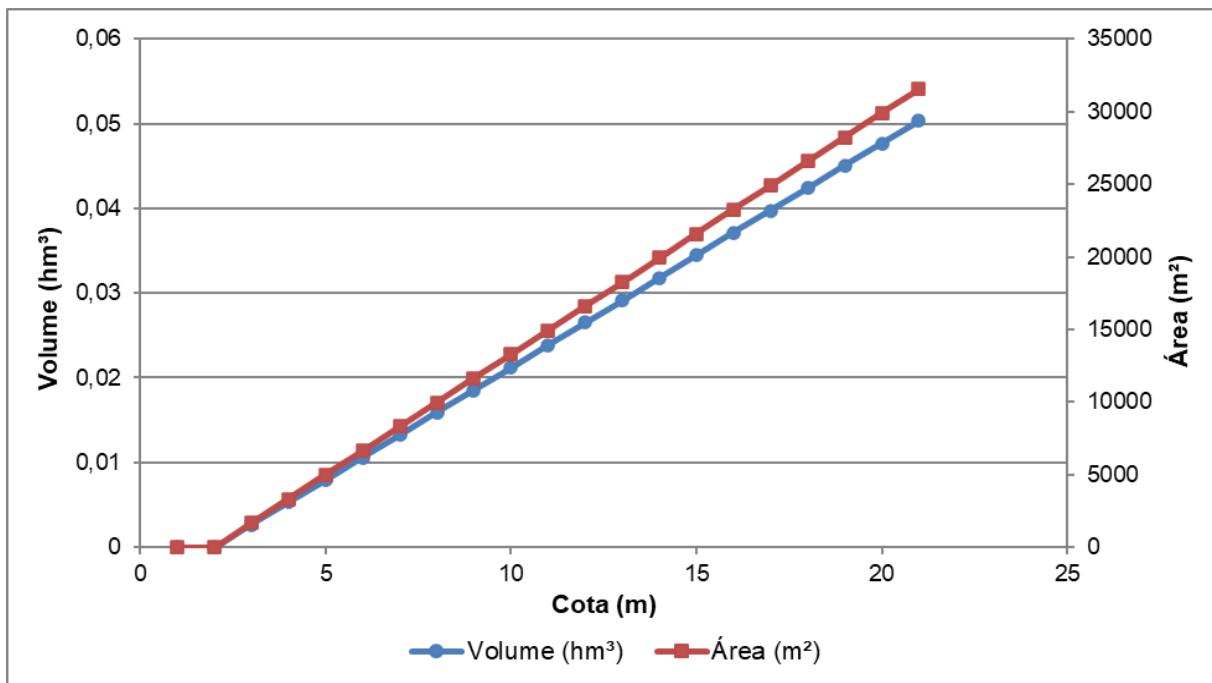
As CAVs simplificadas obtidas para as barragens analisadas permitiram estabelecer a relação entre o volume armazenado e a área inundada em diferentes cotas. Esses resultados são fundamentais para a caracterização da geometria dos reservatórios, fornecendo subsídios para a estimativa do volume de água liberado em situações de rompimento e, consequentemente, para a avaliação da propagação das ondas de cheia nos cenários simulados. As **Figuras 17 a 19** apresentam as CAVs elaboradas para cada barragem analisada.

Figura 29 - Curva Cota × Área × Volume da Barragem SNISB 27748.



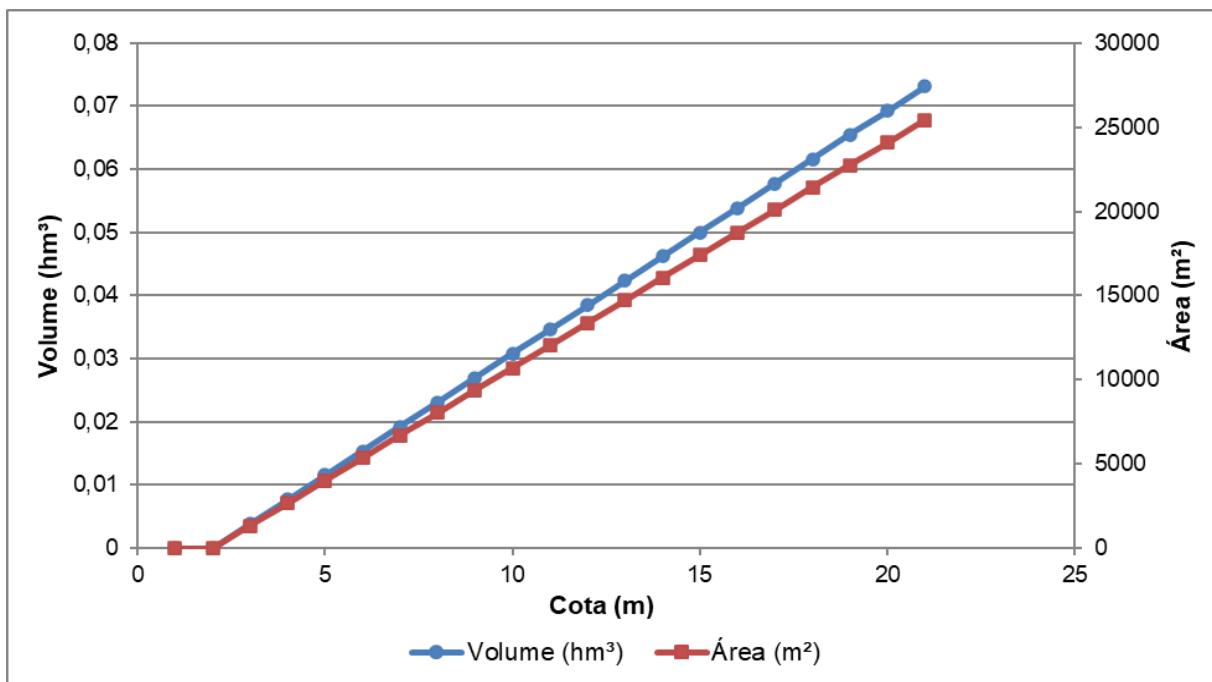
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 30 - Curva Cota × Área × Volume da Barragem SNISB 27757.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 31 Curva Cota × Área × Volume da Barragem SNISB 21640.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

6.4. Comparação com classificações oficiais e técnicas

O **Quadro 3** expõe uma comparação entre a classificação estabelecida pelo SNISB (Brasil, 2024) e pela FEST (2024), evidenciando as diferenças na forma como cada um trata a questão do impacto potencial das barragens. Além disso, o quadro destaca-se as conclusões obtidas a partir do modelo desenvolvido neste estudo se mostram coerentes com os critérios propostos por essas instituições.

Quadro 3 - Comparativo da classificação de risco e impacto potencial das barragens analisadas.

Barragem	Categoria de Risco ¹	Dano Potencial Associado ¹	Classificação potencial Impacto ²
SNISB 27748	Médio	Médio	Médio
SNISB 27757	Médio	Médio	Alto
SNISB 21640	Médio	Baixo	Crítico

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

¹ Dados classificados com base na PNSB e extraídos de Fest (2024).

² Dados classificados e extraídos de Fest (2024).

A realização da análise comparativa do grau de impacto potencial das barragens, a partir dos resultados obtidos através da aplicação do modelo simplificado de atenuação, constitui um passo fundamental para confrontar e complementar as classificações já realizadas por órgãos oficiais, como o SNISB (Brasil, 2024), e por estudos técnicos, como o da FEST (2024). Enquanto as classificações do SNISB consideram, predominantemente, critérios estruturais, de categoria de risco e dano potencial associado, a abordagem aqui adotada buscou enfatizar os processos hidrológicos e hidráulicos dinâmicos decorrentes de um possível rompimento, como a celeridade da onda, a extensão lateral da mancha de inundação e a distância de atenuação da vazão de pico.

Esse enfoque permite identificar nuances importantes que não são plenamente captadas pelas metodologias de classificação tradicionais. Por exemplo, barragens enquadradas como de risco médio ou baixo no SNISB podem, em termos hidrodinâmicos, revelar potenciais de impacto muito mais críticos devido à persistência da onda de cheia e ao alcance em áreas distantes. Da mesma forma, resultados que apontam para impactos localizados severos em barragens de pequeno porte, como a SNISB 21640, podem não estar adequadamente refletidos nas classificações oficiais, que tendem a diluir o risco em categorias mais genéricas.

A comparação com o estudo da FEST (2024) também se mostra relevante, uma vez que este amplia a análise para além das características construtivas e passa a integrar cenários de inundação e vulnerabilidade territorial. O estudo analisou o impacto potencial de um rompimento hipotético sobre a rodovia BR-101. A avaliação contemplou variáveis como a posição espacial em relação à rede hidrográfica e à rodovia, o volume armazenado, a área de drenagem do barramento, a vazão máxima estimada para um tempo de retorno de 100 anos e a existência de outras barragens a jusante.

Vale ressaltar que as classificações existentes são baseadas em critérios diferentes de classificação, o CRI está relacionado às características técnicas do empreendimento, abrangendo aspectos como o método construtivo, o estado de conservação, a idade da estrutura e o atendimento ao Plano de Segurança da Barragem (PSB). Já o Dano Potencial Associado (DPA) refere-se à magnitude das consequências decorrentes de um possível rompimento, considerando o risco de perdas de vidas humanas, bem como os impactos econômicos, sociais e ambientais. Em ambos os parâmetros (CRI e DPA), as barragens são categorizadas em níveis baixo, médio e alto, conforme estabelecido pela Lei nº 12.334/2010 (BRASIL, 2010). Enquanto o estudo desenvolvido pela FEST (2024), complementa essas classificações, por avaliar barragens de pequeno porte localizadas em um trecho de 2 km ao longo da rodovia BR-101/ES, com o objetivo de analisar o impacto potencial de um rompimento hipotético sobre a rodovia. De modo que a avaliação da FEST (2024) contempla variáveis como a posição espacial em relação à rede hidrográfica e à rodovia, o volume armazenado, a área de drenagem do barramento, a vazão máxima estimada para um tempo de retorno de 100 anos e a existência de outras

barragens a jusante. A partir desses critérios, as estruturas foram classificadas em quatro níveis de impacto: baixo, médio, alto e crítico.

Nesse sentido, os resultados do presente trabalho dialogam diretamente com tal abordagem, ao fornecerem parâmetros objetivos de propagação da onda de cheia que permitem estimar os possíveis impactos. Essa triangulação entre o modelo proposto, o enquadramento oficial do SNISB e os resultados técnicos da FEST confere maior robustez às conclusões e evidencia a importância de se utilizar metodologias complementares. Em última instância, a convergência e a divergência entre as diferentes classificações contribuem para um diagnóstico mais realista e detalhado, subsidiando ações de planejamento, gestão de riscos e políticas públicas voltadas à segurança de barragens e à proteção de comunidades vulneráveis.

6.5. Contribuições para a gestão de riscos e o planejamento territorial

Os resultados obtidos apresentam implicações diretas para a gestão de riscos e o planejamento territorial em áreas potencialmente afetadas por rompimentos de barragens. A adoção de uma metodologia simplificada, de fácil aplicação e baixo custo computacional, possibilita sua utilização por gestores públicos e privados mesmo em contextos com infraestrutura de monitoramento limitada, como ocorre em grande parte do território brasileiro.

Ao fornecer subsídios para a elaboração de planos de ação emergencial, definição de zonas de risco e priorização de áreas críticas para intervenções preventivas, o modelo contribui para a formulação de políticas públicas mais eficientes voltadas à proteção de comunidades vulneráveis. Ademais, a integração dos resultados da modelagem com informações de uso e ocupação do solo permite identificar áreas urbanas densamente povoadas, comunidades rurais e atividades produtivas situadas em zonas de risco, possibilitando a elaboração de mapas de vulnerabilidade mais detalhados e a adoção de medidas de mitigação adaptadas às realidades locais.

Dessa forma, a metodologia proposta assume papel estratégico na articulação entre gestão de recursos hídricos, ordenamento territorial e políticas de proteção civil, fortalecendo a resiliência urbana e rural frente a desastres associados ao rompimento de barragens.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho avaliou, por meio de um modelo simplificado de atenuação, proposto por Paiva e Lima (2024), os potenciais impactos decorrentes de cenários de rompimento de barragens, considerando diferentes tipologias e portes de barragens cadastradas no SNISB. A metodologia adotada permitiu a obtenção de parâmetros hidrodinâmicos fundamentais, como a celeridade da onda, a extensão da mancha de inundação, o fator de atenuação e a distância de redução de 50%, permitindo a caracterização dos efeitos iniciais e secundários das propagações das cheias.

O objetivo geral, de avaliar o impacto das ondas de cheias geradas pelo rompimento hipotético de pequenas barragens no Espírito Santo e respectivas áreas de inundação, foi alcançado mediante a caracterização de parâmetros hidrodinâmicos essenciais. Da mesma forma, os objetivos específicos foram contemplados: foram definidos parâmetros para barragens rurais com informações limitadas; definiram-se a aplicabilidade de um modelo simplificado na estimativa da atenuação da onda; avaliou-se o impacto da variação de parâmetros do modelo nos resultados obtidos, por meio de uma análise de sensibilidade aplicada aos parâmetros hidrodinâmicos e geométricos; e, por fim, verificou-se os resultados obtidos com o modelo simplificado em relação às classificações de impactos já existentes disponíveis no SNISB com base na PNSB e o estudo da FEST (2024) das barragens de estudo, evidenciando coerências, divergências e a complementaridade do método proposto.

Os resultados evidenciaram diferenças significativas no comportamento das ondas de cheia para as diferentes barragens consideradas, confirmando a influência de variáveis como volume de armazenamento, tempo de ruptura e características geomorfológicas da bacia de jusante. Estruturas de menor porte, embora apresentem manchas de inundação mais restritas, podem gerar danos expressivos em função da alta concentração de energia no trecho imediato ao barramento. Além disso, verificou-se a sensibilidade de parâmetros de entrada do modelo à manipulação, evidenciando que suas variações exercem influência significativa nos resultados obtidos.

Ressalta-se, entretanto, que as simplificações impostas ao modelo acarretam incertezas relevantes, uma vez que não foram considerados processos erosivos, variações sazonais de vazão, rugosidade espacialmente variável ou alterações morfológicas do canal. Dessa forma, os cenários apresentados não devem ser

interpretados de maneira absoluta, mas como subsídios iniciais ao planejamento e à tomada de decisão.

Por fim, destaca-se que a integração dos resultados com dados de uso e ocupação do solo ampliou a aplicabilidade prática do estudo, permitindo identificar áreas urbanas, comunidades rurais e atividades econômicas expostas ao risco. Essa perspectiva favorece a elaboração de políticas públicas mais eficientes e fortalece a articulação entre gestão de riscos, ordenamento territorial e proteção civil.

Considerando os avanços e limitações do estudo, recomenda-se:

- Aprimoramento do modelo – Incorporar, em futuras aplicações, modelos hidrodinâmicos bidimensionais capazes de representar com maior fidelidade a propagação lateral da onda em áreas de várzea e planícies aluviais complexas;
- Calibração com dados observacionais – Se possível, utilizar registros históricos de cheias, monitoramento hidrossedimentológico e levantamentos de rugosidade de campo, de modo a reduzir incertezas e aumentar a confiabilidade das simulações;
- Consideração da variabilidade temporal – Realizar análises sazonais distintas, contemplando cenários de estiagem e de cheia, de modo a avaliar a sensibilidade do modelo a diferentes condições iniciais e operacionais dos reservatórios;
- Integração com ferramentas de geotecnologias – Explorar o uso de bases cartográficas de alta resolução e de técnicas de sensoriamento remoto, que podem ampliar a precisão dos mapas de inundação e subsidiar a definição de zonas prioritárias para intervenções, considerando a população em torno das barragens, uso e ocupação do solo;
- Aplicação em políticas públicas e gestão local – Utilizar os resultados obtidos como subsídio para a elaboração de Planos de Ação de Emergência (PAE), mapeamento de áreas vulneráveis e fortalecimento da gestão integrada de riscos em bacias hidrográficas com elevado número de barragens de pequeno e médio porte;
- Ampliação para estudos regionais – Estender a aplicação da metodologia a diferentes contextos geomorfológicos e hidrológicos, permitindo avaliar sua

robustez em escala regional e contribuir para o aperfeiçoamento das classificações oficiais de risco de barragens.

8. REFERÊNCIAS

AGERH. AGÊNCIA ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria da Vitória. Disponível em: <https://agerh.es.gov.br/cbh-smv>.

AGERH. AGÊNCIA ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS. Relatório Estadual de Segurança de Barragens 2024. Vitória, ES: AGERH, 2025. Disponível em: https://agerh.es.gov.br/Media/agerh/Relat%C3%B3rios/relatorioestadual_2024.pdf.

AGORAMOORTHY, G.; HSU, M. Y.; LIU, J. H. Small size, Big Potential: Check Dams For Sustainable Development. *Environmental Earth Sciences*, v. 75, art. 1035, 2016. Disponível em: Small size, Big Potential: Check Dams For Sustainable Development: Environment: Science and Policy for Sustainable Development: Vol 50, No 4.

AGUIAR, D. P. O.; FAIS, L. M. C. F.; GENOVEZ, A. I. B.; FILHO, J. G. D. Contribuição ao estudo do índice de segurança de barragens – ISB. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 20, n. 2, p. 360-368, 2015.

ALAHIANE, N. et al. Small dam reservoir siltation in the Atlas Mountains of Central Morocco: analysis of factors impacting sediment yield. *Environmental SNISBEarth Sciences*, v. 75, art. 1035, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-016-5795-y>.

ALMEIDA, A.; SILVA, R.; LIMA, J.; COSTA, A. Modelagem numérica do rompimento de uma barragem de terra usando o software HEC-RAS. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 23, e23, 2018.

AMORIM, R. BR 101: estudo da Ufes avalia riscos de barragens perto da rodovia. *A Gazeta*, 28 fev. 2025. Disponível em: <https://www.agazeta.com.br/artigos/br-101-estudo-da-ufes-avalia-riscos-de-barragens-perto-da-rodovia-0225>.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Guia de Revisão Periódica de Segurança de Barragens: volume 3. Brasília, DF: ANA, 2016. Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/Busca/Download?codigoArquivo=124736.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Relatório de Segurança de Barragens 2024 - 2025. Brasília, DF: ANA, 2025. Disponível em: <

<https://www.snisb.gov.br/#elementor-action%3Aaction%3Dpopup%3Aopen%26settings%3DeyJpZCI6IjcxMCIsInRvZ2dsZSI6ZmFsc2V9>>.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Relatório de Segurança de Barragens 2023. Brasília, DF: ANA, 2024. Disponível em: https://www.snisb.gov.br/portal-snisp/api/file/download/714/4/rsb_2023_2024_06_27_11_01_28.pdf.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Resolução nº 121, de 9 de maio de 2022. Brasília, DF: ANA, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/legislacao/resolucoes/resolucoes-regulatorias/2022/121>.

ANDRADE, S. B. de; SOUZA, W. L. de; ARAÚJO, A. C. G. de; BECKER, A. C. C.; VALE, V. L. do. Avaliação de softwares de modelos numéricos 2D e 3D para estudos de ruptura hipotética de barragens. In: II FLUHIDROS - Simpósio Nacional de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica e XVI ENES - Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 2024, Curitiba-PR. Anais. Curitiba: ABRHidro, 2024. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=16518>.

BACHETTI, A. Após rompimento parcial de barragem em Colatina, ES, moradores começam a voltar para casa. G1 ES, 05 dez. 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/es/espírito-santo/notícia/2022/12/05/rompimento-parcial-de-barragem-em-colatina.ghtml>.

BARRAGENS irregulares no ES são represas de irresponsabilidade e omissão. A Gazeta, 24 mar. 2023. Opinião. Disponível em: <<https://www.agazeta.com.br/editorial/barragens-irregulares-no-es-sao-represas-de-problemas-0323>>.

BLOSCHL, G. Emerging trends in flood risk research. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, v. 384, p. 1-12, 2022.

BOCCHIOLA, D.; ROSSO, R. Safety of Italian dams in the face of flood hazard. Advances in Water Resources, n. 71, p. 23-31, 2014. DOI: 10.1016/j.advwatres.2014.05.006.

BRASIL, C. S. G. (2015). Monitoramento especial da bacia do Rio Doce. Relatório 01: acompanhamento da onda de cheia. CPRM.

BRASIL. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução CNRH nº 241, de 10 de setembro de 2024. Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por dano potencial associado, por volume e por categoria de risco, em atendimento ao art. 7º da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 204, p. 137, 21 out. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/cnrh-no-241-2024.pdf>.

BRASIL. Presidência da República. Lei n. 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Diário Oficial [da] União: seção 1, Brasília, DF, p. 1–5, 21 set. 2010.

BRASIL. Presidência da República. Lei n. 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). Diário Oficial [da] União: seção 1, Brasília, DF, p. 3, 01 out. 2020.

BRUNNER, G. W.; MERZ, B.; GEBHARDT, C. Advances in flood wave attenuation research. *Journal of Hydrology*, v. 601, p. 126731, 2021.

CANADIAN DAM ASSOCIATION (CDA). Dam breach analysis: guidelines and best practices. CDA, 2021.

CHEN, T.-Y.-K.; CAPART, H. Kinematic wave solutions for dam-break floods in non-uniform valleys. *Journal of Hydrology*, v. 582, 2020. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124381.

CHEN, Y.; WU, C.; WANG, B. Similarity solution of dam-break flow on horizontal frictionless channel. *Journal of Hydraulic Research*, v. 49, n. 3, p. 384-387, 2011. DOI: 10.1080/00221686.2011.571537.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. *Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1988.

Costa, J. E. (1985). Floods from dam failures (Vol. 85, No. 560). US Geological Survey. CRED-UNDRR. (2020). The human cost of disasters: An overview of the last 20 years (2000 2019). Centre for Research on the Epidemiology of Disasters — UN Office for Disaster Risk Reduction. https://cred.be/sites/default/files/adsr_2019.pdf

CPRM. Ministério de Minas e Energia. Serviço Geológico do Brasil – SGB. Cartografia de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações. [s.l.: s.n.], [s.d.]. Disponível em: <http://www.sgb.gov.br/cartografia-de-suscetibilidade>

DAM, T. T.; BURRITT, R. L.; PISANIELLO, J. D. Adequacy of policy and practices for small agricultural dam safety accountability and assurance in Vietnam. *Agricultural Water Management*, n. 112, p. 63-74, 2012. DOI: 10.1016/j.agwat.2012.06.006.

DIAS, N.; LACERDA, N.; LOUREIRO, C.; FRANCO, F. Numerical modelling of the Malpasset dam-break (France, 1959) using a two-dimensional finite volume method. *Journal of Hydraulic Research*, v. 57, n. 1, p. 53-68, 2019.

DINGMAN, S. L. *Fluvial Hydraulics*. Oxford: Oxford University Press, 2009.

DOOCY, S.; DANIELS, A.; MURRAY, S.; KIRSCH, T. D. (2013). The human impact of floods: A historical review of events 1980-2009 and systematic literature review. DOI: 10.1371/currents.dis.f4deb45790 4936b07c09daa98ee8171a.

FERRARI, A.; VACONDIO, R.; MIGNOSA, P. High-resolution 2D shallow water modelling of dam failure floods for emergency action plans. *Journal of Hydrology*, v. 618, 2023. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129192.

FEST. FUNDAÇÃO ESPÍRITO SANTENSE DE TECNOLOGIA. Estudo de análise e priorização de barragens localizadas próximo à rodovia BR-101/ES, no trecho sob concessão da Eco101 no estado do Espírito Santo: Relatório Final – Priorização das barragens quanto ao risco potencial de impacto. Vitória, ES: FEST, 2024.

FLEISCHMANN, A. S.; PELLEGRINA, L. C.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W. Large-scale hydrologic modeling using high-resolution hydrography and hydrodynamic routing. *Water Resources Research*, v. 52, n. 11, p. 9390-9410, 2016.

FLOW-3D. Flow Science Releases FLOW-3D v12.0. Disponível em: <https://www.flow3d.com/>.

FREAD, D. L. DAMBRK: The NWS dam-break flood forecasting model. Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service, NOAA, 1980.

FREAD, D. L. NWS DAMBRK model: theoretical background/user documentation. National Weather Service, Office of Hydrology, 1991.

GAMBARRA, R.; VIEIRA, A. 20 anos da tragédia de Camará: vítimas relembram perdas causadas por rompimento da barragem e ainda sentidas. G1 PB e TV Cabo Branco, 17 jun. 2024. Disponível em: <https://g1.globo.com/pb/paraiba/noticia/2024/06/17/20-anos-da-tragedia-de-camara-vitimas-relembram-perdas-causadas-por-rompimento-da-barragem-e-ainda-sentidas.ghtml>

HENDERSON, F. M. (1966). Open channel flow. Macmillan, New York.

ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. World Register of Dams. Paris: ICOLD, 2022.

JUNK, W. J.; BAYLEY, P. B.; SPARKS, R. E. The flood pulse concept in river-floodplain systems. Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences, v. 106, p. 110-127, 1989.

KONEČNÝ, P.; ŠEVČÍK, O. Comparison of Turbulence Models in OpenFOAM for 3D Simulation of Gas Flow in Solid Propellant Rocket Engine. In: EPJ Web of Conferences. EDP Sciences, 2016. p. 02119.

LIMA, D. A.; COSTA e SILVA, D. C. da; FREIRIA, R. C.; FAIS, L. M. C. F. An overview of the small dams existing in the municipality of Campinas/SP. In: BRAZILIAN SYMPOSIUM OF HYDRICAL RESSOURCES, 24., November, 21th to 26th, 2021, Belo Horizonte. Works [...] São Paulo: ABRH, 2021.

LIMA, D. A.; LIMA, G. T. N. P.; MOLINA JÚNIOR, V. E.; FAIS, L. M. C. F. Aplicação da metodologia simplificada de classificação de pequenas barragens em cascata. Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, 2022. DOI: 10.4136/ambi-agua.2790.

MACCHIONE, F.; GRAZIANO, A. A. Dimensionless attenuation of dam-breach flood wave propagating along a river. Journal of Hydrology, v. 641, 2024. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131765.

MACIEL, V. Rompimento de represa causou cratera na BR 101 em São Mateus, diz Eco101. A Gazeta, 20 dez. 2022. Disponível em: <https://www.agazeta.com.br/es/cotidiano/rompimento-de-represa-causou-cratera-na-br-101-em-sao-mateus-diz-eco101-1222>.

MARANZONI, A., D'ORIA, M.; RIZZO, C. (2023). Quantitative flood hazard assessment methods: a review. Journal of Flood Risk Management, 16 (1), e12855. Crossref. ISI. DOI: 10.1111/jfr3.12855. 8 XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (ISSN 2318-0358)

MERZ, B.; BLOSCHL, G.; HALL, J.; DISSE, M. Flood risk analysis: large-scale drivers and their interactions. Water Resources Research, v. 57, n. 10, p. e2021WR031408, 2021.

MERZ, B.; BLÖSCHL, G.; VOROGUSHYN, S.; DOTTORI, F.; AERTS, J. C.; BATES, P.; MACDONALD, E. (2021). Causes, impacts and patterns of disastrous river floods. Nature Reviews Earth & Environment, 2(9), 592-609. DOI: 10.1038/s43017-021-00195-3.

MIRANDA, Cristian. Três barragens se rompem e Jaguaré, no Norte do ES, decreta estado de emergência. G1 Espírito Santo, 20 dez. 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/es/espírito-santo/noticia/2022/12/20/barragens-jaguare.ghtml>.

MISHRA, A. K.; SINGH, V. P.; SHUKLA, S. Flood frequency analysis under changing climate conditions. Hydrological Processes, v. 36, n. 1, p. e14567, 2022.

NAVA, F. R.; ISHIHARA, J. H.; RAVENA, N.; VILHENA, K. do S. de S. Lack of knowledge or neglect? The contributions of science to mitigating the risks of small

Brazilian dams. International Journal of Disaster Risk Reduction, n. 60, 2021. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2021.102269.

O'BRIEN, J. S.; JULIEN, P. Y. Laboratory analysis of mudflow properties. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 114, n. 8, p. 877-887, 1988.

PACHECO, A. P.; HENRIQUES, R. F. F.; RIBEIRO, P. M. V. Technical and scientific aspects of dams in Brazil: a theoretical approach. *Revista Ambiente & Água*, v. 15, n. 5, 2020. DOI: 10.4136/ambi-agua.2552.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; BATES, P. D. Role of lateral water exchange between floodplains and river channels in the regional-scale hydrological modeling. *Water Resources Research*, v. 49, n. 11, p. 6485-6496, 2013.

PAIVA, R. C. D.; LIMA, S. G. (2024). A simple model of flood peak attenuation. *Water Resources Research*, 60, e2023WR034692. DOI: 10.1029/2023WR034692

PISANIELLO, J. D.; BURRITT, R. L.; TINGEY-HOLYOAK, J. L. Dam safety management for sustainable farming businesses and catchments. *Agricultural Water Management*, n. 98, p. 507-516, 2011. DOI: 10.1016/j.agwat.2010.10.001.

PISANIELLO, J. D.; DAM, T. T., TINGEY-HOLYOAK, J. L. International small dam safety assurance policy benchmarks to avoid dam failure flood disasters in developing countries. *Journal of Hydrology*, v. 531, p. 1141-1153, 2015. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.09.077.

POFF, N. L.; ALLAN, J. D.; BAIN, M. B.; KARR, J. R.; PRESTEGAARD, K. L.; RICHTER, B. D.; SPARKS, R. E.; STROMBERG, J. C. The natural flow regime. *BioScience*, v. 47, n. 11, p. 769-784, 1997.

PONCE, V. M. *Engineering Hydrology: Principles and Practices*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2014.

PONCE, V. M.; SIMONS, D. B. (1977). Shallow wave propagation in open channel flow. *Journal of the Hydraulics Division*, 103(12), 1461-1476. DOI: 10.1061/JYCEAJ.0004892

PONCE, V. M.; TAHER-SHAMSI, A.; SHETTY, A. V. (2003). Dam-breach flood wave propagation using dimensionless parameters. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(10), 777-782. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:10(777)

REDE AMAZÔNICA. Barragem rompe em distrito de Machadinho D'Oeste, RO. Rede Amazônica, 29 mar. 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/ro/ariquemes-e-vale-do-jamari/noticia/2019/03/29/barragem-rompe-em-machadinho-doeste-ro.ghtml>

ŘÍHA, J.; KOTAŠKA, S.; PETRULA, L. Dam Break Modeling in a Cascade of Small Earthen Dams: Case Study of the Čížina River in the Czech Republic. *Water*, v. 12, 2309, 2020. DOI: 10.3390/w12082309.

ROSSI, C. L. C. U.; MARQUES, M. G.; TEIXEIRA, E. D.; MELO, J. F. D.; FERLA, R.; PRÁ, M. D. (2021). Dam-Break analysis: proposal of a simplified approach. *RBRH*, 26. DOI: 10.1590/2318 0331.262120200066

RUTSCHMANN, P., & HAGER, W. H. (1996). Diffusion of floodwaves. *Journal of Hydrology*, 178(1-4), 19-32. DOI: 10.1016/0022-1694(95)02824-2

SALTELLI, A. et al. *Global Sensitivity Analysis: The Primer*. Chichester: John Wiley & Sons, 2008.
Disponível em: < Global Sensitivity Analysis. The Primer | Wiley Online Books>.

SINGH, V. P.; SNORRASON, A. Dam breach modeling technology. Springer Science & Business Media, 2004.

SPERO, T. L.; CALHOUN, C. C. Comparison of 2D hydraulic modeling packages. In: World Environmental and Water Resources Congress 2022. American Society of Civil Engineers, 2022. p. 1-9.

U. S. Bureau of Reclamation. (1989). Policy and Procedures for Dam Safety Modification Decision Making. Denver: Department of Interior. April 1989. 302 p.

USACE. Hydrologic engineering requirements for reservoirs. Engineer Regulation ER 1110-2-1420. US Army Corps of Engineers, 2010.

WAHL, T. L. Prediction of embankment dam breach parameters: a literature review and needs assessment. US Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation, Dam Safety Office, 1998.

WANG, B.; CHEN, Y.; WU, C.; PENG, Y.; MAMÃ, X.; CANÇÃO, J. Analytical solution of dam-break flood wave propagation in a dry sloped channel with an irregular-shaped cross-section. *Journal of Hydro-environment Research*, v. 14, p. 93-104, 2017. DOI: 10.1016/j.jher.2016.11.003.

WANG, B.; LIU, X.; ZHANG, J.; GUO, Y.; CHEN, Y.; PENG, Y.; LIU, W.; YANG, S.; ZHANG, F. Analytical and experimental investigations of dam-break flows in triangular channels with wet-bed conditions. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 146, n. 10, p. 04020070, 2020. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001808.

WANG, B.; ZHANG, F.; GUO, Y.; LIU, W.; SUN, H. Theoretical investigation of dam-break waves in frictional channels with power-law sections. *Ocean Engineering*, v. 268, 2023. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.113416.

WANG, J.; LIU, H.; WANG, G.; LI, M. Numerical simulation of hydrodynamic and water quality in the Pearl River estuary and adjacent coastal waters using the MIKE 21 Ecolab model. *Marine Pollution Bulletin*, v. 121, n. 1-2, p. 15-28, 2017.

WETMORE, J. N.; FREAD, D. L. (1981). The NWS simplified dam-break flood forecasting model. National Weather Service, Silver Spring, Maryland, 164-197.

WONG, T. H.; LAURENSEN, E. M. Modelling flood attenuation by floodplain storage. *Journal of Hydrology*, v. 65, n. 1-3, p. 159-177, 1983.

ZANUTTIGH, B.; LAMBERTI, A. Dam-break waves in power-law channel section. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 127, n. 4, p. 322-326, 2001. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:4(322).

ZHANG, L. M.; XU, Y.; JIA, J. S. Analysis of earth dam failures—A database approach. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, v. 3, n. 3, p. 184–189, 2009. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29GT.1943-5606.0000162>.

ZHAO, D.; ZHANG, L.; LI, Z.; WANG, F. Numerical simulation of the 1963 Vajont landslide and generated waves. *Engineering Geology*, v. 238, p. 143-152, 2018.