



MILENA CRISTINA DE PAULA CARVALHO E SILVA

**PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO DANO
POTENCIAL ASSOCIADO PARA BARRAGENS EM
CASCATA**

LAVRAS - MG

2026

MILENA CRISTINA DE PAULA CARVALHO E SILVA

**PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO DANO POTENCIAL ASSOCIADO
PARA BARRAGENS EM CASCATA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, área de concentração em Geotecnia Ambiental, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador
Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido

LAVRAS - MG

2026

**Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração
de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Silva, Milena Cristina de Paula Carvalho e.

Proposta de Classificação Quanto ao Dano Potencial Associado para Barragens em
Cascata / Milena Cristina de Paula Carvalho e Silva. - 2026.

98 p. : il.

Orientador: Eduardo Souza Cândido

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2026.
Bibliografia.

1. Barragens em cascata. 2. Rompimento hipotético. 3. Risco hidrodinâmico. 4.
Dano potencial associado. 5. Modelagem hidrodinâmica. I. Cândido, Eduardo Souza.
II. Universidade Federal de Lavras. III. Título.

MILENA CRISTINA DE PAULA CARVALHO E SILVA

**PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO DANO POTENCIAL
ASSOCIADO PARA BARRAGENS EM CASCATA**

**PROPOSAL FOR THE CLASSIFICATION OF POTENTIAL ASSOCIATED
DAMAGE FOR CASCADE DAMS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, área de concentração em Geotecnia Ambiental, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 26 de fevereiro de 2026.

Dr. André Geraldo Cornélio Ribeiro

UFLA

Dr. Emmanuel Kennedy da Costa Teixeira

UFV

Orientador
Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido

LAVRAS - MG

2026

Aos meus pais, ao meu esposo e ao meu filho.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e à Nossa Senhora, por me concederem essa graça.

Agradeço aos meus pais e ao meu esposo, que foram suporte e acolhida em todos os momentos. Obrigada por todas as orações, conselhos, compreensão e incentivos, amo vocês.

Ao meu orientador, Professor Eduardo, pela ajuda, compreensão e paciência.

Ao professor Emmanuel, da UFV, que muito me auxiliou durante o processo da pesquisa e tratamento dos resultados.

Agradeço à Universidade Federal de Lavras – UFLA, ao Departamento de Engenharia - DEG e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da UFLA – PPGEAMB/UFLA, pela estrutura oferecida e pela oportunidade de realização do Mestrado.

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Agradeço ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos, que tornou possível a realização do Mestrado.

RESUMO

O rompimento de barragens representa um dos cenários de maior risco associado a empreendimentos hidráulicos, sobretudo quando essas estruturas se encontram dispostas em cascata ao longo de um mesmo curso d'água. Apesar da relevância do tema, os critérios atualmente adotados no Brasil para a classificação quanto ao dano potencial associado (DPA), estabelecidos no âmbito da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), consideram as barragens de forma individual, não contemplando explicitamente os efeitos cumulativos e as interações hidrodinâmicas entre estruturas encadeadas. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento hidrodinâmico de ondas de cheia decorrentes do rompimento hipotético de barragens dispostas em cascata, bem como propor novos critérios de classificação quanto ao DPA frente a esses cenários. Para isso, foram analisados nove conjuntos de barragens de terra para armazenamento de água, representando diferentes combinações de porte entre barragens de montante e jusante. As simulações de ruptura foram realizadas por meio de modelagem hidrodinâmica bidimensional no software HEC-RAS, considerando quatro cenários hidrológicos: sem precipitação e com precipitações associadas a tempos de retorno de 500, 1.000 e 10.000 anos. Os resultados foram analisados a partir de mapas de profundidade, velocidade e risco hidrodinâmico máximos da mancha de inundação, também foi considerada a metodologia proposta por Smith *et al.* (2014). Observou-se que, em diversos cenários, barragens de pequeno porte localizadas a montante tiveram seus impactos amortecidos pelas barragens de jusante, enquanto determinadas combinações de volumes resultaram em intensificação significativa do risco hidrodinâmico, evidenciando a importância da avaliação integrada. Os resultados indicam que a análise isolada das barragens pode subestimar ou superestimar o dano potencial associado, reforçando a necessidade de critérios específicos para barragens em cascata. Dessa forma, o estudo contribui para o aprimoramento das práticas de avaliação de risco e classificação de barragens, fornecendo subsídios técnicos para uma abordagem mais representativa dos impactos associados a sistemas em cascata.

Palavras-chave: barragens em cascata; rompimento hipotético; risco hidrodinâmico; dano potencial associado; modelagem hidrodinâmica.

ABSTRACT

The failure of dams represents one of the highest-risk scenarios associated with hydraulic infrastructure, particularly when these structures are arranged in cascade along the same watercourse. Despite the relevance of this topic, the criteria currently adopted in Brazil for classification regarding potential associated damage (DPA), established within the framework of the National Dam Safety Policy (PNSB), consider dams individually, without explicitly addressing the cumulative effects and hydrodynamic interactions between interconnected structures. In this context, this study aims to evaluate the hydrodynamic behavior of flood waves resulting from the hypothetical failure of dams arranged in cascade, as well as to propose new classification criteria for DPA under such scenarios. To this end, nine sets of earthfill dams for water storage were analyzed, representing different combinations of upstream and downstream dam sizes. The failure simulations were carried out using two-dimensional hydrodynamic modeling in the HEC-RAS software, considering four hydrological scenarios: no precipitation and precipitation events associated with return periods of 500, 1,000, and 10,000 years. The results were analyzed based on maximum depth, velocity, and hydrodynamic hazard maps of the floodplain, and the methodology proposed by Smith et al. (2014) was also considered. The results showed that, in several scenarios, small upstream dams had their impacts attenuated by downstream dams, whereas certain volume combinations led to a significant intensification of hydrodynamic risk, highlighting the importance of integrated assessment. The findings indicate that analyzing dams individually may underestimate or overestimate the associated potential damage, reinforcing the need for specific criteria for cascade dam systems. Thus, this study contributes to the improvement of risk assessment practices and dam classification, providing technical support for a more representative approach to the impacts associated with cascade systems.

Keywords: cascading dams; hypothetical dam failure; hydrodynamic risk; potential associated damage; hydrodynamic modeling.

INDICADORES DE IMPACTO

O presente trabalho apresenta impacto tecnológico, ambiental e social indireto, ao contribuir para o aprimoramento das metodologias de avaliação de risco e da classificação quanto ao dano potencial associado (DPA) de barragens, especialmente em sistemas dispostos em cascata. A aplicação de modelagem hidrodinâmica bidimensional e de critérios de risco hidrodinâmico permite uma análise mais realista dos impactos associados a rompimentos hipotéticos, subsidiando a identificação de áreas vulneráveis, populações expostas e infraestruturas críticas. Embora não possua caráter extensionista direto, o estudo apresenta potencial de impacto extensionista indireto, uma vez que seus resultados podem apoiar órgãos gestores, fiscalizadores, defesas civis e empreendedores na tomada de decisão relacionada à segurança de barragens e ao planejamento de ações preventivas e emergenciais. Os resultados são aplicáveis ao território brasileiro, com maior relevância para regiões com presença de barragens em cascata. Os principais grupos beneficiados de forma indireta incluem comunidades situadas a jusante dessas estruturas, gestores públicos e profissionais das áreas de recursos hídricos, geotecnia e segurança de barragens. O trabalho se enquadra, prioritariamente, nas áreas temáticas da Política Nacional de Extensão Meio ambiente (5) e Tecnologia e produção (7), contribuindo para a prevenção de impactos ambientais e para o aprimoramento de ferramentas técnicas aplicadas à segurança de infraestruturas hidráulicas. Quanto ao alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), o estudo contribui principalmente para os ODS 6 (Água potável e saneamento), ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura), ODS 11 (Cidades e comunidades sustentáveis) e ODS 13 (Ação contra a mudança do clima), ao apoiar a redução do risco de desastres associados a eventos hidrológicos extremos.

IMPACT INDICATORS

This study presents technological, environmental, and indirect social impacts by contributing to the improvement of risk assessment methodologies and the classification of Potential Associated Damage (PAD) for dams, particularly in cascading dam systems. The application of two-dimensional hydrodynamic modeling and hydrodynamic risk criteria enables a more realistic analysis of the impacts associated with hypothetical dam failures, supporting the identification of vulnerable areas, exposed populations, and critical infrastructure. Although the study does not have a direct extension or outreach character, it presents indirect extension potential, as its results may support decision-making by regulatory agencies, civil defense authorities, and dam owners regarding dam safety management and emergency planning. The results are applicable to the Brazilian territory, with particular relevance to regions containing dams arranged in cascade. The main indirectly benefited groups include downstream communities, public managers, and professionals working in water resources, geotechnical engineering, and dam safety. The impacts of the study are primarily classified within the thematic areas of the National Extension Policy Environment (5) and Technology and Production (7), contributing to environmental impact prevention and the improvement of technical tools applied to hydraulic infrastructure safety. Regarding alignment with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), the study contributes mainly to SDG 6 (Clean Water and Sanitation), SDG 9 (Industry, Innovation and Infrastructure), SDG 11 (Sustainable Cities and Communities), and SDG 13 (Climate Action), by supporting disaster risk reduction associated with extreme hydrological events.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tipos de barragem quanto ao material: (a) terra, (b) concreto e (c) enrocamento..	18
Figura 2 – Classificação quanto à categoria de risco – CRI.....	25
Figura 3 - Classificação quanto ao dano potencial associado (DPA).....	26
Figura 4 – Quartis do método Huff (1967).....	36
Figura 5 – Vazões máximas anuais – Conjunto 6.	38
Figura 6 - Vazões máximas anuais – Conjunto 8.	38
Figura 7 - Vazões máximas anuais – Conjunto 9.	39
Figura 8 – Parâmetros da brecha.	40
Figura 9 – Hidrogramas: (a) Conjunto 1, (b) Conjunto 2, (c) Conjunto 3, (d) Conjunto 4, (e) Conjunto 5, (f) Conjunto 6, (g) Conjunto 7, (h) Conjunto 8 e (i) Conjunto 9.....	44
Figura 10 - Profundidade máxima do Conjunto 1: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.....	50
Figura 11 - Profundidade máxima do Conjunto 2: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.....	51
Figura 12 - Profundidade máxima do Conjunto 3: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.....	52
Figura 13 - Profundidade máxima do Conjunto 4: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.....	53
Figura 14 - Profundidade máxima do Conjunto 5: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.....	54
Figura 15 - Profundidade máxima do Conjunto 6: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.....	55
Figura 16 - Profundidade máxima do Conjunto 7: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.....	56
Figura 17 - Profundidade máxima do Conjunto 8: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.....	57
Figura 18 - Profundidade máxima do Conjunto 9: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.....	58
Figura 19 - Velocidade Máxima do Conjunto 1: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.	61
Figura 20 - Velocidade Máxima do Conjunto 2: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.	62

Figura 21 - Velocidade Máxima do Conjunto 3: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.	63
Figura 22 - Velocidade Máxima do Conjunto 4: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.	64
Figura 23 - Velocidade Máxima do Conjunto 5: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.	65
Figura 24 - Velocidade Máxima do Conjunto 6: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.	66
Figura 25 - Velocidade Máxima do Conjunto 7: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.	67
Figura 26 - Velocidade Máxima do Conjunto 8: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.	68
Figura 27 - Velocidade Máxima do Conjunto 9: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.	69
Figura 28 - Risco Hidrodinâmico Máximo do Conjunto 1: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.	72
Figura 29 - Risco Hidrodinâmico Máximo do Conjunto 2: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.	73
Figura 30 - Risco Hidrodinâmico Máximo do Conjunto 3: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.	74
Figura 31 - Risco Hidrodinâmico Máximo do Conjunto 4: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.	75
Figura 32 - Risco Hidrodinâmico Máximo do Conjunto 5: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.	76
Figura 33 - Risco Hidrodinâmico Máximo do Conjunto 6: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.	77
Figura 34 - Risco Hidrodinâmico Máximo do Conjunto 7: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.	78
Figura 35 - Risco Hidrodinâmico Máximo do Conjunto 8: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.	79
Figura 36 - Risco Hidrodinâmico Máximo do Conjunto 9: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros de classificação quanto à categoria de risco – Características técnicas	22
Quadro 2 - Parâmetros de classificação quanto à categoria de risco – Estado de conservação	22
Quadro 3 - Parâmetros de classificação quanto à categoria de risco – Plano de segurança da barragem	24
Quadro 4 - Parâmetros de classificação quanto ao dano potencial associado	25
Quadro 5 – Zonas de risco	29
Quadro 6 – Conjuntos de barragens de estudo	32
Quadro 7 – Parâmetros da distribuição de Gumbel	39
Quadro 8 – Vazões máximas de Gumbel e fator de correção	40
Quadro 9 – Parâmetros do estudo de convergência de malha – Conjunto 1	47
Quadro 10 – Parâmetros do estudo de convergência de malha – Conjunto 5	47
Quadro 11 – Parâmetros do estudo de convergência de malha – Conjunto 9	47
Quadro 12 – Ruptura da barragem de jusante	48
Quadro 13 – Valores máximos de profundidade (m)	59
Quadro 14 – Valores máximos de velocidade (m/s).....	70
Quadro 15 – Valores máximos de risco hidrodinâmico (m ² /s).....	81
Quadro 16 – Proposta de classificação quanto ao dano potencial associado para barragens em cascata.....	83

LISTA DE SIGLAS

CN	<i>Curve Number</i>
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
DPA	Dano Potencial Associado
MDE	Modelo Digital de Elevação
PAE	Plano de Ação Emergencial
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PSB	Plano de Segurança de Barragens
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
UFLA	Universidade Federal de Lavras

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
2 OBJETIVOS.....	17
3 REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1 Barragens.....	18
3.2 Danos e desastres.....	19
3.3 Segurança de barragens no Brasil.....	20
3.4 Classificação de barragens	21
3.5 Risco hidrodinâmico	27
3.6 Estudo de ruptura de barragens.....	29
3.7 Avaliação de impacto e classificação para barragens em cascata	30
4 MATERIAL E MÉTODOS	32
4.1 Conjuntos de estudo.....	32
4.2 Base topográfica	33
4.3 Cálculo das chuvas de projeto	34
4.4 Cálculo dos hidrogramas.....	35
4.5 Parâmetros das brechas	40
4.6 Estudo de convergência de malha	41
4.7 Cenários de simulação	42
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
5.1 Hidrogramas.....	43
5.2 Estudo de convergência de malha	47
5.3 Ruptura em cascata	48
5.4 Mapas de Profundidade Máxima	49
5.5 Mapas de Velocidade Máxima	60
5.6 Mapas de Risco Hidrodinâmico Máximo.....	71
5.7 Proposição Metodológica.....	82
6 CONCLUSÃO.....	85
REFERÊNCIAS	87
APÊNDICES	91

1 INTRODUÇÃO

As barragens desempenham papel fundamental no desenvolvimento socioeconômico, sendo amplamente utilizadas para acumulação de água, regularização de vazões, geração de energia, dentre outras funções. Apesar de sua importância estratégica, essas estruturas também representam potenciais fontes de risco, sobretudo quando associadas a eventos hidrológicos extremos. O rompimento de barragens pode ocasionar perdas de vidas humanas, danos ambientais severos e impactos socioeconômicos de grande magnitude, como evidenciado por desastres recentes ocorridos no Brasil.

Com o objetivo de estabelecer diretrizes para o monitoramento e a gestão da segurança dessas estruturas, foi instituída a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), que introduziu critérios para a classificação das barragens quanto ao volume, à categoria de risco (CRI) e ao Dano Potencial Associado (DPA). Essa classificação constitui ferramenta essencial para subsidiar ações de fiscalização, planejamento e resposta a emergências.

No entanto, os critérios atualmente vigentes foram concebidos, em sua maioria, considerando as barragens de forma isolada, não contemplando adequadamente situações em que múltiplas estruturas se encontram dispostas em cascata ao longo de um mesmo curso d'água. As barragens em cascata apresentam uma dinâmica de falha particular, uma vez que o rompimento de uma estrutura a montante pode desencadear falhas sucessivas nas barragens a jusante, ampliando significativamente os impactos da onda de cheia.

A utilização de modelos hidráulicos computacionais para a simulação de rompimentos hipotéticos de barragens tem se mostrado uma ferramenta relevante para a análise dos impactos à jusante. Segundo Oliveira *et al.* (2025), a utilização desses modelos permite avaliar de forma mais realista os impactos associados à propagação da onda de cheia, auxiliando na definição de medidas de mitigação e na tomada de decisão em situações de emergência.

A geração de mapas de profundidade, velocidade e risco hidrodinâmico permite uma avaliação mais detalhada da capacidade destrutiva da onda de cheia, contribuindo para a identificação de áreas vulneráveis, infraestruturas passíveis de serem atingidas e populações expostas. Esses produtos podem fornecer subsídios técnicos mais robustos para a classificação quanto ao DPA e para a elaboração de Planos de Ação de Emergência (PAE).

Nesse contexto, torna-se relevante investigar como a configuração dos conjuntos de barragens em cascata influencia a propagação da onda de cheia, especialmente em termos de parâmetros hidrodinâmicos. A avaliação desses parâmetros por meio de modelagem hidrodinâmica bidimensional e critérios de classificação baseados em vulnerabilidade, como os

propostos por Smith *et al.* (2014), permite avançar na compreensão dos impactos potenciais associados a esse tipo de sistema e subsidiar discussões sobre a necessidade de aperfeiçoamento dos critérios de classificação quanto ao DPA.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo propor uma abordagem de classificação quanto ao dano potencial associado para barragens em cascata, a partir da avaliação dos impactos gerados por simulações de rompimento hipotético. Para isso, são analisados diferentes conjuntos de barragens em cascata, considerando diversos cenários hidrológicos e utilizando o software HEC-RAS para a modelagem hidrodinâmica. Busca-se, assim, contribuir para o aprimoramento dos critérios de classificação atualmente adotados no Brasil, fornecendo subsídios técnicos que auxiliem a gestão da segurança de barragens e a mitigação de riscos associados a essas estruturas.

Como objetivos específicos, propõe-se: avaliar a influência da combinação do porte das estruturas na ruptura em cascata; analisar os resultados de profundidade máxima, velocidade máxima e risco hidrodinâmico máximo da mancha de inundação para cada cenário simulado; verificar a sensibilidade dos parâmetros hidrodinâmicos às vazões provenientes de precipitações extremas; e, por fim, elaborar uma proposta de classificação quanto ao dano potencial associado (DPA) para sistemas de barragens em cascata.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Barragens

Barragens são estruturas construídas para contenção de substâncias líquidas (ou mistura de líquidos e sólidos), cujo objetivo é a formação de um reservatório de acumulação. As barragens podem ser construídas dentro ou fora de um curso d'água e a sua estrutura típica é aquela construída transversalmente à linha do fluxo (ANA, 2025).

Segundo ANA (2025), a maioria das barragens no Brasil são destinadas à acumulação de água com objetivo principal de obter uma reserva hídrica para utilização durante os períodos de estiagem, apesar de também serem utilizadas para contenção de vazões, irrigação, dessedentação de animais, regularização de vazão e controle de cheias, abastecimento humano, aquicultura, geração de energia elétrica, dentre outros.

Essas estruturas podem ser construídas com diferentes materiais (Figura 1), como concreto, terra, terra/enrocamento e enrocamento, sendo as de terra as mais utilizadas no Brasil. Barragens dispostas sequencialmente ao longo de um mesmo curso d'água, cujas interações hidráulicas influenciam o comportamento do escoamento entre as estruturas, configuram um sistema de barragens em cascata.

Figura 1 – Tipos de barragem quanto ao material: (a) terra, (b) concreto e (c) enrocamento.



(a)

Fonte: ISTOÉ (2024).



(b)

Fonte: Iberdrola (2023).



(c)

Fonte: BRASIL (2023).

Os diferentes tipos de barragens apresentam comportamentos distintos frente a processos de ruptura, o que influencia diretamente a propagação da onda de cheia em sistemas em cascata. Segundo ANA (2016), barragens de terra e enrocamento, por exemplo, estão mais suscetíveis à formação progressiva de brechas por erosão, resultando em tempos de ruptura mais longos e hidrogramas de saída mais graduais. Por outro lado, barragens de concreto tendem a apresentar falhas mais abruptas, com liberação rápida de grandes volumes de água e geração de ondas de cheia mais intensas.

Essas diferenças no mecanismo de ruptura afetam parâmetros fundamentais, como o tempo de formação da brecha, a vazão de pico e a energia associada à onda de inundação (Froehlich, 2008; USACE, 2010; Wahl, 1998). Em sistemas de barragens em cascata, tais características são determinantes para a interação entre estruturas, podendo intensificar ou atenuar os efeitos da propagação da onda ao longo do vale (Zhang; Xu, 2014; Xu; Zhang, 2009).

3.2 Danos e desastres

Morgenstern *et al.* (2016), a partir da análise de um amplo conjunto de casos históricos de falhas em barragens, destacam que, embora essas estruturas sejam fundamentais para o desenvolvimento econômico e para a gestão de recursos hídricos, acidentes associados ao seu rompimento podem gerar consequências severas à sociedade e ao meio ambiente. Os autores atribuem essas falhas, principalmente, a deficiências relacionadas às etapas de planejamento, projeto, construção, operação e manutenção das barragens.

Em 2007, o rompimento de uma barragem de rejeitos no município de Mirai – MG provocou o lançamento de grande volume de lama no rio Muriaé, ocasionando impactos ambientais e prejuízos socioeconômicos em diversos municípios à jusante (IBAMA, 2007).

Em 2014, no município de Itabirito – MG, o rompimento de uma barragem de rejeitos resultou na morte de três trabalhadores e em danos ambientais significativos na área afetada (DNPM, 2014).

Em 2015, o rompimento da barragem do Fundão, em Mariana – MG, ocasionou 19 mortes e impactos ambientais e socioeconômicos de grande magnitude ao longo da bacia hidrográfica atingida, sendo caracterizado como o maior desastre ambiental brasileiro associado a barragens de mineração (Morgenstern *et al.*, 2016).

Posteriormente, em 2019, o rompimento da barragem de rejeitos em Brumadinho – MG resultou na morte de mais de 250 pessoas e em severos impactos ambientais e sociais no vale à jusante (Thompson *et al.*, 2020).

Em 2024, eventos hidrológicos extremos registrados no Rio Grande do Sul resultaram no rompimento parcial da barragem da Usina Hidrelétrica 14 de Julho, evidenciando a vulnerabilidade dessas estruturas frente a cenários de precipitações intensas (Waterpower Magazine, 2024).

Em 2026, ocorrências envolvendo o rompimento de um dique e o extravasamento de água e sedimentos em estruturas de contenção no complexo minerário de Congonhas – MG, foram registradas, gerando impactos ambientais em rios afluentes da bacia do Paraopeba

(Estado de Minas, 2026; Rondônia Dinâmica, 2026), evidenciando que falhas associadas a essas estruturas continuam a representar riscos relevantes, especialmente em contextos de eventos hidrológicos extremos.

Esses episódios recentes ressaltam a necessidade de aprimoramento contínuo dos mecanismos de fiscalização, monitoramento e avaliação integrada do risco, sobretudo em regiões com elevada concentração de barragens ao longo de um mesmo sistema hidrográfico.

3.3 Segurança de barragens no Brasil

Em 20 de setembro de 2010, foi instituída a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), por meio da Lei nº 12.334/2010, a qual também criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). De forma integrada, esses instrumentos constituem elementos essenciais para o monitoramento, a gestão e o aprimoramento da segurança de barragens no Brasil.

Em 30 de setembro de 2020, após ocorridos os desastres de Mariana e Brumadinho e a preocupação com a segurança envolvendo essas estruturas ter aumentado, a PNSB foi alterada pela Lei 14.066/2020, chegando à sua configuração atual.

A PNSB se aplica a barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais que apresentem pelo menos uma das seguintes características (Brasil, 2020): (I) altura do maciço, medida do encontro do pé do talude de jusante com o nível do solo até a crista de coroamento do barramento, maior ou igual a 15 (quinze) metros; (II) capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m³ (três milhões de metros cúbicos); (III) reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis; (IV) categoria de dano potencial associado médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas, conforme definido no artigo 7º; e (V) categoria de risco alto, a critério do órgão fiscalizador, conforme definido no artigo 7º.

De acordo com os dados do SNISB (2026), há 29.895 barragens cadastradas no sistema, das quais 6.745 são submetidas à PNSB, o que equivale a aproximadamente 22,5% das barragens cadastradas.

São objetivos da PNSB garantir a observância de padrões de segurança de barragens de maneira a fomentar a prevenção e a reduzir a possibilidade de acidente ou desastre e suas consequências; regulamentar as ações de segurança a serem adotadas nas fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento e primeiro vertimento, operação,

desativação, descaracterização e usos futuros de barragens; promover o monitoramento e o acompanhamento das ações de segurança empregadas pelos responsáveis por barragens; criar condições para que se amplie o universo de controle de barragens pelo poder público, com base na fiscalização, orientação e correção das ações de segurança; coligir informações que subsidiem o gerenciamento da segurança de barragens pelos governos; estabelecer conformidades de natureza técnica que permitam a avaliação da adequação aos parâmetros estabelecidos pelo poder público; fomentar a cultura de segurança de barragens e gestão de riscos; e definir procedimentos emergenciais e fomentar a atuação conjunta de empreendedores, fiscalizadores e órgãos de proteção e defesa civil em caso de incidente, acidente ou desastre (Brasil, 2020).

A PNSB tem como instrumentos o sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado, o Plano de Segurança de Barragens (PSB), incluindo o Plano de Ação Emergencial (PAE), o SNISB, o Sistema Nacional de Informações sobre o Meio Ambiente (Sinima), o Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental, o Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras ou Utilizadoras de Recursos Ambientais, o Relatório de Segurança de Barragens (RSB), o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), o monitoramento das barragens e dos recursos hídricos em sua área de influência e os guias de boas práticas em segurança de barragens.

É importante ressaltar que, além da PNSB, existem também as políticas estaduais de segurança de barragens e as normativas de órgãos como a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e a Agência Nacional de Mineração (ANM), que atuam de forma a efetivar a aplicação da PNSB no país.

3.4 Classificação de barragens

De acordo com o artigo 7º da PNSB (2010), as barragens devem ser classificadas pelos agentes fiscalizadores, por categoria de risco, por dano potencial associado e pelo seu volume, com base em critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). Ainda é importante citar que, de acordo com o artigo 8º da Resolução nº 143 do CNRH (2012), os órgãos fiscalizadores devem consultar os quadros dispostos nos Anexos I (para barragens para disposição de resíduos e rejeitos) e II (para barragens para acumulação de água) da mesma resolução para a classificação das barragens.

A classificação por categoria de risco, em alto, médio ou baixo, é feita em função das características técnicas, dos métodos construtivos, do estado de conservação e da idade do empreendimento e do atendimento ao PSB, além de outros critérios definidos pelo órgão fiscalizador da estrutura (Brasil, 2020); e segue os parâmetros dispostos nos Quadros 1, 2 e 3 para barragens de acumulação de água.

Quadro 1 – Parâmetros de classificação quanto à categoria de risco – Características técnicas.

Altura (a)	Comprimento (b)	Tipo de Barragem quanto ao material de construção (c)	Tipo de fundação (d)	Idade da Barragem (e)	Vazão de Projeto (f)
Altura ≤ 15m (0)	Comprimento ≤ 200m (2)	Concreto convencional (1)	Rocha sã (1)	entre 30 e 50 anos (1)	CMP (Cheia Máxima Provável) ou Decamilenar (3)
15m < Altura < 30m (1)	Comprimento > 200m (3)	Alvenaria de pedra / concreto ciclópico / concreto rolado - CCR (2)	Rocha alterada dura com tratamento (2)	entre 10 e 30 anos (2)	Milenar (5)
30m ≤ Altura ≤ 60m (2)	-	Terra homogênea /enrocamento / terra enrocamento (3)	Rocha alterada sem tratamento / rocha alterada fraturada com tratamento (3)	entre 5 e 10 anos (3)	TR = 500 anos (8)
Altura > 60m (3)	-	-	Rocha alterada mole / saprólito/ solo compacto (4)	< 5 anos ou > 50 anos ou sem informação (4)	TR < 500 anos ou desconhecida / Estudo não confiável (10)
-	-	-	Solo residual / aluvião (5)	-	-

Fonte: Conselho Nacional de Recursos Hídricos (2012).

Quadro 2 - Parâmetros de classificação quanto à categoria de risco – Estado de conservação.

(Continua)

Confiabilidade das Estruturas Extravasoras (g)	Confiabilidade das Estruturas de Adução (h)	Percolação (i)	Deformações e Recalques (j)	Deterioração dos Taludes / Paramentos (k)	Eclusa (*) (l)
Estruturas civis e hidro eletromecânicas em pleno funcionamento / canais de aproximação ou de restituição ou vertedouro (tipo soleira livre) desobstruídos (0)	Estruturas civis e dispositivos hidro eletromecânicos em condições adequadas de manutenção e funcionamento (0)	Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem (0)	Inexistente (0)	Inexistente (0)	Não possui eclusa (0)

Quadro 2 - Parâmetros de classificação quanto à categoria de risco – Estado de conservação.

(Conclusão)

Estruturas civis e hidro eletromecânicas preparadas para a operação, mas sem fontes de suprimento de energia de emergência / canais ou vertedouro (tipo soleira livre) com erosões ou obstruções, porém sem riscos a estrutura vertente. (4)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidro eletromecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e com medidas corretivas em implantação (4)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras estabilizadas e/ou monitoradas (3)	Existência de trincas e abatimentos de pequena extensão e impacto nulo (1)	Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de arbustos de pequena extensão e impacto nulo. (1)	Estruturas civis e hidro eletromecânicas bem mantidas e funcionando (1)
Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidro eletromecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e com medidas corretivas em implantação / canais ou vertedouro (tipo soleira livre) com erosões e/ou parcialmente obstruídos, com risco de comprometimento da estrutura vertente. (7)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidro eletromecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e sem medidas corretivas (6)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem tratamento ou em fase de diagnóstico (5)	Existência de trincas e abatimentos de impacto considerável gerando necessidade de estudos adicionais ou monitoramento (5)	Erosões superficiais, ferragem exposta, crescimento de vegetação generalizada, gerando necessidade de monitoramento ou atuação corretiva (5)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidro eletromecânicos com problemas identificados e com medidas corretivas em implantação (2)
Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidro eletromecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e sem medidas corretivas/ canais ou vertedouro (tipo soleira livre) obstruídos ou com estruturas danificadas (10)	-	Surgência nas áreas de jusante, taludes ou ombreiras com carregamento de material ou com vazão crescente (8)	Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos expressivos, com potencial de comprometimento da segurança (8)	Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança (7)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidro eletromecânicos com problemas identificados e sem medidas corretivas (4)

Fonte: Conselho Nacional de Recursos Hídricos (2012).

Quadro 3 - Parâmetros de classificação quanto à categoria de risco – Plano de segurança da barragem.

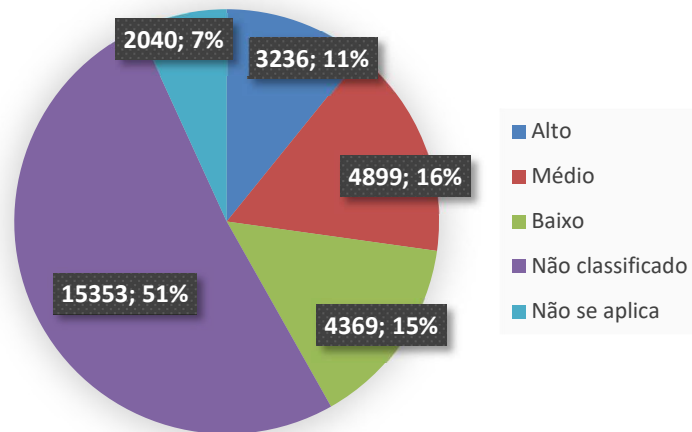
Existência de documentação de projeto (n)	Estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de Segurança da Barragem (o)	Procedimentos de roteiros de inspeções de segurança e de monitoramento (p)	Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem (q)	Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação (r)
Projeto executivo e "como construído" (0)	Possui estrutura organizacional com técnico responsável pela segurança da barragem (0)	Possui e aplica procedimentos de inspeção e monitoramento (0)	Sim ou Vertedouro tipo soleira livre (0)	Emite regularmente os relatórios (0)
Projeto executivo ou "como construído" (2)	Possui técnico responsável pela segurança da barragem (4)	Possui e aplica apenas procedimentos de inspeção (3)	Não (6)	Emite os relatórios sem periodicidade (3)
Projeto básico (4)	Não possui estrutura organizacional e responsável técnico pela segurança da barragem (8)	Possui e não aplica procedimentos de inspeção e monitoramento (5)	-	Não emite os relatórios (5)
Anteprojeto ou Projeto conceitual (6)	-	Não possui e não aplica procedimentos para monitoramento e inspeções (6)	-	-
Inexiste documentação de projeto (8)	-	-	-	-

Fonte: Conselho Nacional de Recursos Hídricos (2012).

A categoria de risco das barragens de acumulação de água é considerada alta, caso a soma dos pontos referentes aos parâmetros listados de “a” até “r” for maior ou igual a 60, ou caso a soma dos pontos de “g” até “l”, for maior ou igual a 8; categoria de risco média, caso a soma dos pontos, de “a” até “r”, estiver entre 35 e 60; ou categoria de risco baixa, caso a soma dos pontos, de “a” até “r”, for menor ou igual a 35.

Atualmente, a classificação quanto à categoria de risco (CRI) para todas as barragens cadastradas no SNISB encontra-se conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Classificação quanto à categoria de risco – CRI.



Fonte: Adaptado de SNISB (2026).

A classificação por categoria de dano potencial associado à barragem, em alto, médio ou baixo, é feita em função do potencial de perdas de vidas humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura da barragem (Brasil, 2020).

O Quadro 4, apresenta os critérios de classificação quanto ao dano potencial associado para barragens de acumulação de água.

Quadro 4 - Parâmetros de classificação quanto ao dano potencial associado.

(Continua)

Volume Total do Reservatório (a)	Potencial de perdas de vidas humanas (b)	Impacto ambiental (c)	Impacto sócio econômico (d)
Pequeno <= 5 milhões m ³ (1)	INEXISTENTE (não existem pessoas permanentes/residentes ou temporárias/transitando na área afetada a jusante da barragem) (0)	SIGNIFICATIVO (área afetada da barragem não representa área de interesse ambiental, áreas protegidas em legislação específica ou encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais) (3)	INEXISTENTE (não existem quaisquer instalações e serviços de navegação na área afetada por acidente da barragem) (0)
Médio 5 milhões a 75 milhões m ³ (2)	POUCO FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local) (4)	MUITO SIGNIFICATIVO (área afetada da barragem apresenta interesse ambiental relevante ou protegida em legislação específica) (5)	BAIXO (existe pequena concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura na área afetada da barragem ou instalações portuárias ou serviços de navegação) (4)

Quadro 4 - Parâmetros de classificação quanto ao dano potencial associado.

(Conclusão)

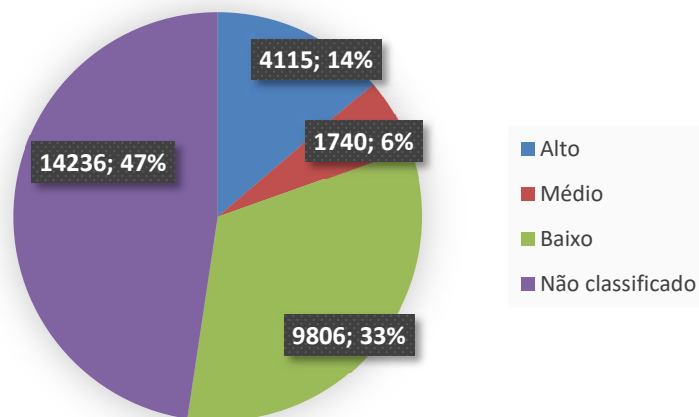
<p>Grande 75 milhões a 200 milhões m³ (3)</p>	<p>FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal, estadual, federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas) (8)</p>	<p>-</p>	<p>ALTO (existe grande concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais, de infraestrutura e serviços de lazer e turismo na área afetada da barragem ou instalações portuárias ou serviços de navegação) (8)</p>
<p>Muito Grande > 200 milhões m³ (5)</p>	<p>EXISTENTE (existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas) (12)</p>	<p>-</p>	<p>-</p>

Fonte: Conselho Nacional de Recursos Hídricos (2012).

O dano potencial associado à barragem de acumulação de água é considerado alto se a soma dos pontos foi maior ou igual a 16, médio se a soma dos pontos estiver entre 10 e 16, e baixo se a soma dos pontos for menor ou igual à 10.

Atualmente, a classificação quanto ao dano potencial associado para todas as barragens cadastradas no SNISB encontra-se conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Classificação quanto ao dano potencial associado (DPA).



Fonte: Adaptado de SNISB (2026).

Na Resolução nº 143 do CNRH (2012), a classificação quanto ao volume das barragens também se difere quanto à finalidade das estruturas, sendo as barragens para disposição de

rejeito mineral e/ou resíduo industrial classificadas em muito pequenas (menor ou igual a 500.000 m³), pequenas (entre 500.000 m³ e 5.000.000 m³), médias (entre 5.000.000 m³ e 25.000.000 m³), grandes (entre 25.000.000 m³ e 50.000.000 m³) e muito grandes (superior a 50.000.000 m³). As barragens para acumulação de água são classificadas quanto ao volume em pequenas (menor que 5.000.000 m³), médias (entre 5.000.000 m³ e 75.000.000 m³), grandes (entre 75.000.000 m³ e 200.000.000 m³) e muito grandes (maior que 200.000.000 m³).

É importante citar que esses critérios de classificação se aplicam às barragens de forma isolada, sem levar em consideração as barragens em cascata. Estudos como o de Nonato *et al.* (2015) e Pereira *et al.* (2021) ainda chamam a atenção para a classificação de barragens de porte reduzido, trazendo novas propostas de reclassificação. Nonato *et al.* (2015) propõem a adição de parâmetros relacionados à altura do barramento para micro e mini barragens, à existência ou não de projetos e à alteração da pontuação existente na classificação quanto ao DPA do CNRH (2012); enquanto Pereira *et al.* (2021) sugerem verificação *in loco* da área potencialmente afetada, além da realização de estudos de viabilidade de classificação das barragens baseada no risco de ruptura informado, a qual analisa a probabilidade de ruptura e suas consequências.

Também se observa através dos parâmetros de classificação do CNRH (2012) que, no processo de classificação quanto ao DPA das barragens, os parâmetros hidrodinâmicos da onda de cheia decorrente de um eventual rompimento não são incorporados de forma sistemática e padronizada. Embora a elaboração de estudos de ruptura hipotética seja uma premissa para o PAE, seus produtos nem sempre são utilizados como subsídio direto para a classificação do DPA, sendo observado na norma apenas a área potencialmente afetada, mas não os impactos sobre a mesma. Nesse sentido, Oliveira *et al.* (2025) destacam que os processos de classificação quanto ao DPA e de elaboração do PAE podem ser aprimorados por meio da produção e da utilização de mapas de inundação mais detalhados e precisos, capazes de representar de forma mais adequada os impactos do rompimento de barragens sobre a população e as infraestruturas situadas à jusante.

3.5 Risco hidrodinâmico

O risco hidrodinâmico é um parâmetro hidráulico que pode ser associado à capacidade destrutiva do escoamento (Junior *et al.*, 2024), sendo calculado pelo produto da velocidade (V) e da profundidade (H) da onda de cheia em um determinado local. Alguns softwares de modelagem hidráulica computacional, como HEC-RAS, DAMBRK e MIKE, podem gerar como produto o mapa do risco hidrodinâmico associado à onda de cheia da simulação.

Segundo Oliveira *et al.* (2025), é possível realizar avaliações de risco e de dano potencial associados ao rompimento hipotético de barragens de qualquer finalidade e porte por meio das metodologias USBR Hazard Analysis (USBR, 1988) e ARR Hazard Analysis (Smith *et al.* 2014), que se utilizam de faixas de vulnerabilidade para estimar risco a pessoas, infraestruturas e veículos. O autor destaca ainda que ambos os métodos são utilizados e reconhecidos internacionalmente.

A metodologia de avaliação de risco proposta por USBR (1988) baseia-se em três zonas de risco: baixo, de julgamento profissional e alto. Essas zonas de risco são pautadas em valores de velocidade e profundidade da onda de cheia, e variam para adultos, crianças, veículos e habitações.

Já a metodologia proposta por Smith *et al.* (2014), apresentada no Quadro 5, é baseada nas curvas de vulnerabilidade, que dividem o risco em seis zonas, combinadas para pessoas, veículos e habitações.

Trabalhos como os de Vorogushyn *et al.* (2010) e Fell *et al.* (2015) demonstram que, em sistemas com múltiplas barragens dispostas em cascata, pequenas variações nos parâmetros hidrodinâmicos da onda de cheia — tais como cotas máximas atingidas, velocidades de escoamento e tempos de propagação — podem resultar em diferenças significativas nos impactos observados à jusante. Esses estudos evidenciam que abordagens excessivamente simplificadas tendem a ser inadequadas para representar a complexidade dos processos envolvidos em falhas encadeadas de barragens.

Estudos recentes como os de Alves Junior *et al.* (2023), Carvalho *et al.* (2024), Turkel *et al.* (2024) utilizam a metodologia de Smith *et al.* (2014) para avaliar os danos decorrentes da ruptura de barragens, uma vez que ela permite uma avaliação mais sensível e espacialmente detalhada do risco hidrodinâmico, sendo particularmente adequada para estudos envolvendo barragens de pequeno porte dispostas em cascata.

Quadro 5 – Zonas de risco.

Zona de Risco	Descrição	Limite do Risco Hidrodinâmico (m ² /s)	Limite da Profundidade (m)	Limite da Velocidade (m/s)
H1	Geralmente seguro para veículos, pessoas e edifícios.	0,3	0,3	2,0
H2	Inseguro para veículos pequenos.	0,6	0,5	2,0
H3	Inseguro para veículos, crianças e idosos.	0,6	1,2	2,0
H4	Inseguro para veículos e pessoas.	1,0	2,0	2,0
H5	Inseguro para veículos e pessoas. Todos os edifícios vulneráveis a danos estruturais. Alguns edifícios menos robustos sujeitos a falhas.	4,0	4,0	4,0
H6	Inseguro para veículos e pessoas. Todos os tipos de edifícios considerados vulneráveis a falhas.	> 4,0	-	-

Fonte: Adaptado de Smith *et al.* (2014).

3.6 Estudo de ruptura de barragens

Os estudos de ruptura de barragens constituem instrumentos fundamentais para a avaliação dos riscos associados a essas estruturas, permitindo a estimativa de perdas de vidas humanas, bem como de danos econômicos, sociais e ambientais decorrentes de um eventual rompimento (Rossi *et al.*, 2021). No contexto brasileiro, a PNSB estabelece que as barragens enquadradas com dano potencial associado médio ou alto devem dispor de PAE, o qual tem como um de seus elementos centrais a análise de cenários de ruptura hipotética e a delimitação das áreas potencialmente afetadas a jusante.

Nesse sentido, a PNSB define o estudo de ruptura como ferramenta essencial para subsidiar ações de prevenção, mitigação e resposta a emergências, fornecendo informações técnicas que apoiam tanto os órgãos fiscalizadores quanto os empreendedores na gestão da segurança das barragens. A realização desses estudos possibilita a identificação das áreas de inundação, a estimativa de tempos de chegada da onda de cheia e a avaliação preliminar dos impactos à população e às infraestruturas situadas a jusante, elementos indispensáveis para o planejamento de ações emergenciais.

A comunidade científica tem destacado o papel dos modelos hidráulicos computacionais como ferramentas consolidadas para a realização de estudos de ruptura de barragens. De acordo com Oliveira *et al.* (2025), a utilização de modelos de simulação hidrodinâmica permite avaliar, de forma mais realista, os impactos associados à propagação da onda de cheia, auxiliando na definição de medidas de mitigação e na tomada de decisão em situações de emergência. De forma complementar, Silva *et al.* (2023) ressaltam que modelos hidráulicos computacionais avançados possibilitam a simulação do comportamento das barragens sob diferentes cenários de ruptura, contribuindo para uma análise detalhada dos riscos e para a identificação de pontos críticos ao longo do vale à jusante.

Para a realização dos estudos de ruptura, são necessárias informações relativas às características da barragem e do reservatório, como altura e comprimento do barramento, volume do reservatório, entre outros; aos parâmetros da brecha de ruptura, como largura média e tempo de formação, à topografia do vale à jusante e às condições hidráulicas do escoamento, entre outros aspectos relevantes (Rossi, 2020). Além disso, também é importante prever o cenário de simulação, se este considerará alguma vazão afluente, advinda de precipitação, ou ruptura em dia de sol (sem vazão). A partir desses dados, torna-se possível estimar parâmetros hidrodinâmicos específicos, como as cotas máximas atingidas, as velocidades do escoamento e os tempos de propagação da onda de cheia, os quais subsidiam tanto a elaboração do PAE quanto análises mais detalhadas de risco e de dano potencial associado.

Estudos indicam que a avaliação do risco hidrodinâmico em sistemas de barragens em cascata deve considerar a interação entre as estruturas, uma vez que a propagação da onda de cheia pode resultar em efeitos de amplificação ou atenuação dos impactos à jusante, a depender das características hidráulicas e geométricas do sistema (Vorogushyn *et al.*, 2010; Fell *et al.*, 2015). Apesar do reconhecimento da importância dos estudos de ruptura hipotética, ainda se observa a ausência de diretrizes normativas consolidadas que orientem a incorporação sistemática do risco hidrodinâmico na classificação do dano potencial associado, especialmente no caso de barragens de pequeno porte dispostas em cascata.

3.7 Avaliação de impacto e classificação para barragens em cascata

Embora a PNSB não apresente uma definição específica para barragens em cascata, seus princípios estão fundamentados na prevenção de acidentes e na mitigação de danos potenciais associados às barragens, com ênfase nos impactos à jusante decorrentes de uma eventual ruptura. Nesse contexto, a literatura técnica define barragens em cascata como sistemas

compostos por duas ou mais barragens dispostas sequencialmente ao longo de um mesmo curso d'água, cujas interações hidráulicas fazem com que o escoamento ou a onda de cheia gerada pelo rompimento de uma estrutura a montante influencie diretamente o comportamento hidrodinâmico e os impactos associados às estruturas situadas à jusante (Vorogushyn *et al.*, 2010; Fell *et al.*, 2015).

Campos (2020) afirma que poucos trabalhos estão disponíveis para avaliação de ruptura de barragens dispostas em cascata. O mesmo autor desenvolveu em seu trabalho propostas de metodologias para definição de parâmetros de formação de brechas de ruptura em cascata, mas sem avaliar os impactos decorrentes da ruptura ou a classificação do conjunto de barragens.

Oliveira e Neto (2022) comparam as manchas de inundação geradas pela metodologia simplificada MS-20S, que é baseada em equações empíricas que permitem estimar a vazão de pico gerada em função da altura da barragem, do volume do reservatório ou da combinação de ambos e utiliza imagens satélite dos vales a jusante para definir os mapas de inundação, e pela simulação computacional no HEC RAS, mas não as avaliam no que se refere aos riscos e danos gerados.

Carvalho *et al.* (2024) simulam a ruptura hipotética de duas barragens em cascata e avaliam os impactos da onda de cheia em relação ao risco hidrodinâmico segundo os critérios de Viseu (1998) e Smith *et al.* (2014), mas não tratam da classificação do conjunto de barragens diante dos impactos avaliados.

Pereira *et al.* (2024) simulam o rompimento de quatro barragens em cascata que possuem alto risco e alto dano potencial associado, avaliando os níveis de perigo pelos critérios de Ribeiro *et al.* (2016) a partir da análise dos valores de velocidade, profundidade e intensidade da onda de cheia obtidos das manchas de inundação. No entanto, os autores não discutem a classificação do conjunto de barragens em cascata, apenas apresentam a classificação individual de cada barramento.

Lima *et al.* (2022) comparam a classificação simplificada desenvolvida pelo Laboratório de Engenharia Civil de Portugal (LNEC) para barragens em cascata com a classificação brasileira vigente e chamam a atenção para a classificação quanto ao dano potencial associado das pequenas barragens, especialmente quando estão em cascata. Os autores afirmam que as barragens de pequeno porte precisam de critérios específicos de classificação e atenção especial ao serem comparadas às grandes barragens, pois a legislação atual pode tornar inviáveis as atividades econômicas para pequenos proprietários, já que geralmente estas não são construídas com fins lucrativos e/ou não geram grandes rendimentos para o proprietário.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Conjuntos de estudo

Para este estudo, foram selecionados nove conjuntos de barragens de terra destinadas ao armazenamento de água, dispostas em cascata ao longo de um mesmo curso d'água. A definição desses conjuntos teve como critério principal a combinação dos volumes dos reservatórios das barragens a montante e a jusante, com o objetivo de representar diferentes cenários de interação hidráulica e hidrodinâmica entre estruturas em cascata.

A adoção de combinações distintas de porte entre as barragens permite avaliar situações em que a onda de cheia gerada pelo rompimento de uma barragem a montante pode ser amplificada, atenuada ou modificada pela presença da barragem de jusante, em função da relação entre os volumes armazenados, da capacidade de amortecimento do reservatório subsequente e das características do vale.

Dessa forma, os conjuntos foram organizados conforme o Quadro 6, de tal modo que possam representar espacialmente diferentes magnitudes de manchas de ruptura, tornando a análise mais abrangente e representativa.

Quadro 6 – Conjuntos de barragens de estudo.

Conjunto	Volume da barragem de montante	Volume da barragem de jusante
C1	até 5.000.000 m ³	até 5.000.000 m ³
C2	até 5.000.000 m ³	5.000.000 m ³ até 75.000.000 m ³ .
C3	até 5.000.000 m ³	superior a 75.000.000 m ³
C4	5.000.000 m ³ até 75.000.000 m ³ .	até 5.000.000 m ³
C5	5.000.000 m ³ até 75.000.000 m ³ .	5.000.000 m ³ até 75.000.000 m ³ .
C6	5.000.000 m ³ até 75.000.000 m ³ .	superior a 75.000.000 m ³
C7	superior a 75.000.000 m ³	até 5.000.000 m ³
C8	superior a 75.000.000 m ³	5.000.000 m ³ até 75.000.000 m ³ .
C9	superior a 75.000.000 m ³	superior a 75.000.000 m ³

Fonte: Elaboração própria.

Os conjuntos foram selecionados com o auxílio do Mapa Interativo do SNISB, no qual é possível observar o posicionamento das barragens dentro do território brasileiro, além de obter dados como volume, tipo de material do barramento e uso principal, classificação quanto ao DPA e CRI, enquadramento na PNSB, entre outras informações.

Com o auxílio do Google Earth também foi medida, para cada conjunto, a inclinação do vale à jusante da segunda barragem, numa extensão de 10 km.

Os dados técnicos pertinentes ao estudo para cada barragem, como altura (h), comprimento da crista (L), inclinação do vale à jusante (i), dentre outros, estão presentes no Apêndice A.

4.2 Base topográfica

A base topográfica utilizada em todo o estudo, desde a delimitação de áreas até a simulação propriamente dita, foi o Modelo Digital de Elevação (MDE) ALOS PALSAR disponibilizado pela Alaska Satellite Facility (ASF), o qual possui resolução de 12,5 metros.

Outras fontes de dados altimétricos, como o *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) e levantamentos com *Light Detection and Ranging* (LiDAR), também são amplamente utilizadas na literatura. O SRTM apresenta cobertura global e fácil acesso, porém possui resolução espacial mais grosseira e limitações na representação de áreas planas e canais estreitos. Por outro lado, dados obtidos com LiDAR oferecem alta resolução e elevada precisão altimétrica, sendo mais adequados para estudos detalhados, especialmente em áreas urbanas ou com relevo complexo. No entanto, sua disponibilidade ainda é restrita a determinadas regiões, além de envolver custos mais elevados de aquisição e processamento.

Nesse contexto, o ALOS PALSAR representa uma alternativa intermediária, combinando maior resolução espacial em relação ao SRTM com ampla disponibilidade, o que o torna adequado para estudos que demandam equilíbrio entre precisão e viabilidade operacional. Sua resolução espacial de 12,5 m, apresenta nível de detalhamento adequado para a representação do relevo em escala regional, permitindo a simulação consistente da propagação de cheias. No entanto, limitações associadas à resolução espacial podem resultar em suavização de feições topográficas de pequena escala, influenciando a delimitação das áreas inundadas, a estimativa das profundidades e a representação do escoamento em canais de menor porte. Dessa forma, os resultados devem ser interpretados considerando essas limitações inerentes ao dado topográfico.

Além disso, é importante ressaltar que o MDE de cada conjunto foi tratado, com o auxílio do *software* ArcGIS, versão 10.5, através da ferramenta *Fill*, que preenche pequenas depressões.

4.3 Cálculo das chuvas de projeto

Para o cálculo da intensidade das chuvas de projeto utilizou-se a equação de chuvas intensas, ou equações IDF (Equação 1).

$$I = \frac{K \cdot T^a}{(t + b)^c} \quad (1)$$

Em que K , a , b e c são parâmetros específicos de cada bacia, os quais foram obtidos com o auxílio do software Plúvio 2.1, produzido pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos (GPRH) da Universidade Federal de Viçosa; e T é o tempo de retorno associado à precipitação.

O tempo de duração da chuva (t) considerado para cada bacia foi adotado como igual ao tempo de concentração (t_c) da respectiva bacia. Ressalta-se que essa escolha foi definida como uma premissa do estudo. O tempo de concentração foi estimado segundo a equação de Ven Te Chow (Equação 2).

$$t_c = 52,64 \left(\frac{L}{\sqrt{S_0}} \right)^{0,64} \quad (2)$$

Em que L é o comprimento do talvegue principal da área de contribuição da bacia (km) e S_0 é a declividade do talvegue (m/km).

A delimitação da área de contribuição da bacia hidrográfica de cada conjunto de barragens foi feita com o auxílio da ferramenta Watershed, do software ArcGIS, versão 10.5. Posteriormente, a delimitação do comprimento do talvegue principal também foi realizada no mesmo software, com o auxílio da ferramenta Flow Length.

A declividade do talvegue foi calculada subtraindo-se as altitudes dos pontos iniciais e finais de cada talvegue, e dividindo essa diferença pelo comprimento do mesmo. As altitudes foram obtidas por meio do MDE utilizado.

Uma vez obtidos todos os dados para os nove conjuntos de barragens, calculou-se a intensidade das precipitações para os tempos de retorno de 500, 1000 e 10000 anos. A adoção de diferentes tempos de retorno teve como objetivo representar cenários hidrológicos progressivamente mais severos, permitindo avaliar a sensibilidade dos resultados hidrodinâmicos à magnitude dos eventos extremos, principalmente diante do cenário mais crítico exigido pela PNSB, com a vazão decamilenar.

Os valores utilizados de K , a , b e c , bem como os valores mensurados de área, comprimento do talvegue e declividade, além dos resultados de tempo de duração e precipitação calculados estão apresentados no Apêndice B.

4.4 Cálculo dos hidrogramas

Para o cálculo dos hidrogramas, inicialmente foi necessário converter as intensidades de precipitação (I) em lâmina precipitada (P) ao longo do tempo, a partir da duração de cada evento. Essa conversão foi feita multiplicando-se a intensidade da precipitação pelo tempo de duração da chuva (Equação 3).

$$P = I \cdot t \quad (3)$$

Em seguida, essas precipitações foram distribuídas temporalmente segundo o Método de Huff (1967), gerando três hietogramas para cada conjunto de barragens, considerando os diferentes tempos de retorno. Para os conjuntos 1, 2, 3, 5 e 7, foi utilizado o 1º quartil do Método de Huff (1967), recomendado para chuvas com duração de até 6 horas. Para o conjunto 4, que apresenta um tempo de duração da chuva entre 6 e 12 horas, foi utilizado o 2º quartil. Para o conjunto 8, que apresenta um tempo de duração da chuva entre 12 e 24 horas, foi utilizado o 3º quartil. Por fim, para os conjuntos 6 e 9, que apresentaram precipitação com duração superior a 24 horas, foi utilizado o 4º quartil. Os quartis do Método de Huff (1967) estão apresentados na Figura 4.

Os hietogramas de cada conjunto estão presentes no Apêndice C.

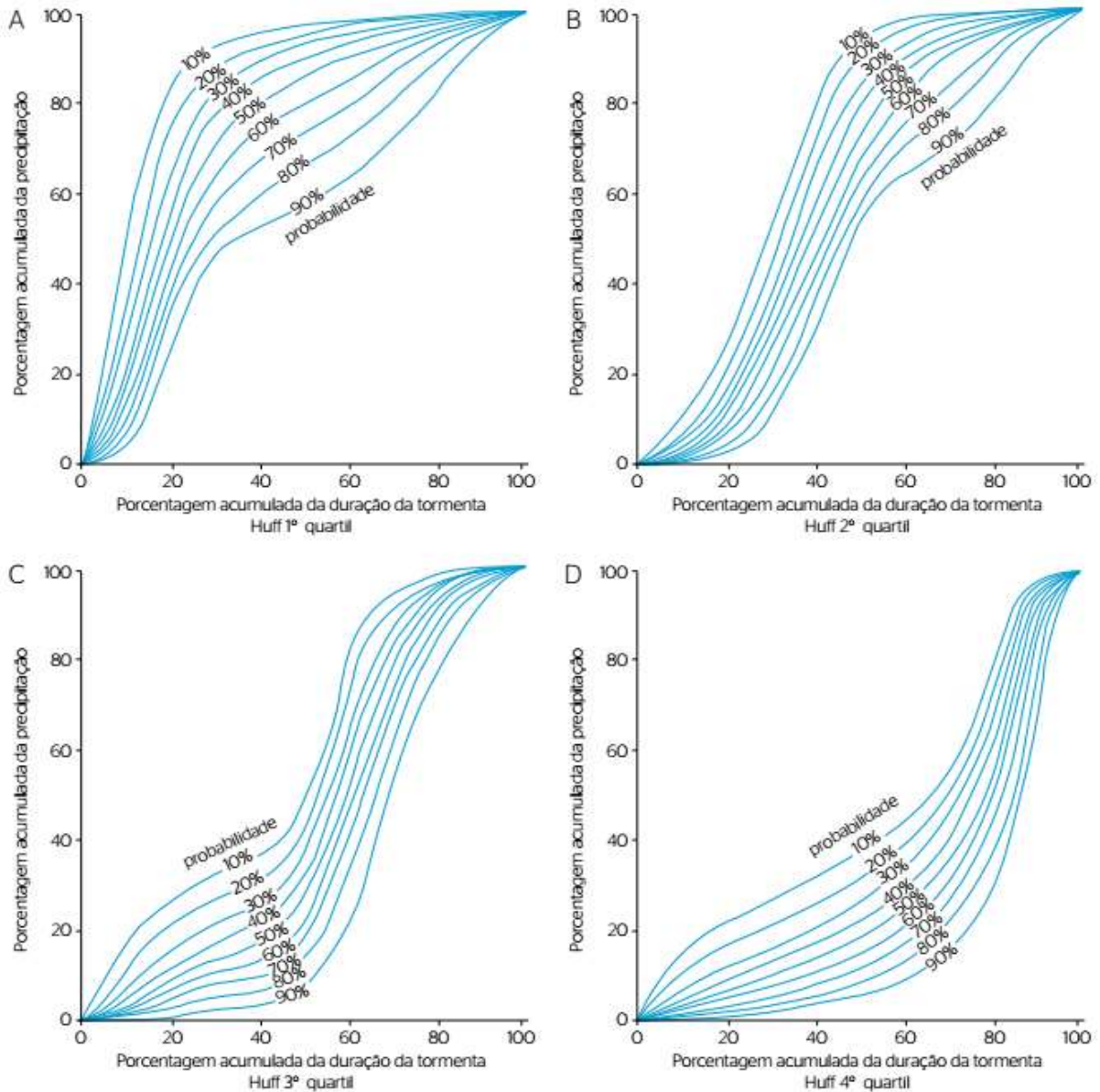
Posteriormente, os hietogramas foram utilizados como dados de entrada em um modelo de transformação chuva-vazão no software HEC-HMS, no qual a transformação da precipitação em escoamento foi realizada com base no método do *Soil Conservation Service* (SCS), também conhecido como método do *Curve Number* (CN), no qual o escoamento superficial é estimado a partir da precipitação efetiva, considerando perdas iniciais e capacidade de retenção do solo. O excesso de chuva gerado é então convertido em vazão por meio do hidrograma unitário do SCS, resultando na obtenção dos hidrogramas de saída para cada conjunto.

No método CN, inicialmente, a precipitação total acumulada (P) é convertida em precipitação efetiva (Q), correspondente à parcela da chuva que contribui para o escoamento superficial (Equação 4).

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (4)$$

Onde Q é o escoamento superficial direto, P é a precipitação acumulada, I_a é a abstração inicial, e S é a capacidade máxima de retenção do solo, todos em mm. A Equação 4 é válida para $P > I_a$, caso $P \leq I_a$, considera-se $Q = 0$.

Figura 4 – Quartis do método Huff (1967).



Fonte: Huff (1967).

A capacidade de retenção do solo (S) é determinada a partir do Curve Number (CN) (Equação 5).

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (5)$$

O parâmetro CN varia entre 0 e 100 e representa as condições de uso e ocupação do solo, tipo hidrológico do solo e umidade antecedente. Valores elevados de CN indicam maior propensão ao escoamento superficial, enquanto valores baixos indicam maior infiltração. Os valores CN de cada conjunto foram obtidos a partir da base de dados GCN250 (Jaafar e Ahmad, 2019).

A abstração inicial (I_a) corresponde às perdas iniciais antes do início do escoamento superficial, incluindo interceptação, infiltração inicial e armazenamento em depressões (Equação 6).

$$I_a = 0,2.S \quad (6)$$

A partir da determinação da precipitação efetiva ao longo do tempo, procede-se à transformação em vazão por meio do hidrograma unitário do SCS. Esse procedimento considera a resposta da bacia hidrográfica ao excesso de chuva, sendo o hidrograma caracterizado por parâmetros como o tempo de concentração (t_c) e tempo ao pico (t_p) (Equação 7).

$$t_p = t_{lag} + \frac{D}{2} \quad (7)$$

Onde t_{lag} é o tempo de retardo da bacia, que corresponde a aproximadamente 60% do tempo de duração da chuva, e D é a duração do excesso de precipitação, ambos em horas.

O hidrograma de escoamento direto é obtido a partir da convolução da precipitação efetiva com o hidrograma unitário do SCS, resultando em uma função vazão-tempo ($Q(t)$) que representa a resposta hidrológica da bacia.

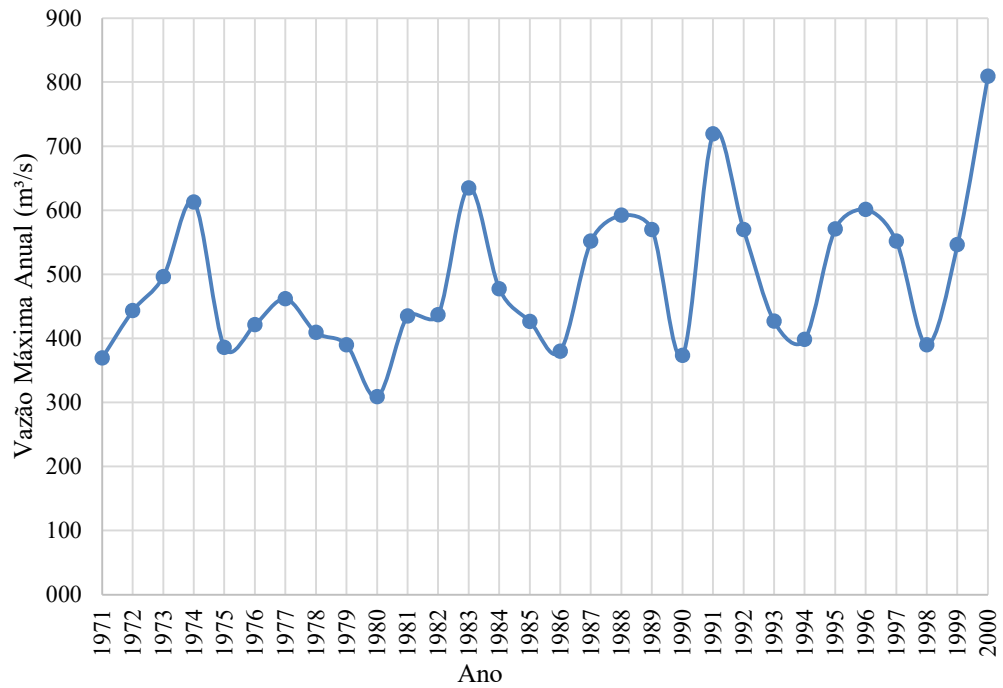
Foram fornecidos ao HEC-HMS os hietogramas, os valores CN, a área de contribuição de cada bacia, bem como o seu tempo de retardo. Os valores CN e o tempo de retardo de cada conjunto estão apresentados no Apêndice D.

O método CN-SCS é amplamente utilizado devido à sua simplicidade e baixa exigência de dados. No entanto, trata-se de uma abordagem empírica, originalmente desenvolvida para pequenas bacias rurais, podendo apresentar limitações na representação de processos hidrológicos complexos, especialmente em eventos extremos ou em bacias de maior escala.

Através da geração dos hidrogramas, verificou-se que o método utilizado não é o mais adequado para bacias de contribuição com área superior a 500 km², uma vez que valores de área demasiadamente altos tendem a superestimar os valores de vazão. Portanto, para os conjuntos 6, 8 e 9 foi necessário corrigir os hidrogramas a partir dos dados das séries históricas fluviométricas da bacia de contribuição.

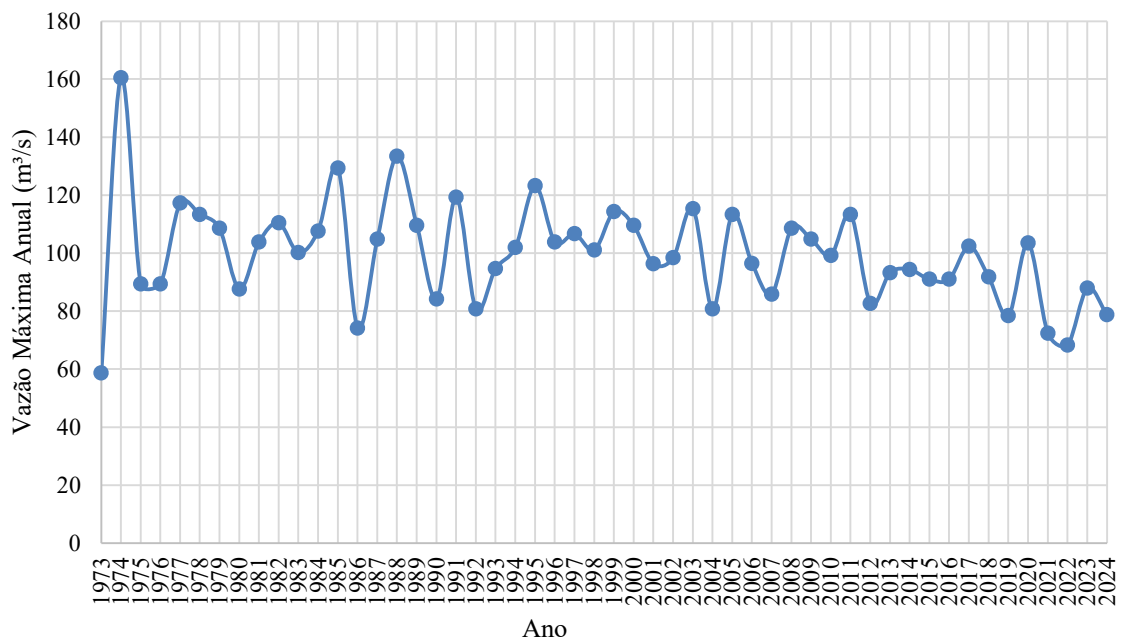
Para realizar a correção dos hidrogramas, foi necessário primeiramente a obtenção de pelo menos 30 anos de dados de vazão máxima anual (Figuras 5, 6 e 7) dos corpos hídricos que formam o reservatório de montante dos conjuntos supracitados. Esses dados foram obtidos da base de dados HidroWeb da ANA.

Figura 5 – Vazões máximas anuais – Conjunto 6.



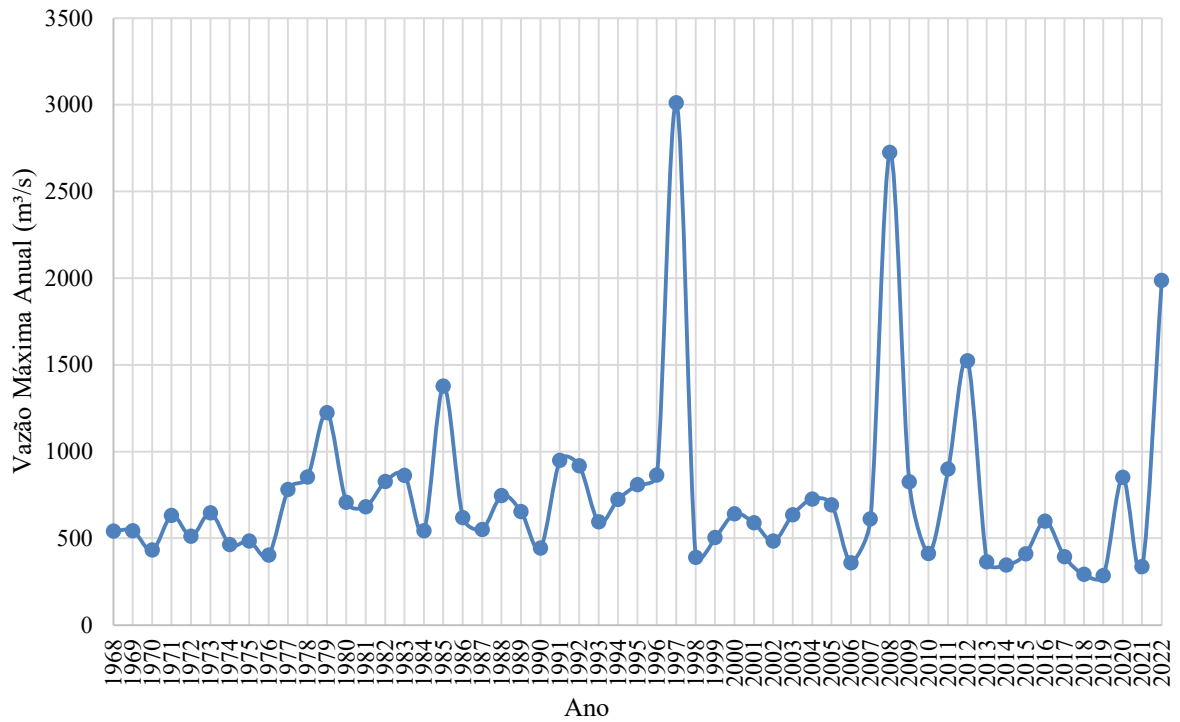
Fonte: Elaboração própria.

Figura 6 - Vazões máximas anuais – Conjunto 8.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 7 - Vazões máximas anuais – Conjunto 9.



Fonte: Elaboração própria.

Posteriormente, foi utilizada a Distribuição de Gumbel para máximos para estimar a vazão máxima, ou vazão de pico, para cada tempo de retorno, a partir dos dados das séries históricas. Esse método apresenta dois parâmetros, α (Equação 8) e μ (Equação 9).

$$\alpha = \frac{1,2826}{S} \tag{8}$$

$$\mu = \bar{X} - 0,45.S \tag{9}$$

Onde \bar{X} é a média e S é o desvio padrão da série histórica.

Quadro 7 – Parâmetros da distribuição de Gumbel.

Grandezas	C6	C8	C9
Média	491,997	99,764	750,552
S	115,024	17,655	517,542
α	0,011	0,073	0,002
μ	440,236	91,819	517,658

Fonte: Elaboração própria.

Para estimar a vazão máxima (Q) em função do tempo de retorno (TR), utiliza-se a Equação 10.

$$Q_{TR} = \frac{-\ln\left(-\ln\left(1 - \left(\frac{1}{TR}\right)\right)\right)}{\alpha} + \mu \tag{10}$$

Quadro 8 – Vazões máximas de Gumbel e fator de correção.

	C6			C8			C9		
TR	500	1000	10000	500	1000	10000	500	1000	10000
Q _{máx} (m ³ /s)	997,47	1059,68	1266,22	177,35	186,90	218,60	3024,91	3304,81	4234,11
fc	0,0005	0,0005	0,0004	0,0002	0,0002	0,0001	0,0017	0,0017	0,0015

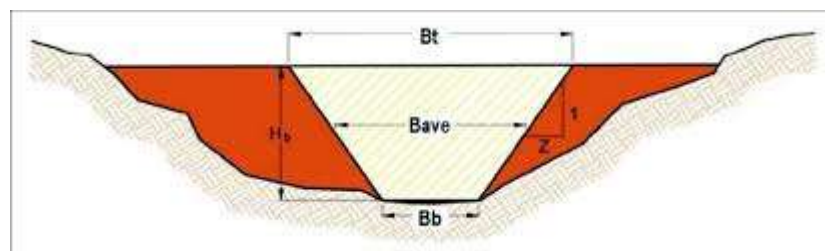
Fonte: Elaboração própria.

Uma vez obtidas as vazões máximas pelo Método de Gumbel, foi possível calcular o fator de correção, sendo este o quociente entre a vazão máxima de Gumbel e a vazão máxima obtida pelo método CN. O hidrograma corrigido foi calculado multiplicando-se todas as vazões obtidas pelo método CN pelo fator de correção.

4.5 Parâmetros das brechas

Os principais parâmetros de formação da brecha de ruptura de uma barragem de terra são o tempo de formação (t_f), a largura média (B_{ave}), a altura (H_b) e a inclinação (z) (Figura 8).

Figura 8 – Parâmetros da brecha.



Fonte: Neto (2016).

O tempo de formação (t_f) de cada brecha foi calculado a partir da equação de Froelich (2008) (Equação 11).

$$t_f = 63,2 \sqrt{\frac{V_w}{gH_b^2}} \quad (11)$$

Em que V_w é o volume de água contido no reservatório no momento da ruptura (m³), H_b é a altura da barragem (m) e g é a aceleração da gravidade (m/s²).

Para calcular a largura média de cada brecha também foi utilizado o modelo de Froelich (2008) (Equação 12).

$$B_{ave} = 0,27k_0V_w^{0,32}H_b^{0,04} \quad (12)$$

Em que k_0 é uma constante e vale 1,3 para falhas por galgamento e 1,0 para piping ou outros tipos de falha, V_w é o volume de água contido no reservatório no momento da ruptura (m³) e H_b é a altura da barragem (m).

A altura considerada em cada brecha foi a altura da própria barragem. Já o fator de inclinação (z) seguiu o proposto por Froelich (2008), que é de 1,0 para ruptura por galgamento e 0,7 para piping ou outros tipos de falha.

Assim, considerando cada cenário, foi possível desenhar a brecha de cada barragem e medir a largura da base (B_b) para cada uma, que é um dado necessário à simulação.

4.6 Estudo de convergência de malha

O escoamento hidrodinâmico foi simulado no software HEC-RAS, versão 6.6, por meio da resolução das equações completas de Saint-Venant, utilizando o método dos volumes finitos, em regime não permanente, o que permite a adequada representação da propagação da onda de cheia decorrente do rompimento hipotético de barragens. Portanto, para o bom êxito das simulações, fez-se necessário estudar a melhor malha de volumes finitos a ser utilizada, uma vez que esta influencia diretamente os resultados.

O estudo de convergência de malha foi realizado de modo a determinar o melhor tamanho de malha de volumes finitos para cada simulação, visando fatores importantes como custo computacional e precisão da mancha de inundação gerada.

Para cada grupo de barragens estudado foram feitas cinco simulações, todas com o mesmo cenário: sem precipitação, considerando piping para a barragem de montante e galgamento para a barragem de jusante, caso esta última venha a falhar. Em cada conjunto, foram testados diferentes tamanhos de malha computacional, variando de forma progressiva, e foram observados os seguintes parâmetros: tempo de processamento, tamanho do arquivo e área da mancha de inundação.

Em função das limitações de tempo e do elevado custo computacional associado à realização do estudo de convergência para todos os nove conjuntos de barragens, esse procedimento foi aplicado detalhadamente apenas aos Conjuntos 1, 5 e 9, selecionados por representarem combinações típicas de barragens de pequeno, médio e grande porte. A partir desses conjuntos representativos, definiu-se um padrão de discretização espacial a ser adotado nos demais casos, respeitando-se a proporção entre a área modelada e o tamanho da malha, de modo a garantir consistência e comparabilidade entre as simulações realizadas.

Para o Conjunto 1, foram estudadas as malhas de 12,5, 20 e 25 metros. Para o Conjunto 5, as malhas de 20, 25, 50, 75 e 100 metros. Já para o Conjunto 9, foram estudadas as malhas de 75, 100, 125, 150 e 200 metros.

O tamanho da malha computacional escolhido para cada conjunto foi aquele que apresentou o menor tempo de processamento, aliado ao menor tamanho do arquivo e a uma mancha de inundação mais conservadora, que não se distanciasse muito da média dos resultados de área de inundação.

4.7 Cenários de simulação

Para cada conjunto de barragens foram simulados quatro diferentes cenários: (1) sem precipitação; (2) com vazão advinda de uma precipitação estimada para um tempo de retorno de 500 anos; (3) com vazão advinda de uma precipitação estimada para um tempo de retorno de 1.000 anos; e (4) com vazão advinda de uma precipitação estimada para um tempo de retorno de 10.000 anos.

Os critérios de escolha dos tempos de retorno pautaram-se nos parâmetros de vazão de projeto para a classificação das barragens de acumulação de água quanto ao risco (Quadro 1) e auxiliam na verificação da sensibilidade dos parâmetros hidrodinâmicos quanto à magnitude da precipitação.

Em cada simulação a barragem de montante se rompe por *piping* e a de jusante, caso venha a falhar, por galgamento. A adoção desses mecanismos de falha buscou representar condições conservadoras e fisicamente plausíveis, uma vez que o *piping* está associado a processos internos de deterioração estrutural, enquanto o galgamento está diretamente relacionado ao aumento abrupto de vazões e níveis d'água.

Essa abordagem está alinhada aos princípios da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), que orienta a avaliação de cenários críticos e potencialmente mais desfavoráveis para subsidiar ações de prevenção, mitigação e resposta a emergências, ainda que não estabeleça explicitamente os mecanismos de falha a serem adotados nos estudos de ruptura.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

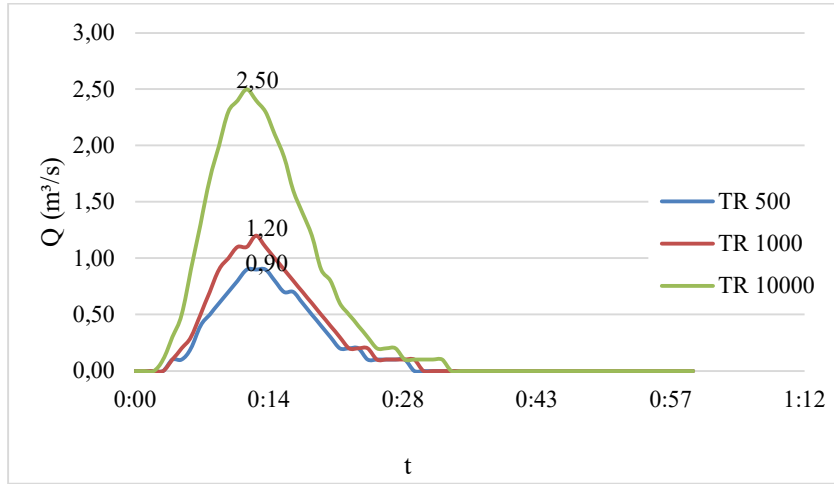
5.1 Hidrogramas

Os hidrogramas das vazões advindas de precipitações estimadas para os tempos de retorno de 500, 1.000 e 10.000 anos, gerados pelo software HEC-HMS, bem como o valor máximo da vazão para cada tempo de retorno, para cada conjunto de barragens, estão apresentados na Figura 9. Eles evidenciam o comportamento hidrológico das bacias associadas a cada conjunto de barragens, refletindo tanto as características físicas das áreas de contribuição quanto a severidade crescente dos eventos extremos considerados. De modo geral, observa-se que o aumento do tempo de retorno resulta em picos de vazão progressivamente mais elevados, bem como em hidrogramas com maior volume total escoado, o que é hidrológicamente consistente com a adoção de precipitações mais intensas e raras. Esse comportamento é observado em todos os conjuntos analisados, ainda que com magnitudes distintas, associadas principalmente à área da bacia, à declividade do talvegue e aos valores de CN adotados.

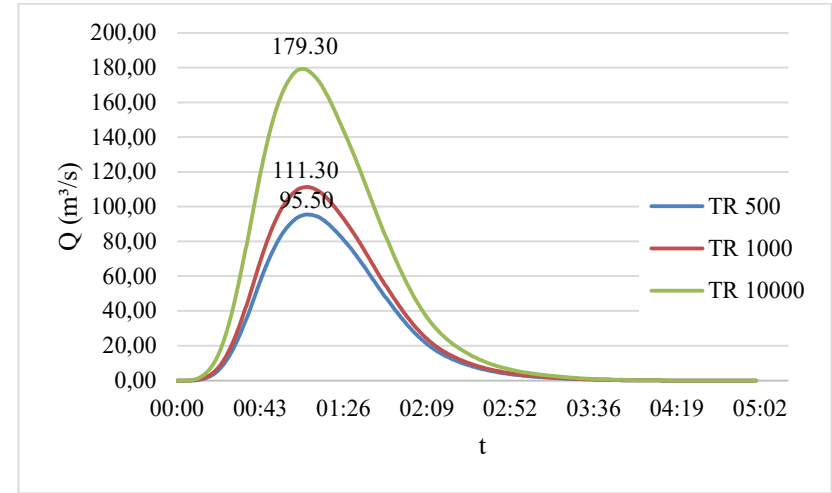
Comparativamente, os conjuntos associados a bacias de maior área de contribuição e maior declividade apresentam picos de vazão mais elevados e tempos de ascensão mais curtos, indicando respostas hidrológicas mais rápidas e concentradas. Em contrapartida, bacias menores ou com menor declividade tendem a apresentar hidrogramas mais suavizados, com picos menos acentuados e maior tempo de base. Essas diferenças são relevantes no contexto de barragens em cascata, uma vez que a forma do hidrograma influencia diretamente a interação entre a onda de cheia afluente e o volume armazenado nos reservatórios, podendo contribuir tanto para a amplificação quanto para a atenuação dos efeitos hidrodinâmicos à jusante.

A análise dos hidrogramas também evidencia que, nos cenários associados ao tempo de retorno de 10.000 anos, as vazões afluentes atingem valores significativamente superiores aos dos demais cenários, representando condições críticas compatíveis com aquelas exigidas para avaliações conservadoras de segurança de barragens pela PNSB. A adoção desses hidrogramas como condição de contorno nas simulações hidrodinâmicas permite avaliar a sensibilidade dos resultados à severidade dos eventos hidrológicos extremos e fornece subsídios importantes para a interpretação dos mapas de profundidade, velocidade e risco hidrodinâmico apresentados nas seções subsequentes. Dessa forma, os hidrogramas constituem a base hidrológica fundamental para a compreensão dos impactos associados à ruptura hipotética das barragens em cascata analisadas neste estudo.

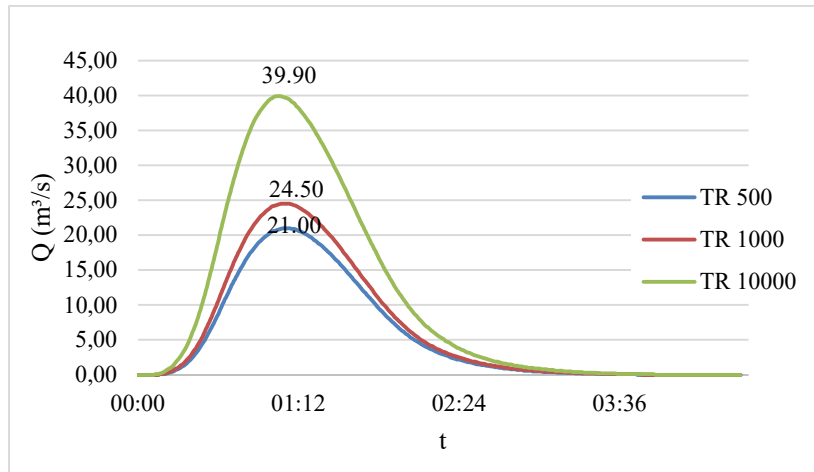
Figura 9 – Hidrogramas: (a) Conjunto 1, (b) Conjunto 2, (c) Conjunto 3, (d) Conjunto 4, (e) Conjunto 5, (f) Conjunto 6, (g) Conjunto 7, (h) Conjunto 8 e (i) Conjunto 9.



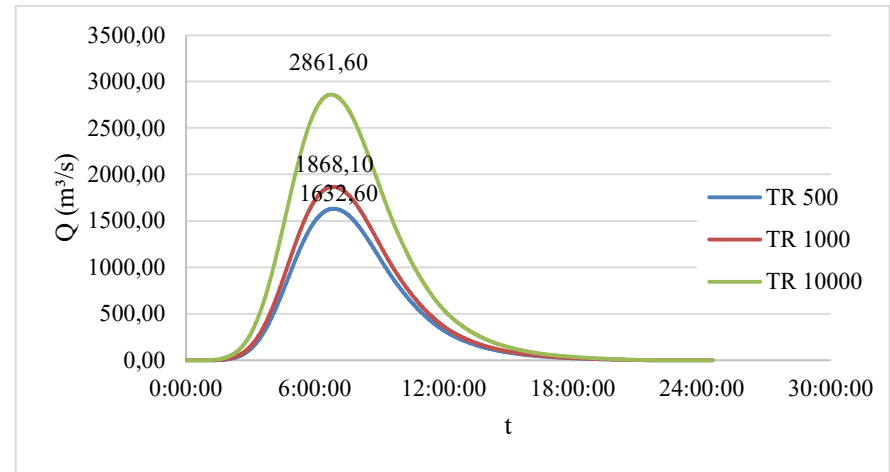
(a)



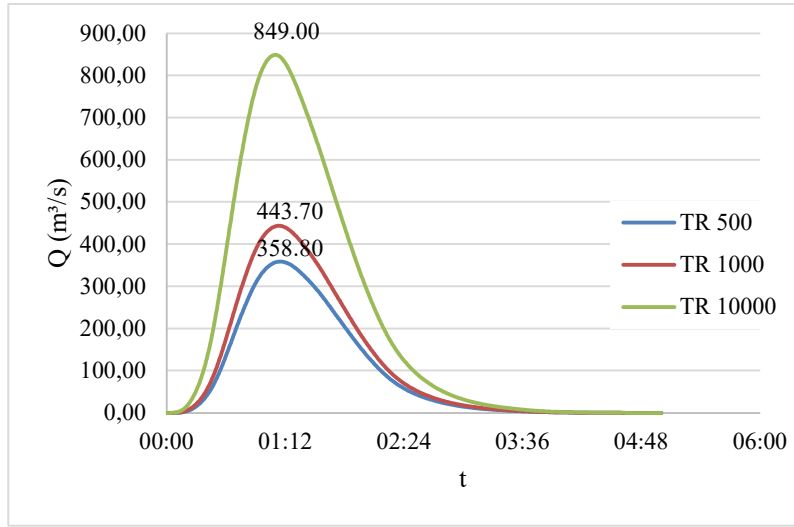
(b)



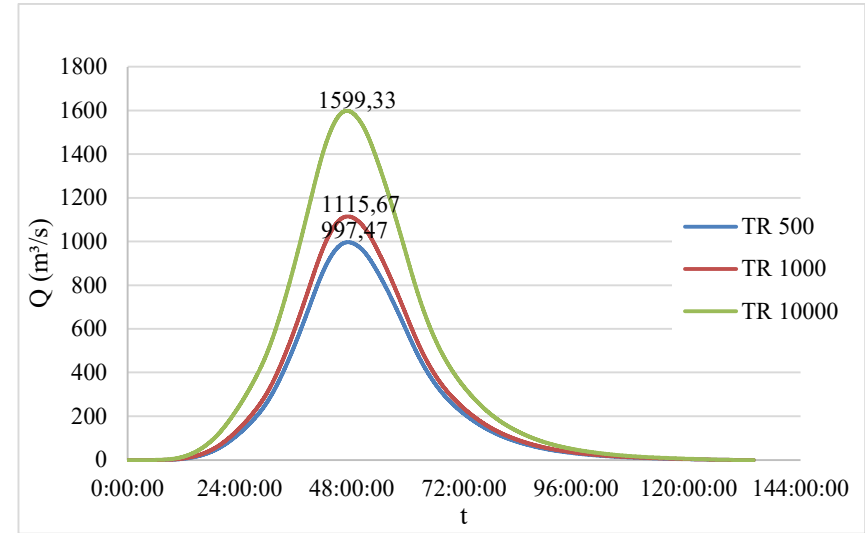
(c)



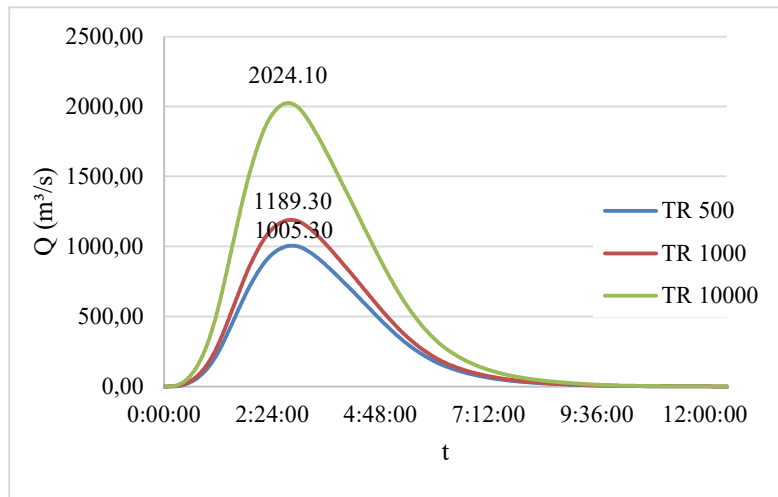
(d)



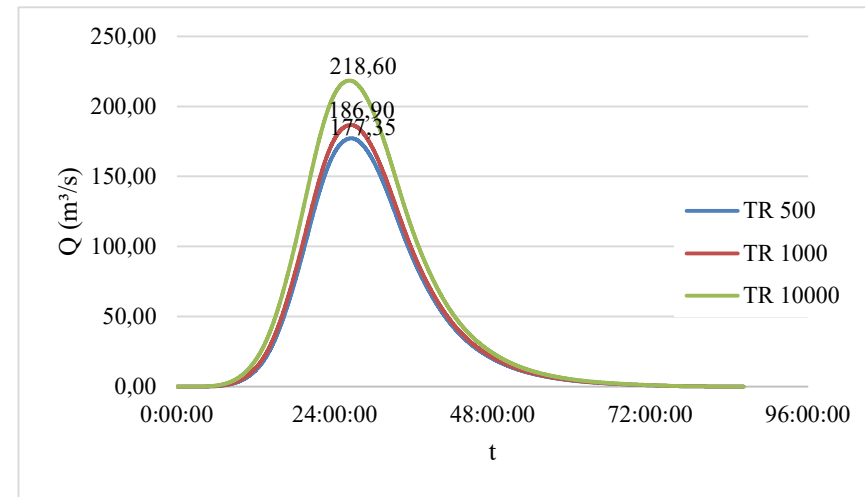
(e)



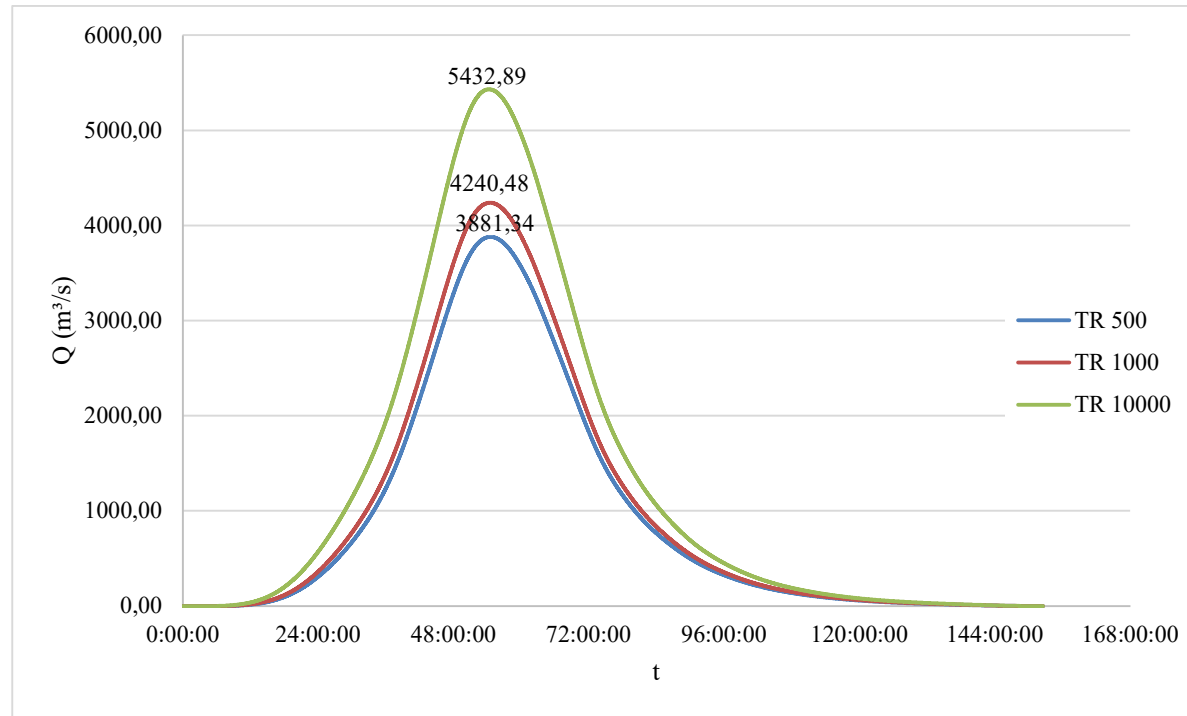
(f)



(g)



(h)



(i)

Fonte: Elaboração própria.

5.2 Estudo de convergência de malha

Os parâmetros observados no estudo de convergência de malha dos conjuntos 1, 5 e 9 estão apresentados nos quadros 9, 10 e 11, respectivamente.

Quadro 9 – Parâmetros do estudo de convergência de malha – Conjunto 1.

Tamanho da malha (m)	Tempo de processamento (h)	Tamanho do arquivo (kB)	Área da mancha de inundação (m ²)
12,5	00:00:56	217	107945,7
20	00:00:23	214	108797,2
25	00:00:17	216	108735,9

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 10 – Parâmetros do estudo de convergência de malha – Conjunto 5.

Tamanho da malha (m)	Tempo de processamento (h)	Tamanho do arquivo (kB)	Área da mancha de inundação (m ²)
20	00:24:13	5120315	9015480,76
25	00:10:13	3309150	9009167,46
50	00:03:22	849518	9040418,37
75	00:01:02	369980	9044024,61
100	00:00:49	210155	9069080,44

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 11 – Parâmetros do estudo de convergência de malha – Conjunto 9.

Tamanho da malha (m)	Tempo de processamento (h)	Tamanho do arquivo (kB)	Área da mancha de inundação (m ²)
75	12:43:44	3906375	799383202
100	07:26:21	2289647	799352713
125	05:19:19	1515393	799338652
150	02:53:16	1076646	799339660
200	01:22:13	634676	799313809

Fonte: Elaboração própria.

Como a escolha do tamanho da malha de simulação visava selecionar aquela que apresentasse o menor tempo de processamento, aliado ao menor tamanho do arquivo e à segurança em relação à área da mancha de inundação gerada, escolheu-se, para o conjunto 1, a malha de 12,5 m, que apresentou a área da mancha de inundação com menor desvio da média, uma vez que a diferença entre os tempos de simulação e também entre os tamanhos do arquivo não influenciariam tanto nesse caso, pois ambos os parâmetros apresentaram valores pequenos.

Pelo mesmo motivo, escolheu-se a malha de 50 m para o conjunto 5. Para o conjunto 9, a malha escolhida foi a de 200 m por esta apresentar um menor custo computacional.

Dessa forma, a malha do conjunto 2 seguiu o mesmo tamanho da malha do conjunto 1 (12,5 m), porém a malha do conjunto 3 teve de ser ampliada para o valor subsequente (20 m),

uma vez que não foi possível processar a simulação com a malha de 12,5 m. As malhas dos conjuntos 4, 6, 7 e 8 seguiram o tamanho da malha do conjunto 5 (50 m).

Os valores de discretização espacial adotados neste estudo são compatíveis com aqueles empregados em estudos de ruptura de barragens reportados na literatura, os quais indicam malhas mais refinadas para barragens de menor porte e vales mais confinados, e malhas progressivamente mais grosseiras para barragens de maior porte e áreas de maior extensão espacial. Tal abordagem é amplamente utilizada em estudos comparativos e exploratórios, nos quais o objetivo principal é a análise do comportamento hidrodinâmico global e a avaliação de cenários representativos de risco (USBR, 1988; Froehlich, 2008; Rocha, 2025).

5.3 Ruptura em cascata

Por meio das simulações computacionais realizadas observou-se que nem todos os cenários resultaram em uma ruptura em cascata. Em alguns casos, houve a amortização do volume vertido pela barragem de montante na barragem de jusante, como é possível observar no Quadro 12, no qual “x” representa os cenários em que houve ruptura da barragem de jusante e “-“ representa os cenários em que a barragem de jusante não foi rompida.

Quadro 12 – Ruptura da barragem de jusante.

Cenário	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
1	-	-	-	x	-	-	x	x	-
2	-	-	-	x	-	x	x	x	-
3	-	-	-	x	-	x	x	x	-
4	-	-	-	x	-	x	x	x	-

Fonte: Elaboração própria.

Nos conjuntos C1, C2 e C3, nos quais a barragem de montante apresenta volume pequeno, o volume vertido foi amortecido pela barragem de jusante em todos os cenários. Nesses conjuntos, a barragem de jusante apresenta volume pequeno no conjunto C1, médio no conjunto C2, e grande no conjunto C3.

No conjunto C4, no qual a barragem de montante apresenta volume médio e a de jusante, pequeno, houve ruptura em cascata em todos os cenários, o que já era esperado, uma vez que o volume da barragem de montante era maior que o da de jusante.

No conjunto C5, no qual ambas as barragens apresentam porte médio, não houve rompimento da barragem de jusante em nenhum cenário.

O conjunto C6 chama a atenção por apresentar um comportamento fora do esperado, uma vez que a barragem de jusante, que é de porte grande, apresentando volume maior que o da barragem de montante, que é de porte médio, se rompe em todos os cenários que envolvem precipitação. Tal fato pode ser explicado pelos altos valores de vazão dos hidrogramas de entrada, uma vez que este é o conjunto com maior área de contribuição da bacia hidrográfica.

Nos conjuntos C7 e C8, como esperado, ocorre ruptura em cascata em todos os cenários, uma vez que a barragem de montante, de porte grande em ambos os casos, apresenta volume maior que o da barragem de jusante, de porte pequeno no conjunto C7 e médio no conjunto C8.

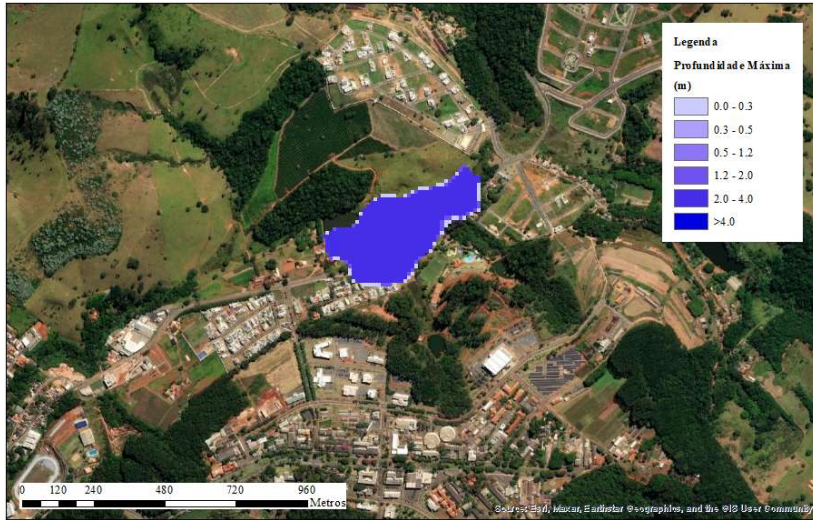
No conjunto C9, o qual apresenta ambas as barragens de porte grande, há amortização do volume da barragem de montante em todos os cenários.

Com esses resultados pode-se observar que, nos cenários simulados, o rompimento da barragem de jusante tende a ocorrer quando o volume do reservatório de montante é suficientemente grande para gerar uma onda de cheia que exceda a capacidade de descarga ou a altura da barragem de jusante, observando-se uma correlação com o volume relativo entre as duas barragens.

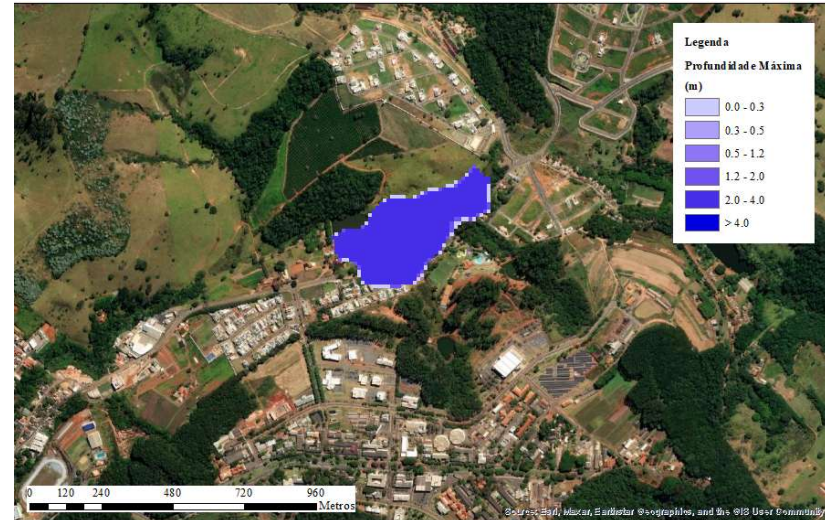
5.4 Mapas de Profundidade Máxima

As manchas de inundação em relação à profundidade máxima da onda de cheia gerada em cada cenário estão apresentadas nas Figuras 10 a 18.

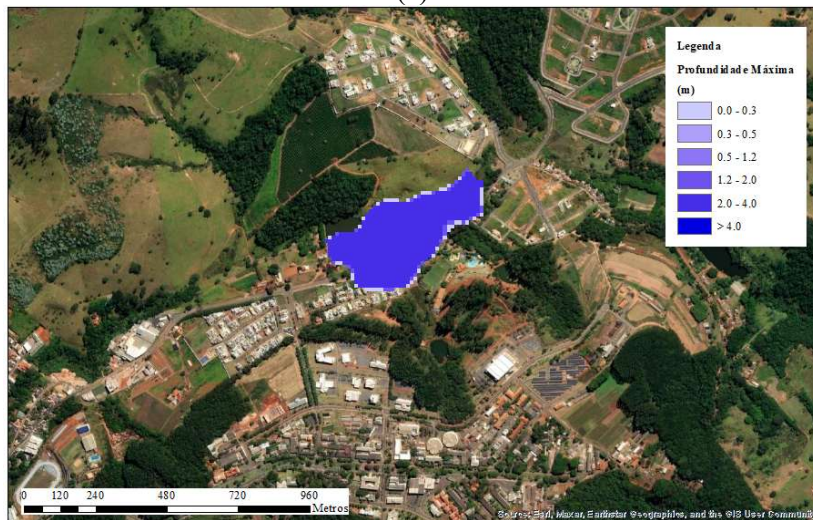
Figura 10 - Profundidade máxima do Conjunto 1: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.



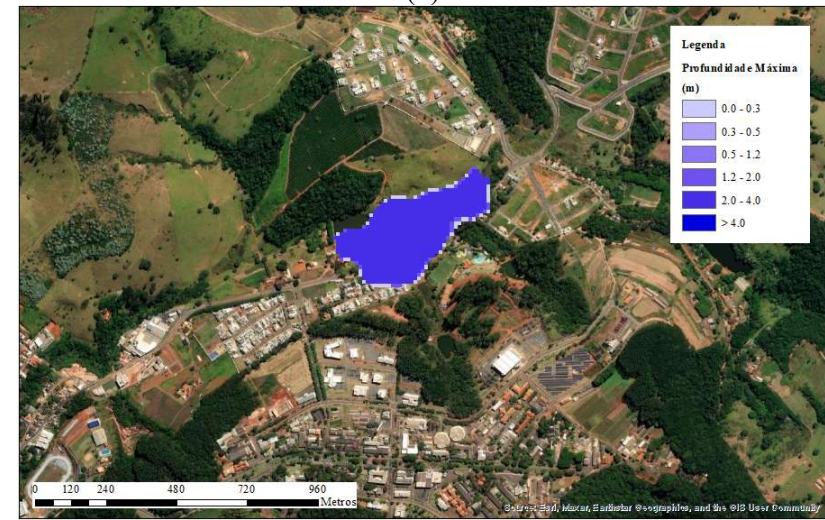
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Elaboração própria.

Figura 11 - Profundidade máxima do Conjunto 2: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Elaboração própria.

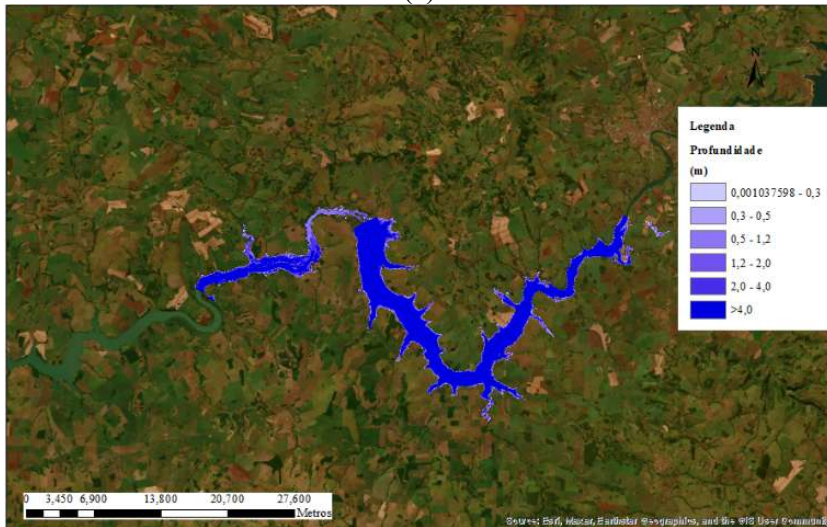
Figura 12 - Profundidade máxima do Conjunto 3: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.



(a)



(b)



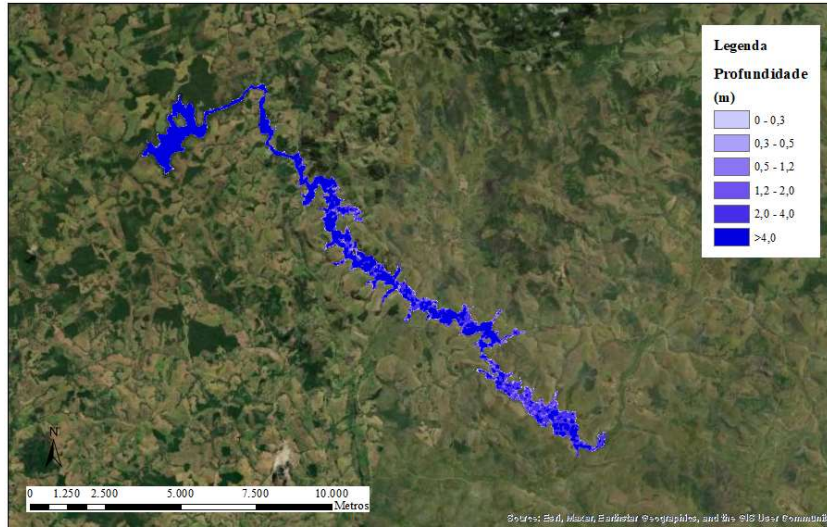
(c)



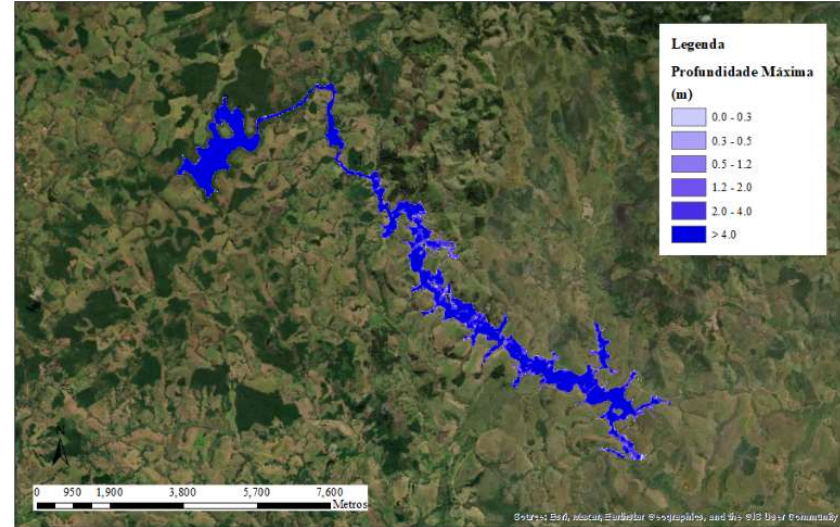
(d)

Fonte: Elaboração própria.

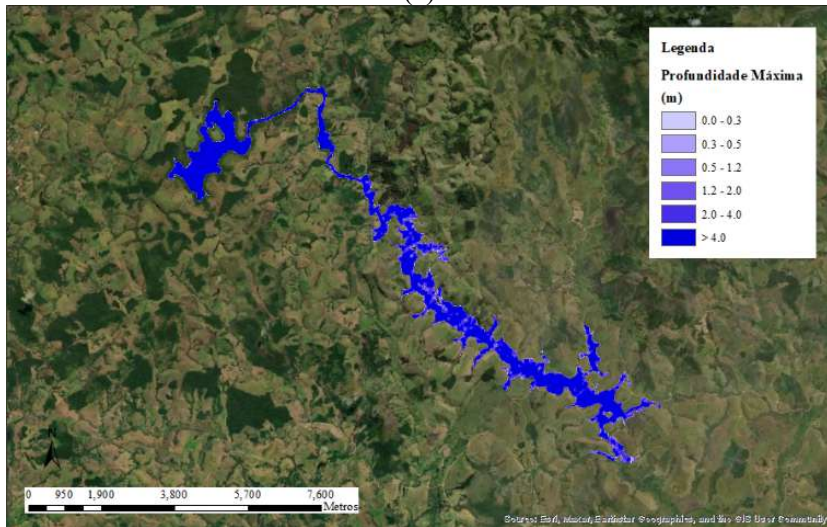
Figura 13 - Profundidade máxima do Conjunto 4: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.



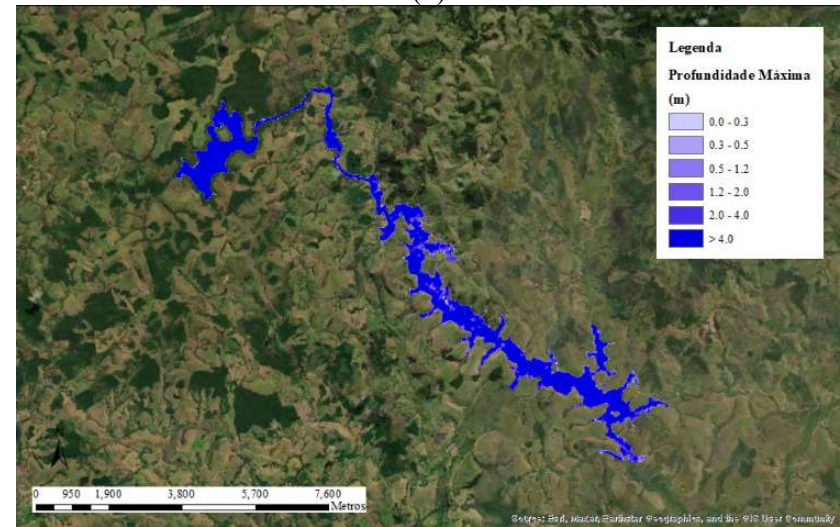
(a)



(b)



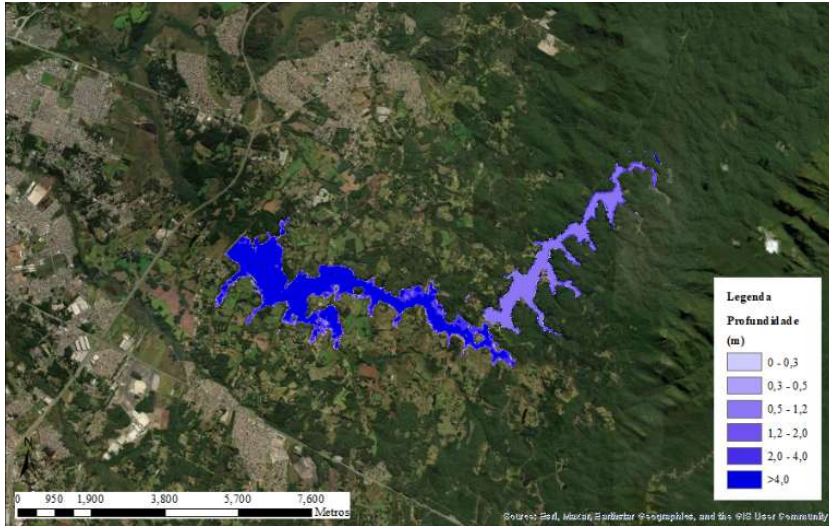
(c)



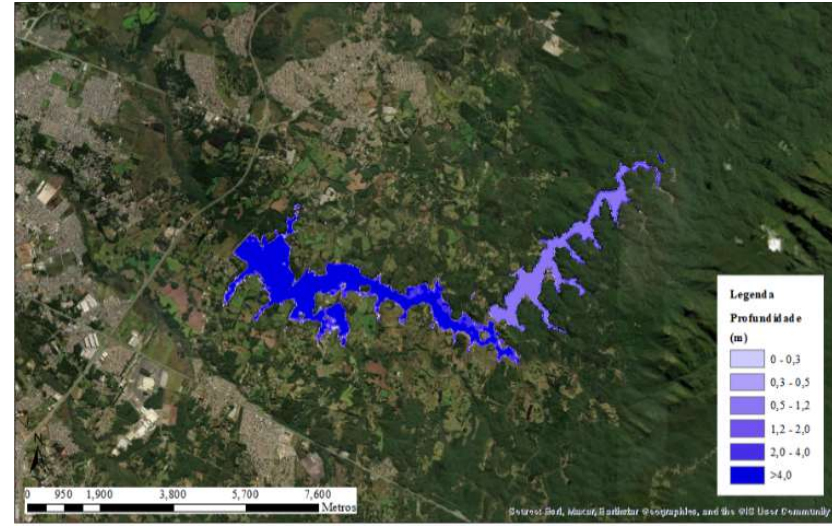
(d)

Fonte: Elaboração própria.

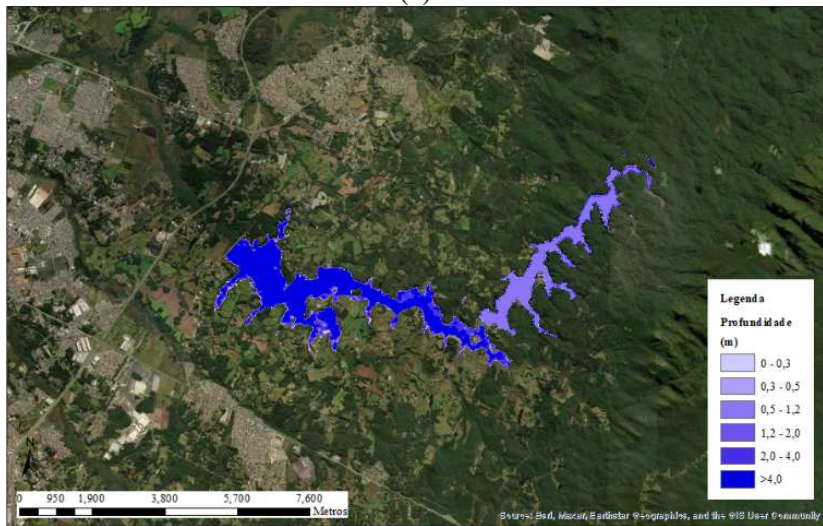
Figura 14 - Profundidade máxima do Conjunto 5: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.



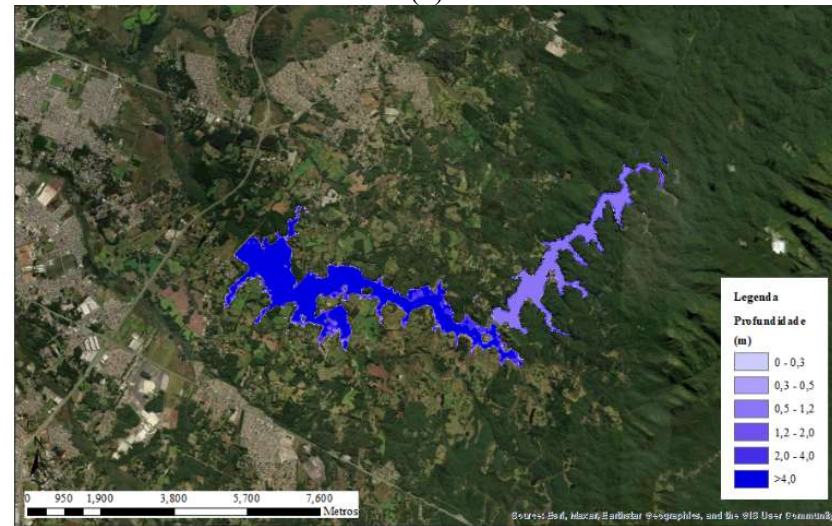
(a)



(b)



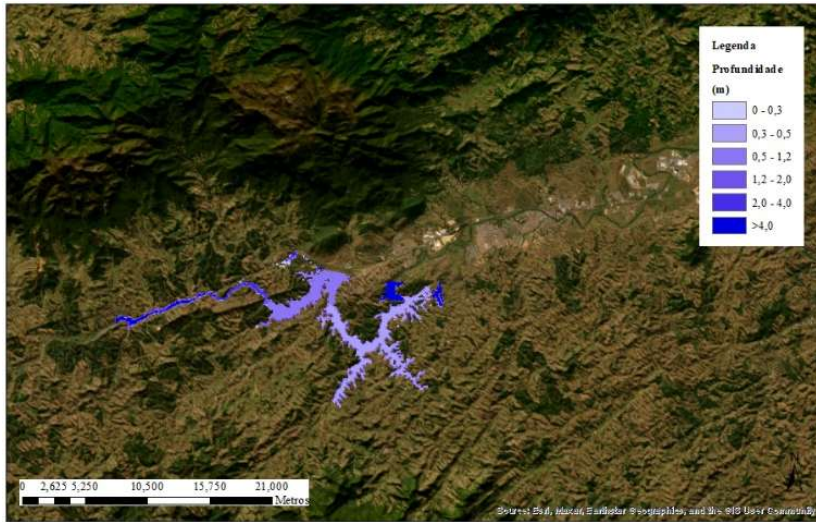
(c)



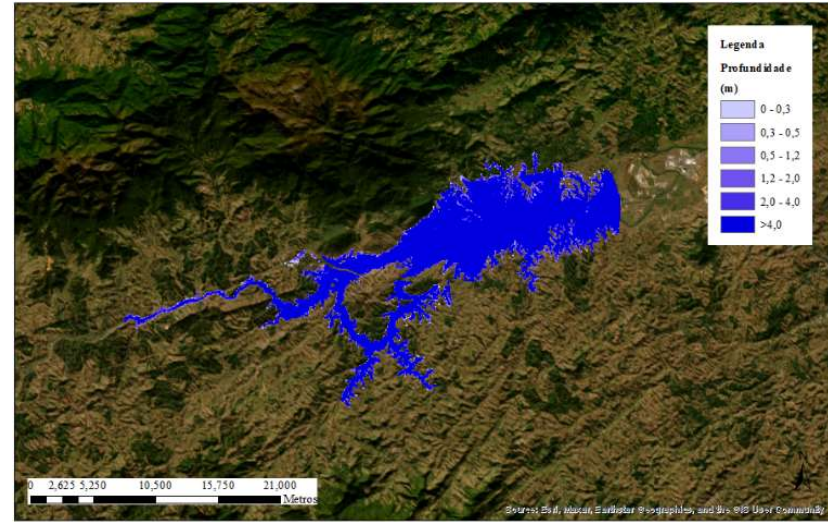
(d)

Fonte: Elaboração própria.

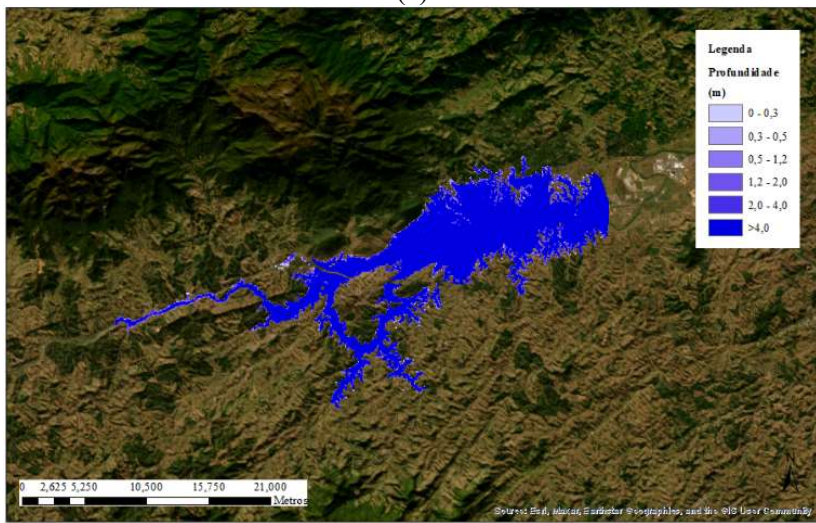
Figura 15 - Profundidade máxima do Conjunto 6: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.



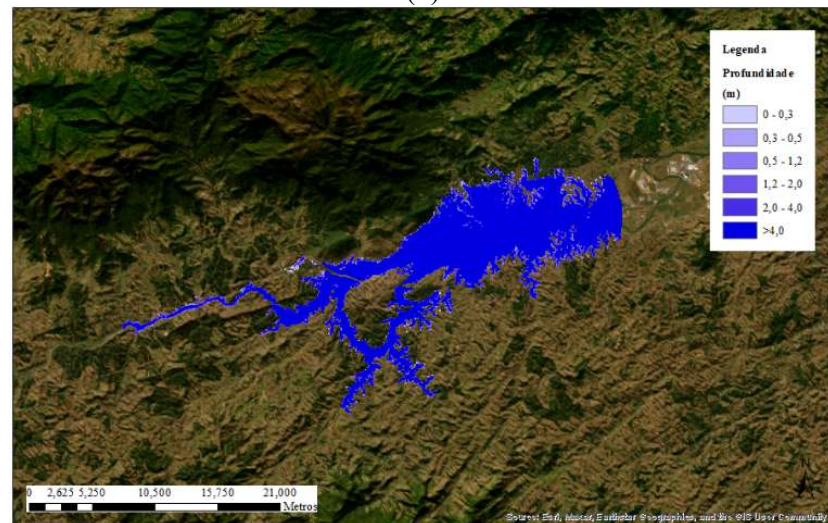
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Elaboração própria.

Figura 16 - Profundidade máxima do Conjunto 7: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.



(a)



(b)



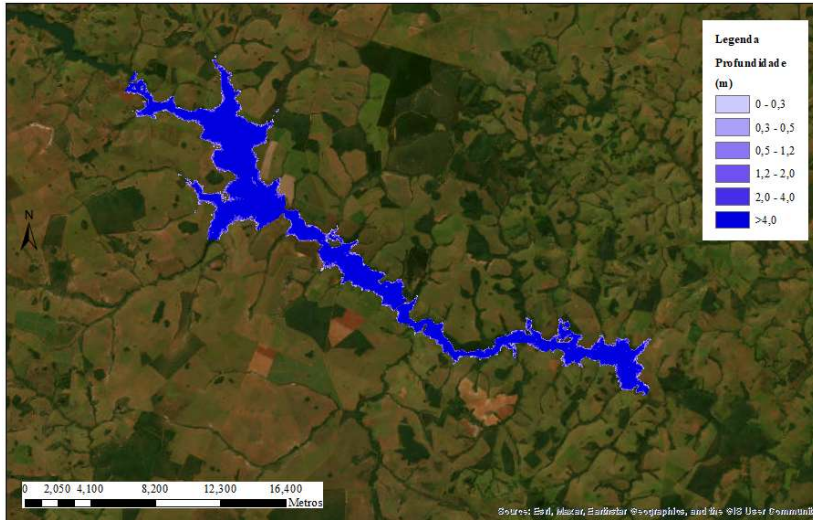
(c)



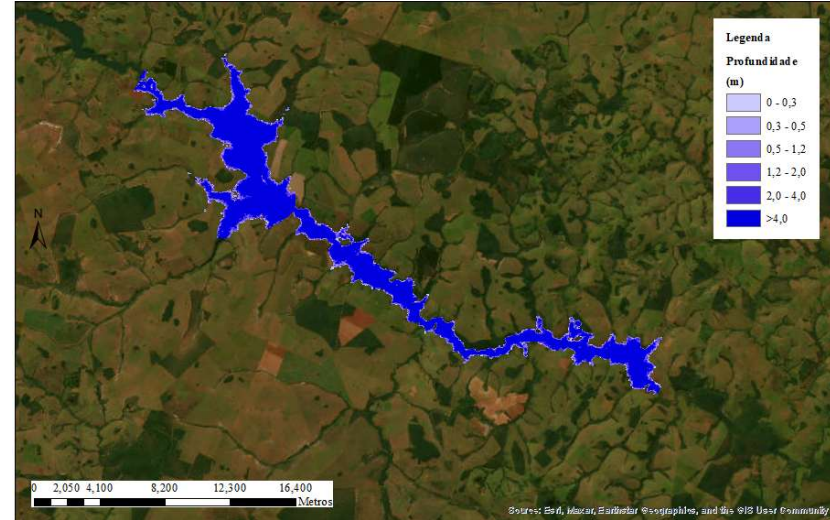
(d)

Fonte: Elaboração própria.

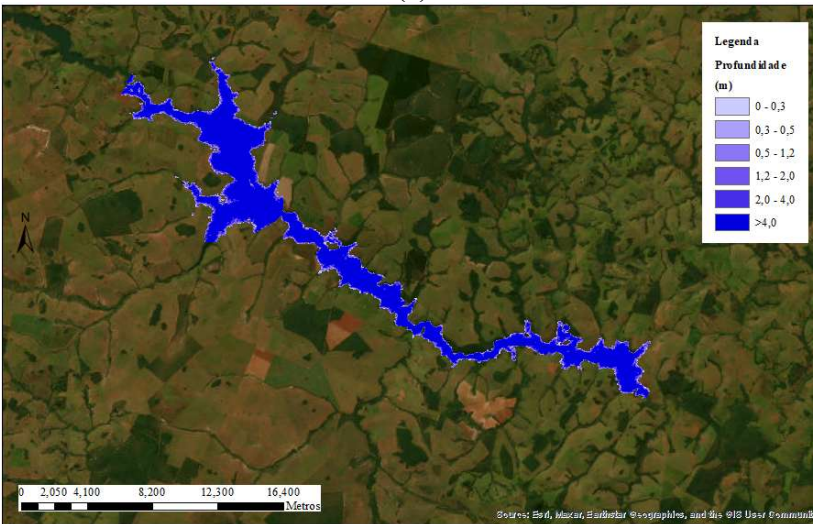
Figura 17 - Profundidade máxima do Conjunto 8: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.



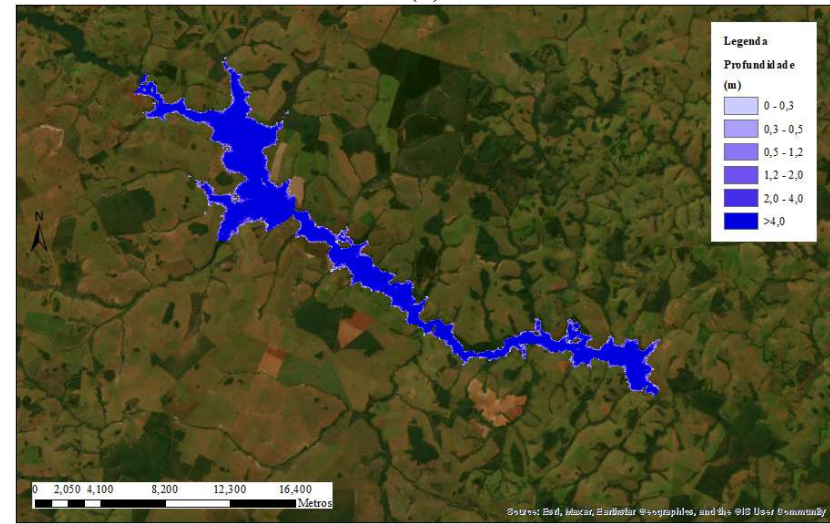
(a)



(b)



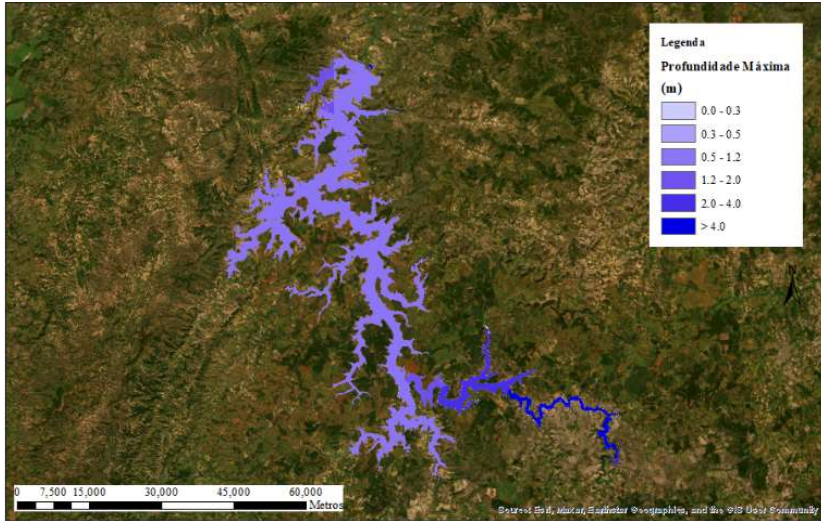
(c)



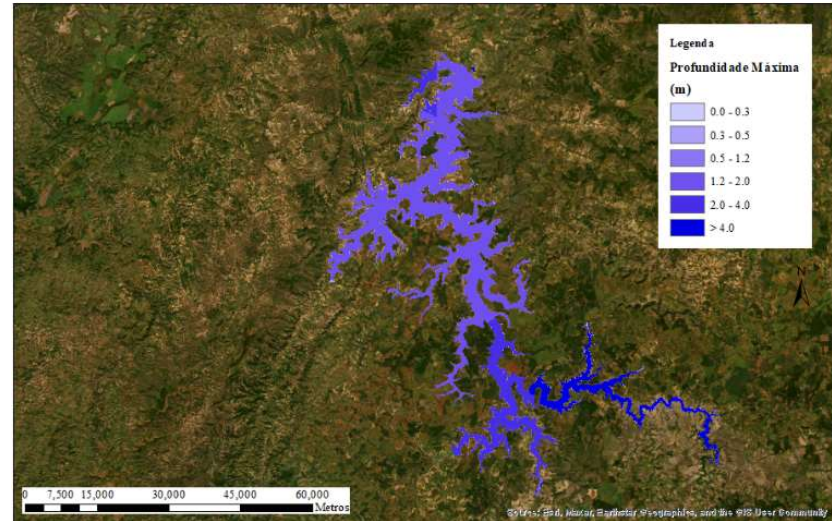
(d)

Fonte: Elaboração própria.

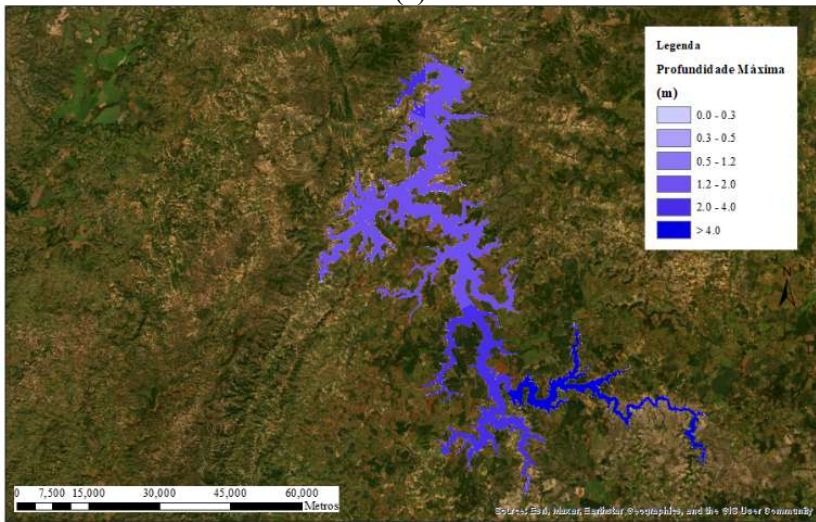
Figura 18 - Profundidade máxima do Conjunto 9: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.



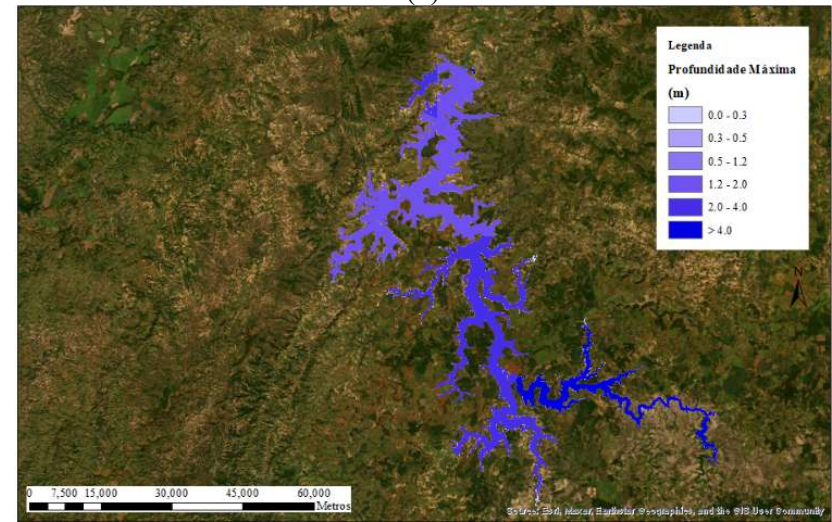
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Elaboração própria.

O quadro 13 apresenta os valores máximos de profundidade em cada simulação. É importante ressaltar que foram considerados apenas os valores da mancha de inundação que não pertencem a cursos hídricos ou áreas de reservatórios, locais em que não faz sentido avaliar o dano potencial associado, uma vez que já são inundados.

Quadro 13 – Valores máximos de profundidade (m).

Cenário	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
1	3,60	3,16	2,09	19,55	6,12	8,69	15,68	29,85	12,25
2	3,61	5,68	4,10	20,93	6,17	39,96	15,69	29,93	12,30
3	3,62	5,80	4,19	21,23	6,18	40,97	15,72	29,95	12,32
4	3,62	6,22	4,50	22,01	6,25	41,78	15,73	29,96	12,33

Fonte: Elaboração própria.

No conjunto C1, pode-se observar que a precipitação, independentemente do tempo de retorno, pouco contribui para o aumento da profundidade máxima, uma vez que a área da bacia de contribuição é muito pequena, resultando em um hidrograma com vazões baixas, logo, a vazão vertida pela barragem de montante é totalmente amortizada pelo reservatório de jusante.

No conjunto C2 já se observa uma maior contribuição da precipitação para o aumento da profundidade máxima, assim como nos conjuntos C3 e C4. Vale ressaltar a diferença da magnitude das profundidades máximas dos três primeiros conjuntos em relação aos demais, com exceção do conjunto C5.

No conjunto C5, assim como no conjunto C1, observa-se que a precipitação pouco contribui com o aumento da profundidade máxima. Outro detalhe que chama a atenção é que os valores de profundidade são baixos quando comparados aos demais conjuntos compostos por barragem de montante de porte médio (C4 e C6). Tais fatos podem ser explicados por dois fatores: as baixas vazões dos hidrogramas associadas ao não rompimento da barragem de jusante, tendo o volume vertido pela barragem de montante sido amortizado pelo reservatório de jusante.

No conjunto C6 é notável a diferença da magnitude da profundidade máxima do cenário 1, sem precipitação, para os demais. Tal fato se dá por ter ocorrido ruptura em cascata apenas nos cenários com precipitação, devido aos altos valores dos hidrogramas. O galgamento da barragem de jusante, de porte grande e altura de 50 metros, fez com que o vale à jusante fosse atingido por ondas de grande magnitude.

Nos conjuntos C7 e C8, ambos compostos por barragem de montante de grande porte, há pouca diferença da magnitude da profundidade máxima entre os diferentes cenários, uma vez em que há o galgamento da barragem de jusante em todos eles. Nota-se que as

profundidades associadas ao conjunto C8 são aproximadamente o dobro das observadas no conjunto C7, o que se explica pelo fato de a barragem de jusante do conjunto C7 ser de porte pequeno, enquanto que o da barragem de jusante do conjunto C8 é de porte médio.

O conjunto C9 apresenta as menores magnitudes de profundidade máxima da onda de cheia dos três últimos conjuntos, e a precipitação pouco contribui para o aumento da mesma, o que se deve ao fato de não haver galgamento da barragem de jusante em nenhum cenário, e o reservatório da barragem de jusante ter capacidade suficiente para amortizar todo o volume vertido, apesar das altas vazões.

Ainda assim, é fundamental destacar que a profundidade máxima absoluta não deve ser utilizada de forma isolada como critério de avaliação do dano potencial associado.

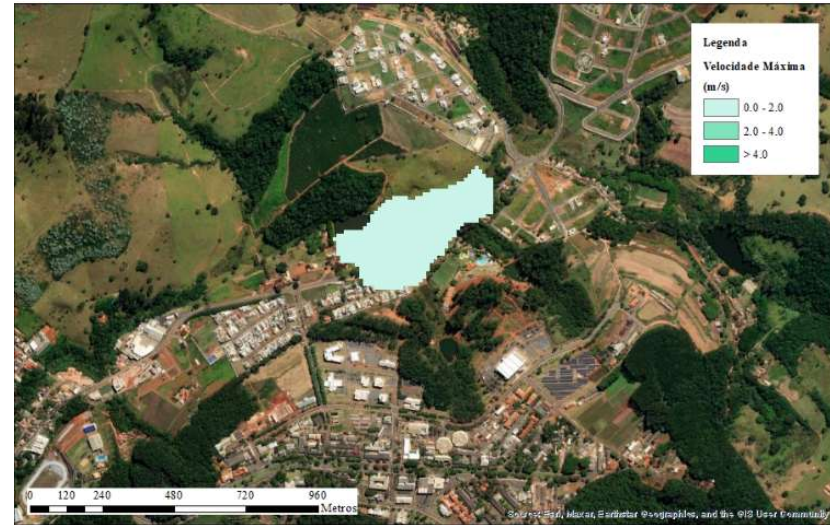
5.5 Mapas de Velocidade Máxima

As manchas de inundação em relação à velocidade máxima da onda de cheia gerada em cada cenário estão apresentadas nas Figuras 19 a 27.

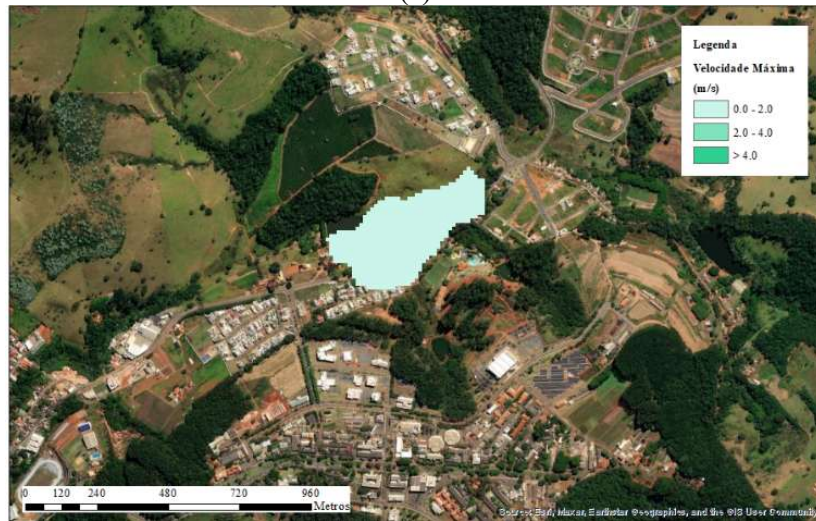
Figura 19 - Velocidade Máxima do Conjunto 1: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.



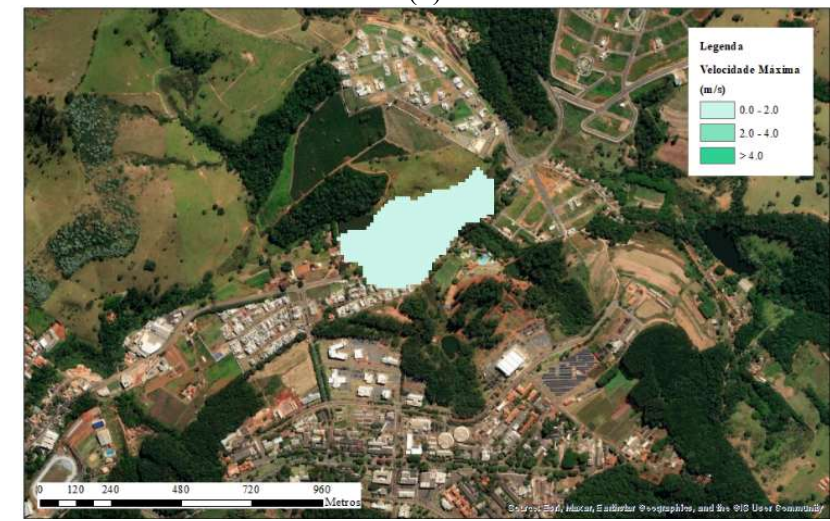
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Elaboração própria.

Figura 20 - Velocidade Máxima do Conjunto 2: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Elaboração própria.

Figura 21 - Velocidade Máxima do Conjunto 3: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.



(a)



(b)



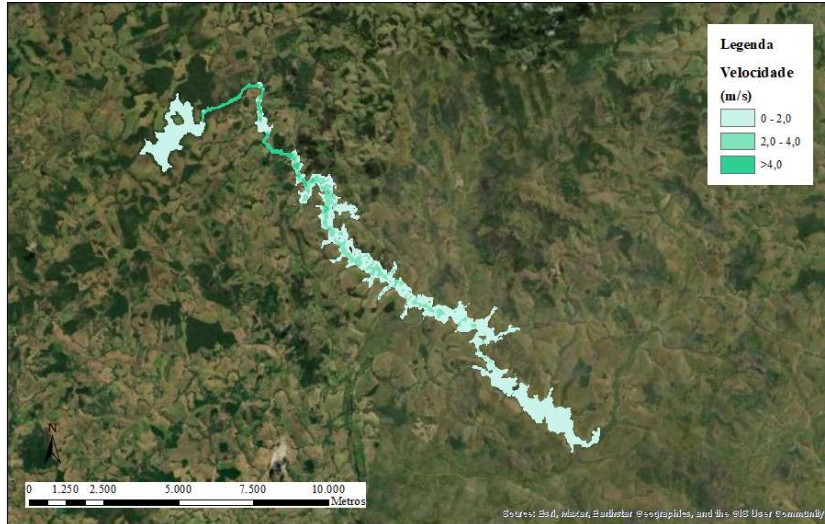
(c)



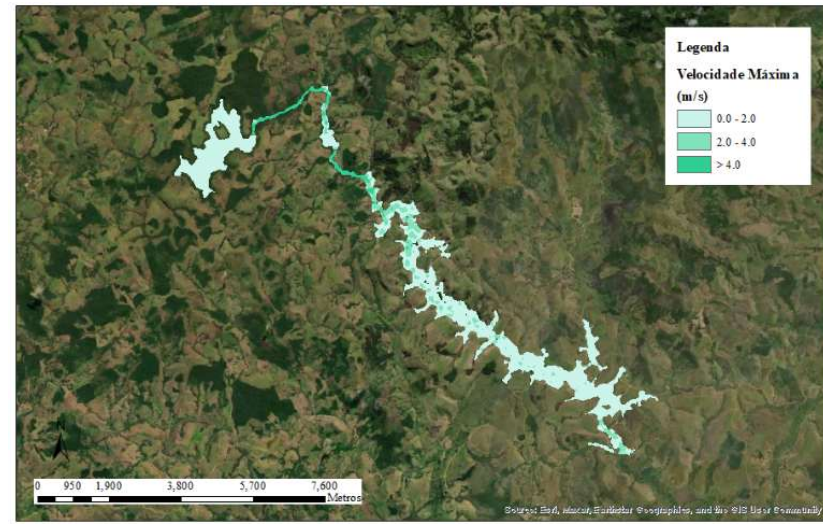
(d)

Fonte: Elaboração própria.

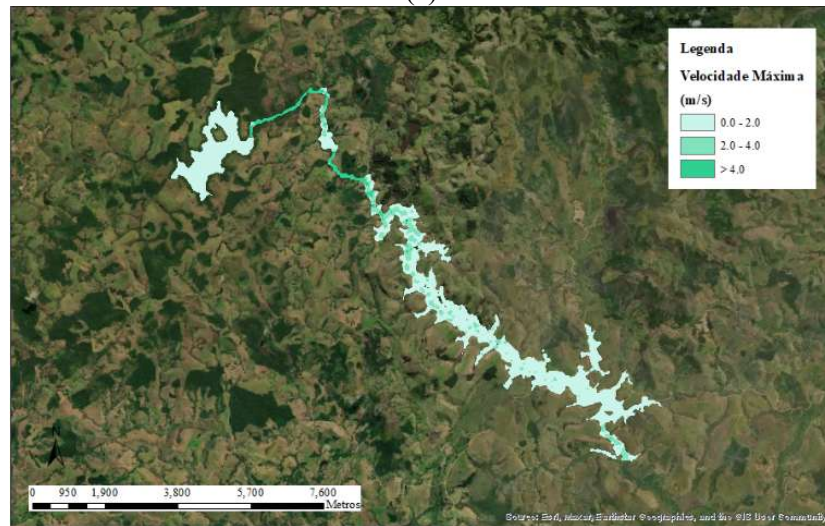
Figura 22 - Velocidade Máxima do Conjunto 4: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.



(a)



(b)



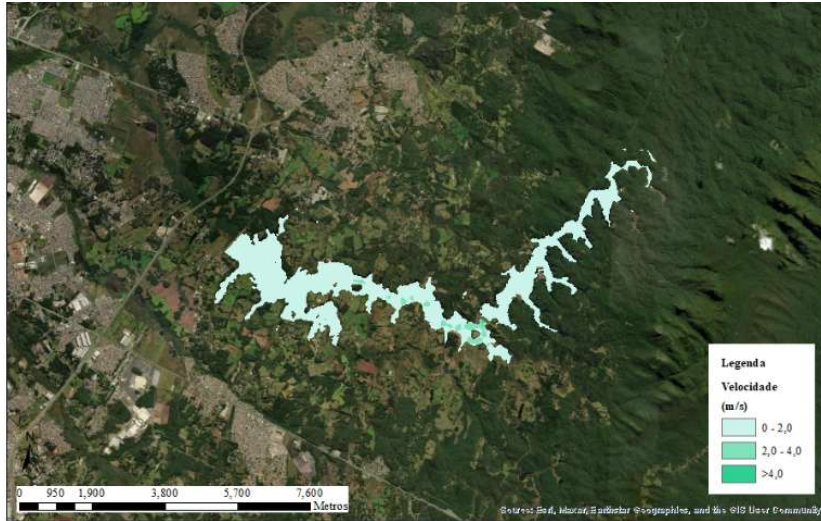
(c)



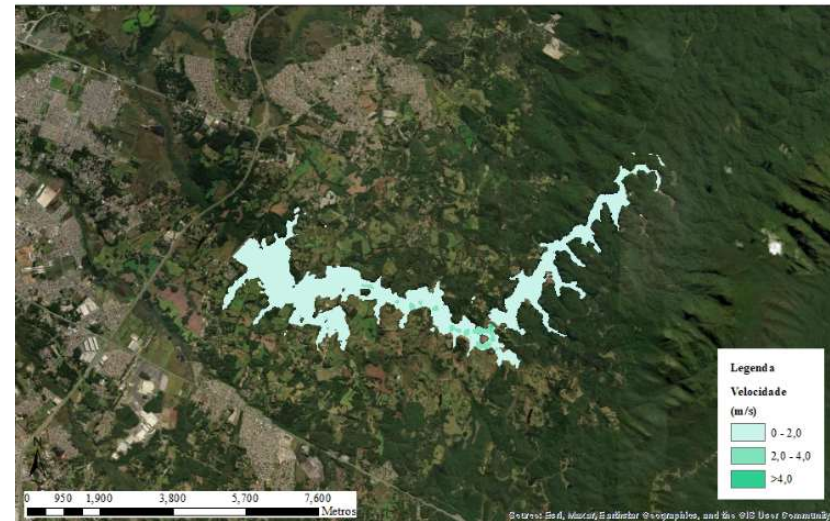
(d)

Fonte: Da autora (2026).

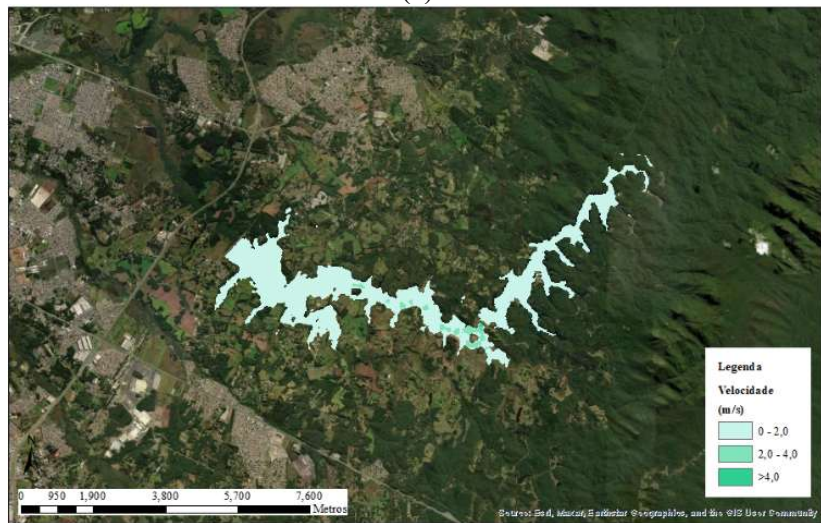
Figura 23 - Velocidade Máxima do Conjunto 5: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.



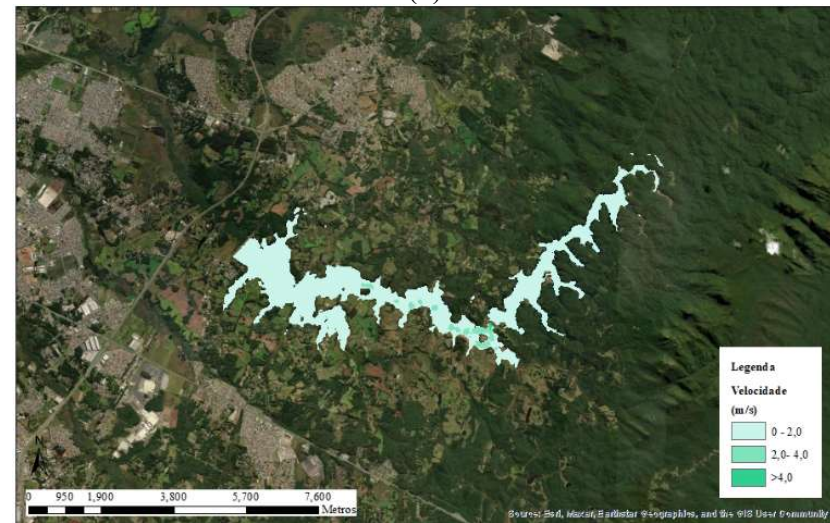
(a)



(b)



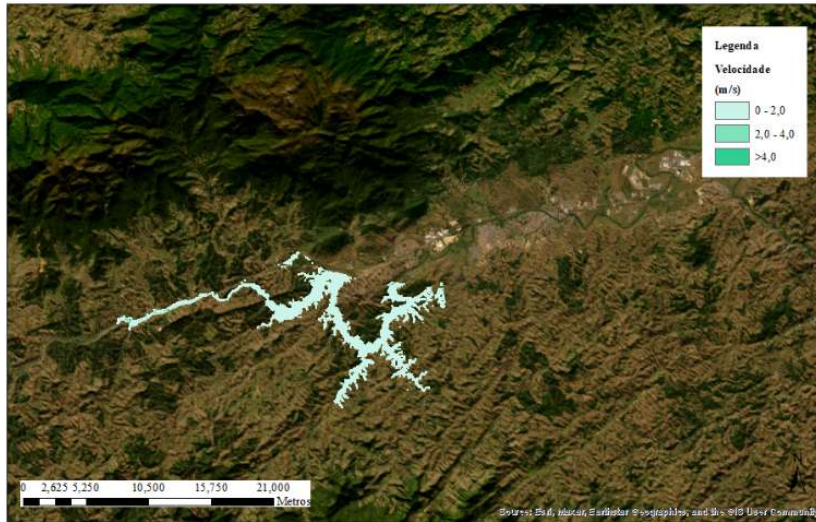
(c)



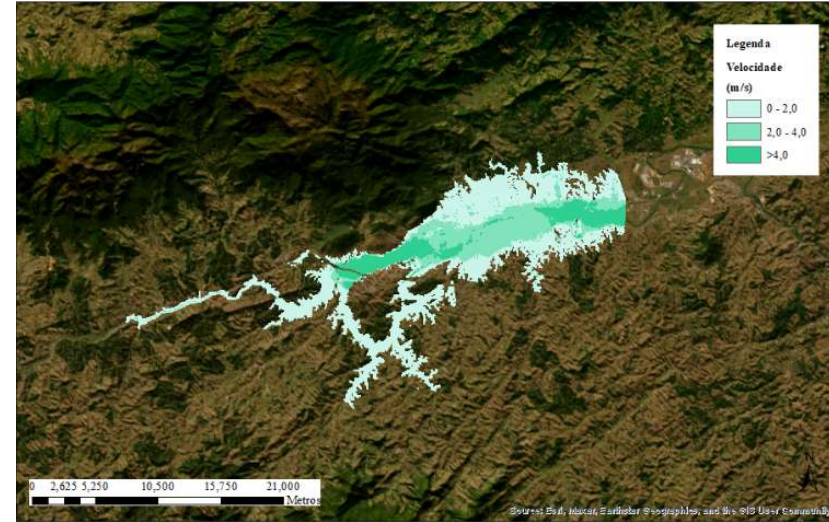
(d)

Fonte: Elaboração própria.

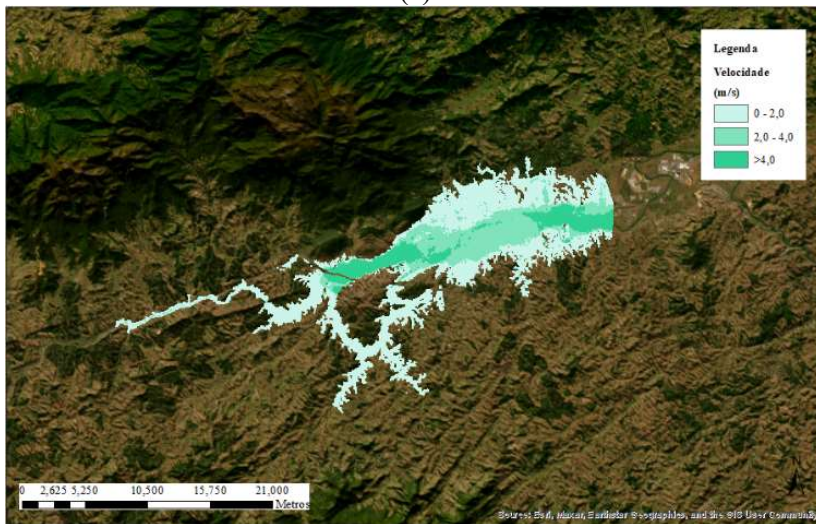
Figura 24 - Velocidade Máxima do Conjunto 6: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.



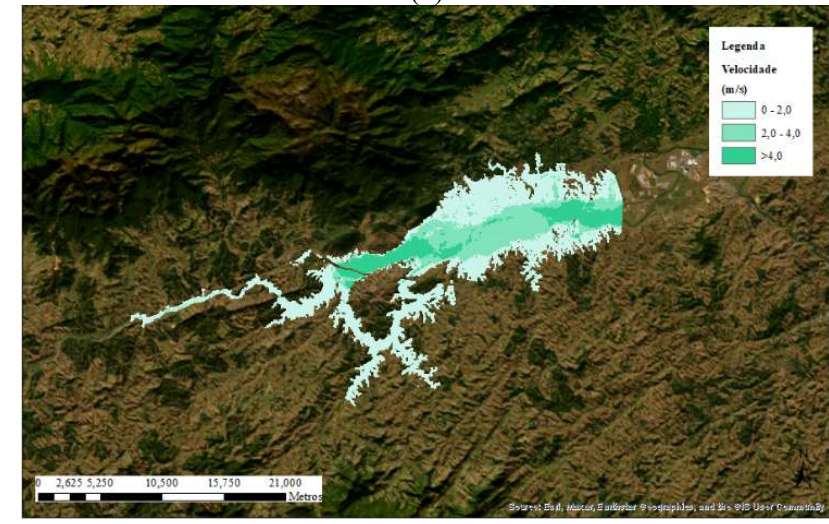
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Elaboração própria.

Figura 25 - Velocidade Máxima do Conjunto 7: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Elaboração própria.

Figura 26 - Velocidade Máxima do Conjunto 8: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.



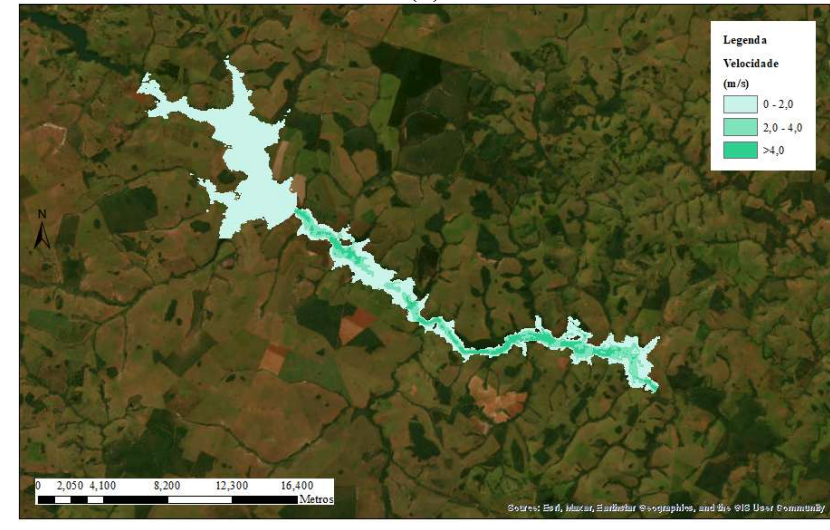
(a)



(b)



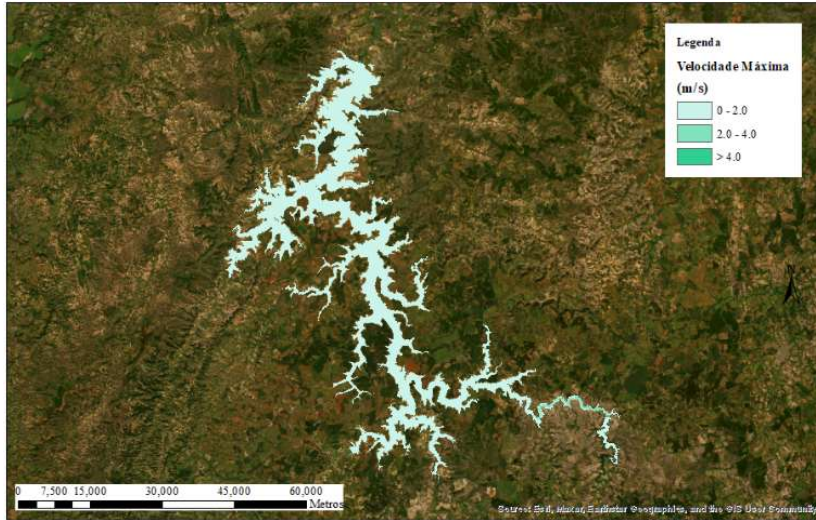
(c)



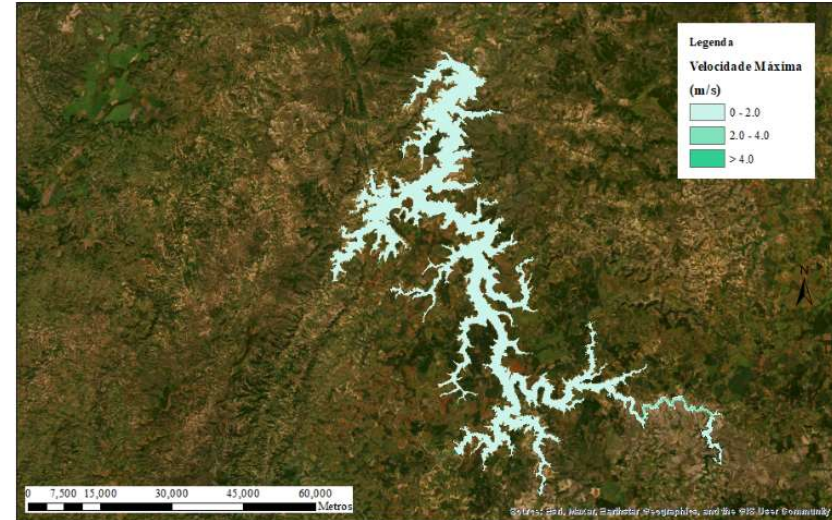
(d)

Fonte: Elaboração própria.

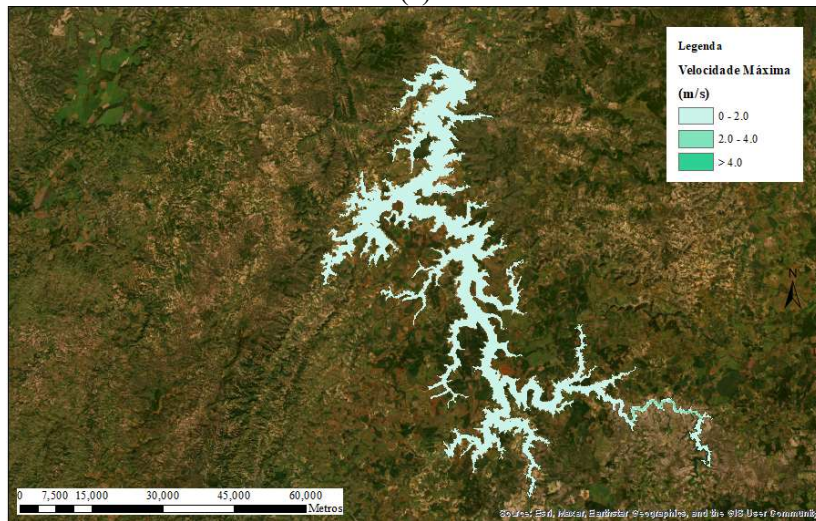
Figura 27 - Velocidade Máxima do Conjunto 9: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.



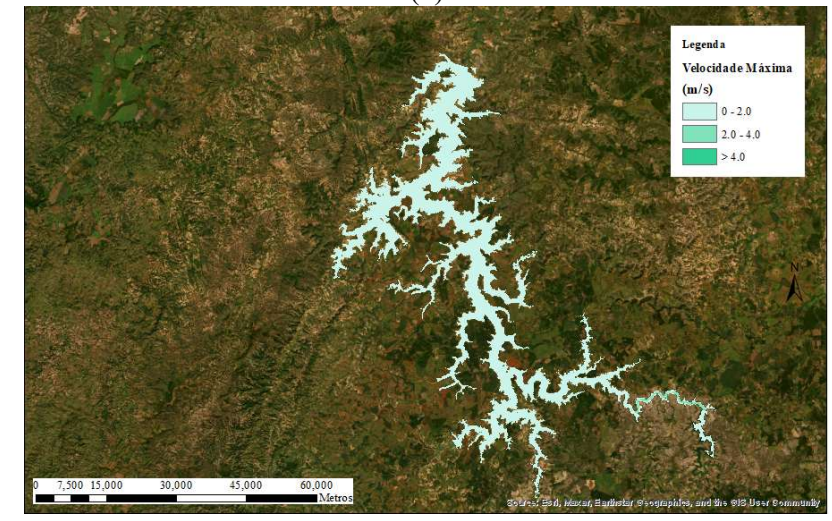
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Elaboração própria.

O quadro 14 apresenta os valores máximos de velocidade em cada simulação. É importante ressaltar que foram considerados apenas os valores da mancha de inundação que não pertencem a cursos hídricos ou áreas de reservatórios, locais em que não faz sentido avaliar o dano potencial associado, uma vez que já são inundados.

Quadro 14 – Valores máximos de velocidade (m/s).

Cenário	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
1	0,63	2,80	0,45	17,47	3,71	21,20	7,61	13,70	6,48
2	0,63	4,34	1,70	17,48	3,72	24,81	7,63	13,89	6,60
3	0,63	4,87	1,73	17,49	3,72	27,71	7,63	13,95	6,61
4	0,77	5,06	1,99	17,50	3,74	28,09	7,63	13,96	6,62

Fonte: Elaboração própria.

A análise dos mapas de velocidade máxima evidencia diferenças significativas entre as barragens avaliadas e entre os cenários hidrológicos considerados, refletindo a influência do porte das estruturas, da posição na cascata e das características geomorfológicas do vale a jusante.

No conjunto C1 a magnitude da velocidade máxima pouco se altera entre os cenários, dada às baixas vazões e à pequena diferença entre as vazões de pico de cada tempo de retorno.

Nos conjuntos C2 e C3 existe uma alteração mais expressiva do cenário 1, sem precipitação, para os demais. Um detalhe que chama a atenção é que as velocidades do conjunto C2, composto por uma barragem de porte pequeno e outra de porte médio, são maiores que as do conjunto C3, composto por uma barragem de porte pequeno e outra de porte grande. O que ocorre pelo fato de o conjunto C2 apresentar área da bacia de contribuição quatro vezes superior à área de contribuição do conjunto C3, gerando hidrogramas de vazões mais altas.

No conjunto C4 há pouca diferença entre as velocidades de cada cenário, porém a magnitude aumenta bastante em relação aos três primeiros conjuntos, o que se deve ao fato de ocorrer ruptura em cascata de uma barragem de porte médio seguida de uma barragem de porte pequeno.

No conjunto C5 nota-se que a precipitação também não causou alterações nos valores de velocidade máxima, e que estes foram baixos em relação aos demais conjuntos compostos por barragem de montante de porte médio (C4 e C6). Isso se deve ao fato de não ter havido galgamento da barragem de jusante, tendo esta amortecido o volume vertido pela barragem de montante, de porte médio.

No conjunto C6 as velocidades aumentaram com uma certa constância a cada cenário, sendo o conjunto composto por barragem de montante de porte médio com maior valor de

velocidade, o que pode ser explicado pela grande área da bacia de contribuição, que levou o conjunto a receber altas vazões, principalmente nos cenários com precipitação, ocasionando ruptura em cascata.

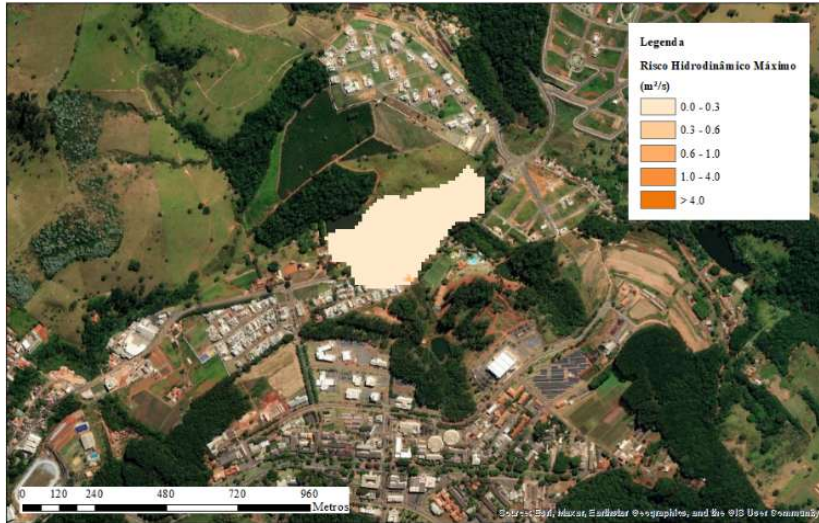
No conjunto C7, apesar de haver ruptura em cascata em todos os cenários, os valores de velocidade são baixos quando comparados aos do conjunto C6 e C8, por exemplo, e pouco se alteram com a precipitação. Isso ocorre pelo fato de o conjunto apresentar uma pequena área de contribuição da bacia hidrográfica, aliado ao baixo volume da barragem de jusante.

Nos conjuntos C8 e C9 nota-se que a precipitação pouco influenciou nos valores de velocidade máxima, que são maiores em C8, onde ocorre ruptura em cascata, do que em C9, onde não ocorre ruptura em cascata em nenhum cenário.

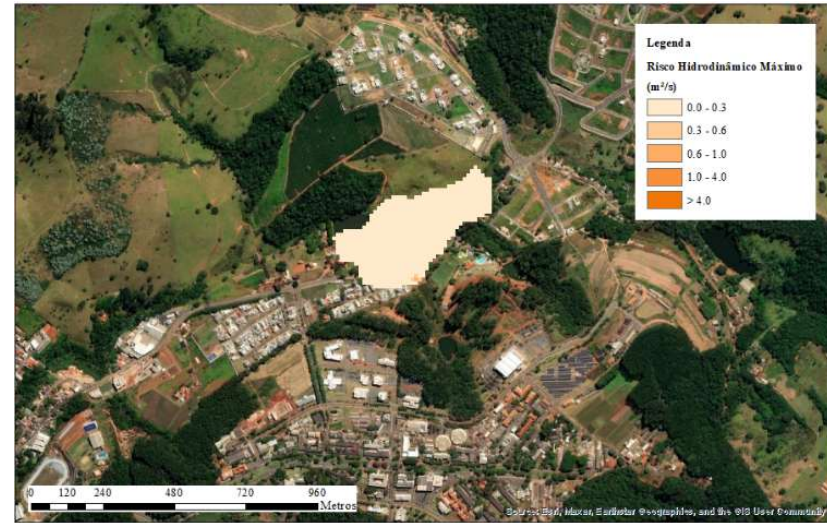
5.6 Mapas de Risco Hidrodinâmico Máximo

As manchas de inundação em relação ao risco hidrodinâmico máximo da onda de cheia gerada em cada cenário estão apresentadas nas Figuras 28 a 36.

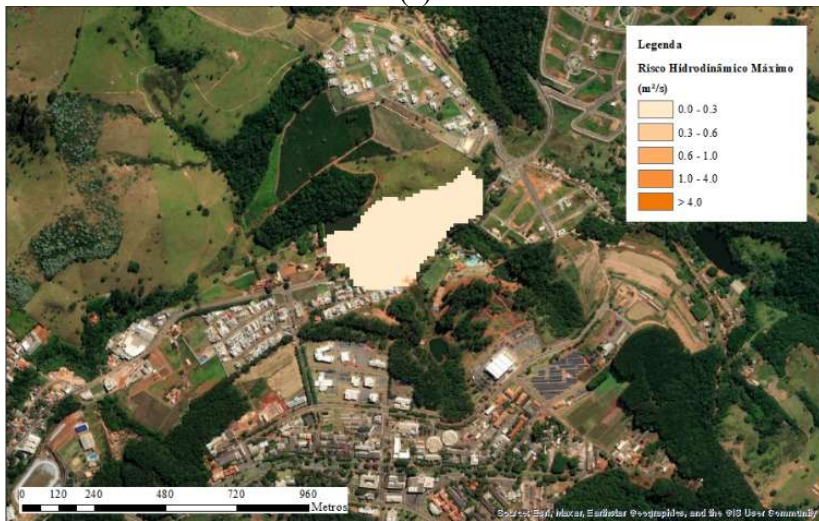
Figura 28 - Risco Hidrodinâmico Máximo do Conjunto 1: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.



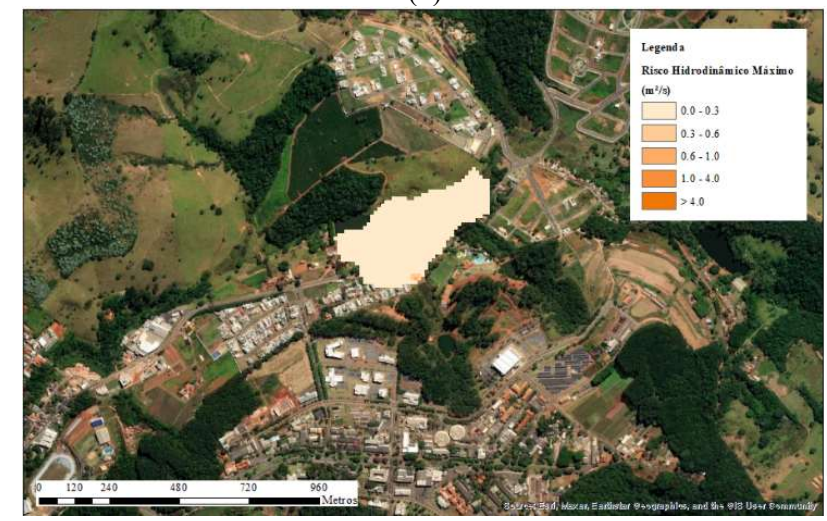
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Elaboração própria.

Figura 29 - Risco Hidrodinâmico Máximo do Conjunto 2: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.



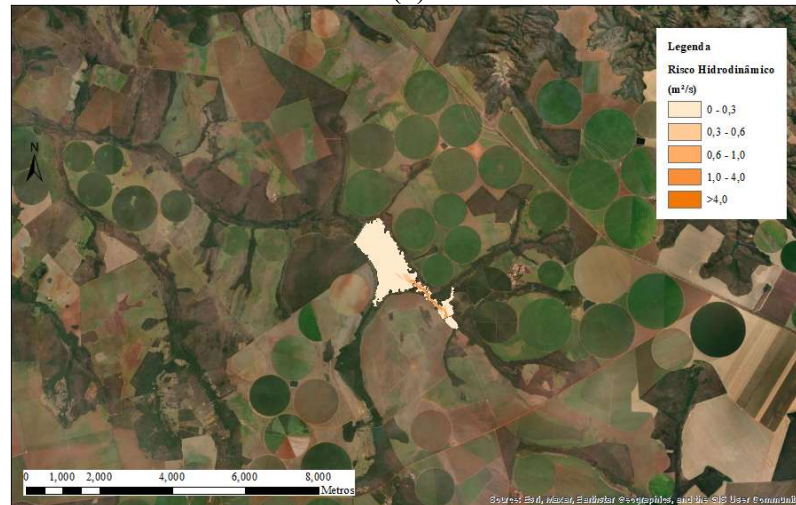
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Elaboração própria.

Figura 30 - Risco Hidrodinâmico Máximo do Conjunto 3: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.



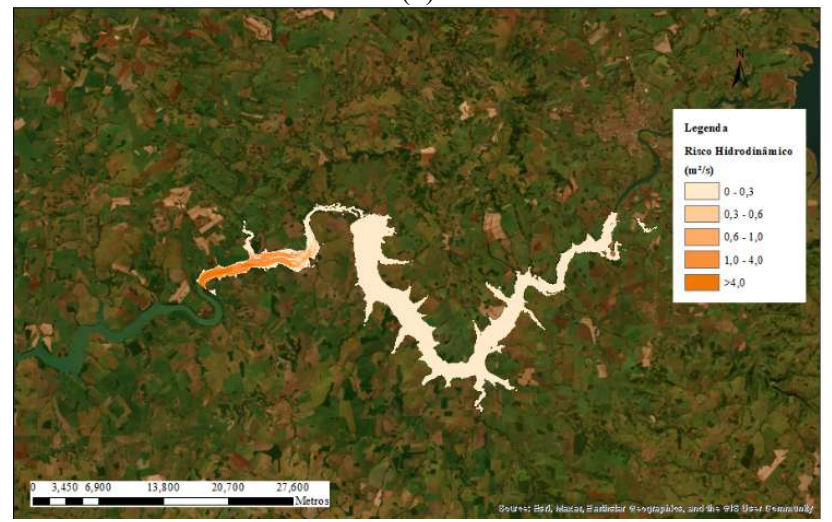
(a)



(b)



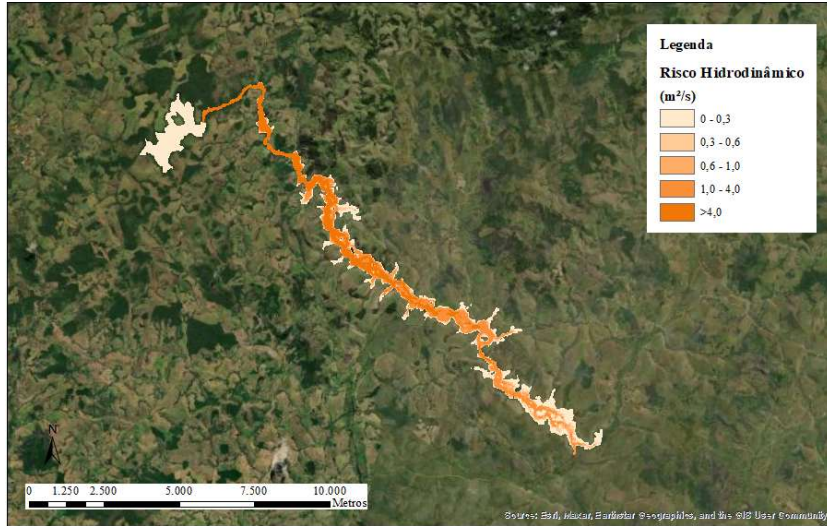
(c)



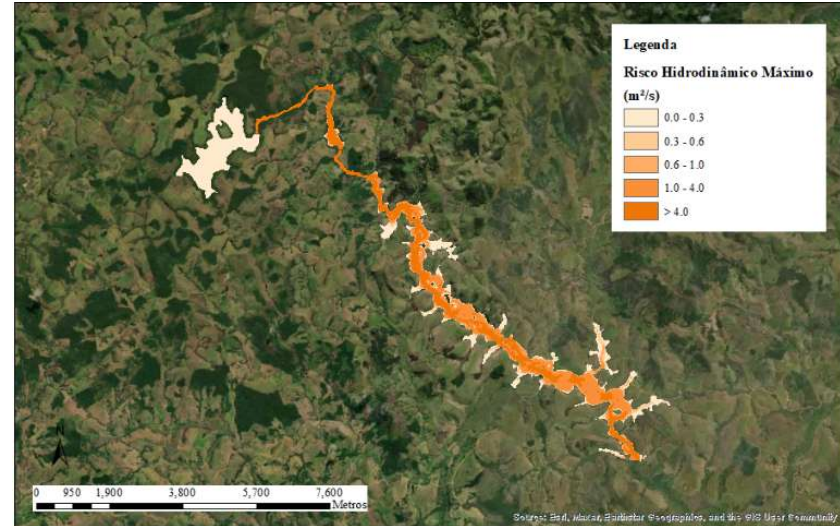
(d)

Fonte: Elaboração própria.

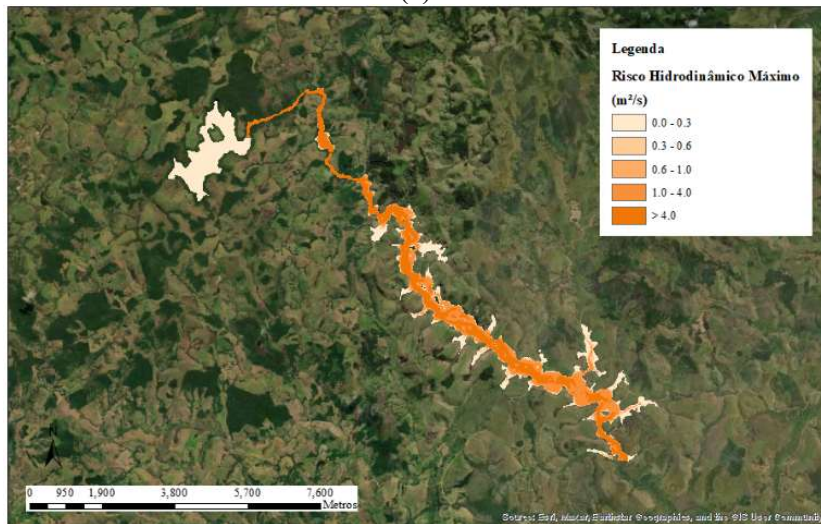
Figura 31 - Risco Hidrodinâmico Máximo do Conjunto 4: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.



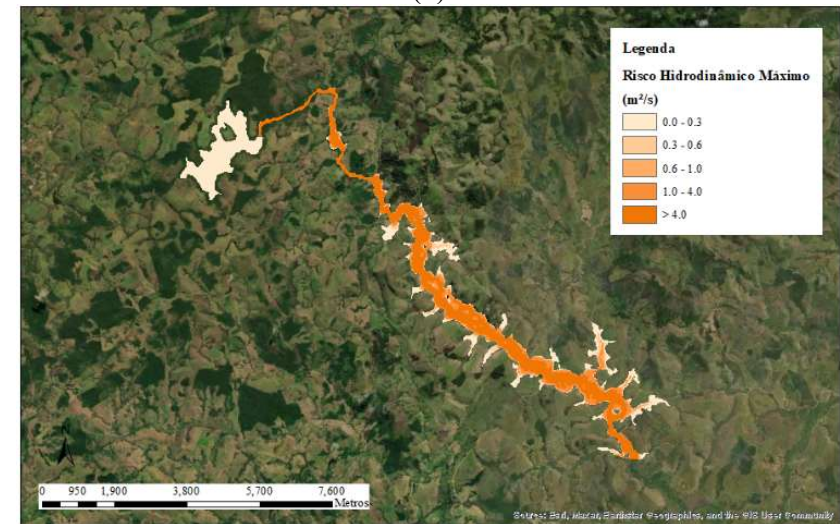
(a)



(b)



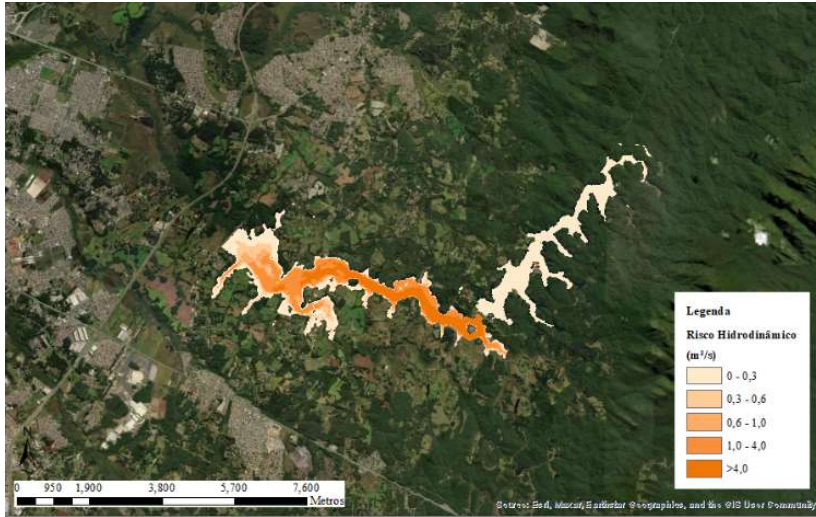
(c)



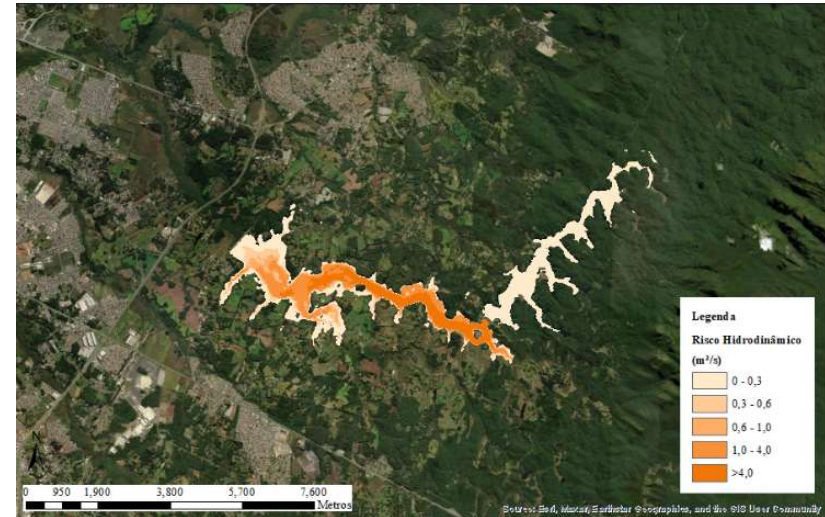
(d)

Fonte: Elaboração própria.

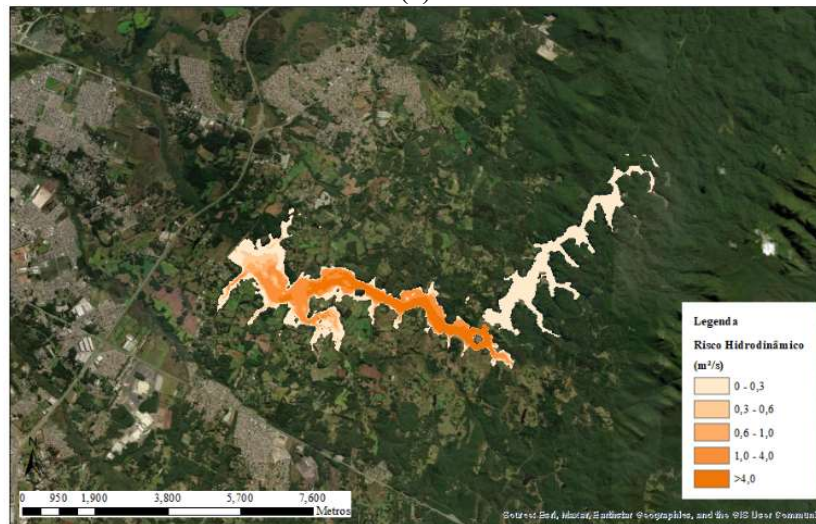
Figura 32 - Risco Hidrodinâmico Máximo do Conjunto 5: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.



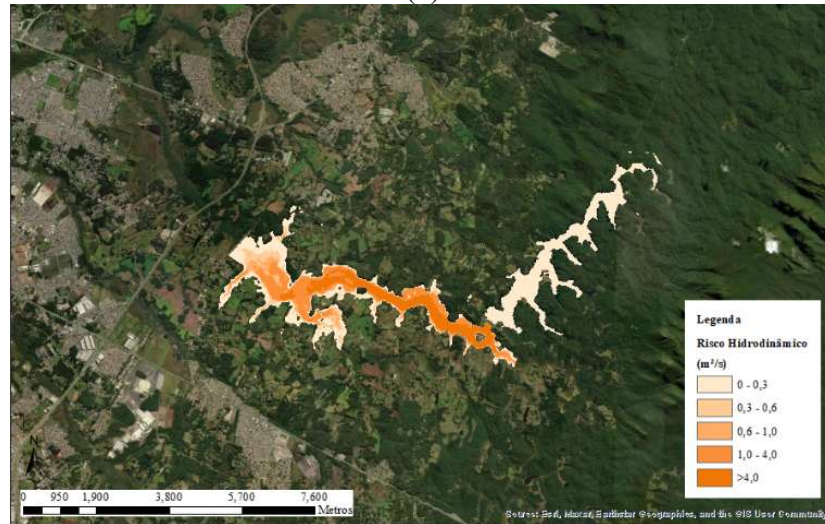
(a)



(b)



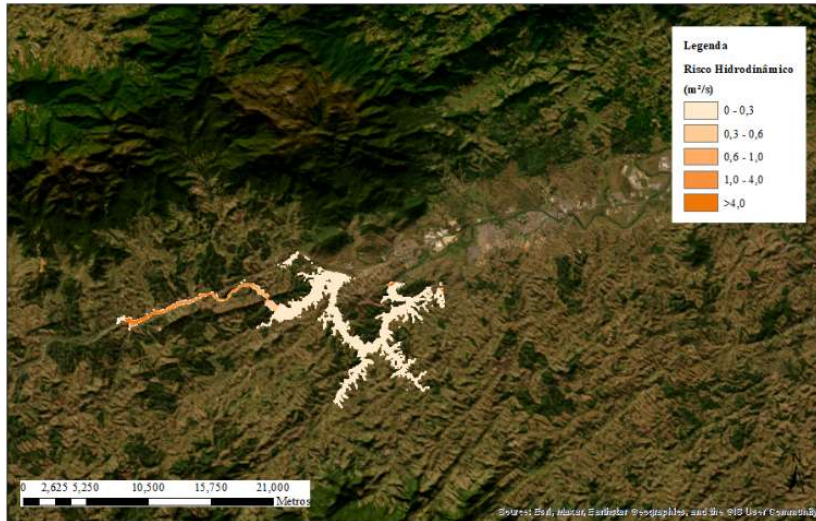
(c)



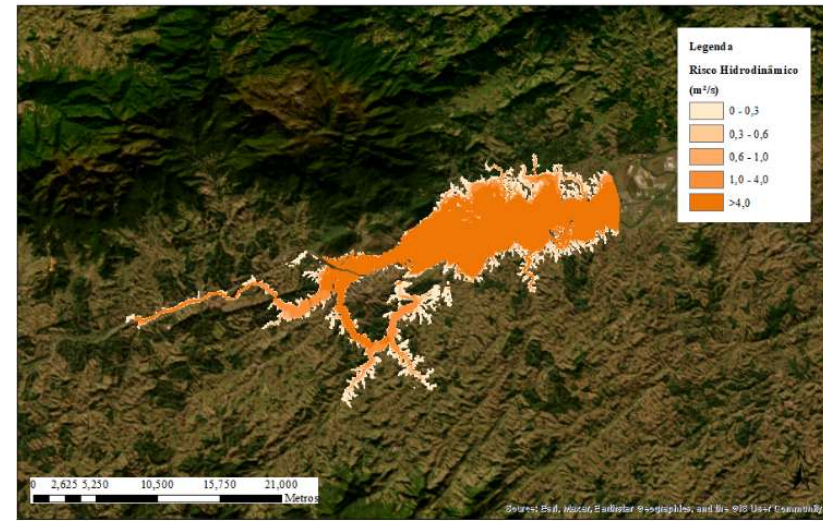
(d)

Fonte: Elaboração própria.

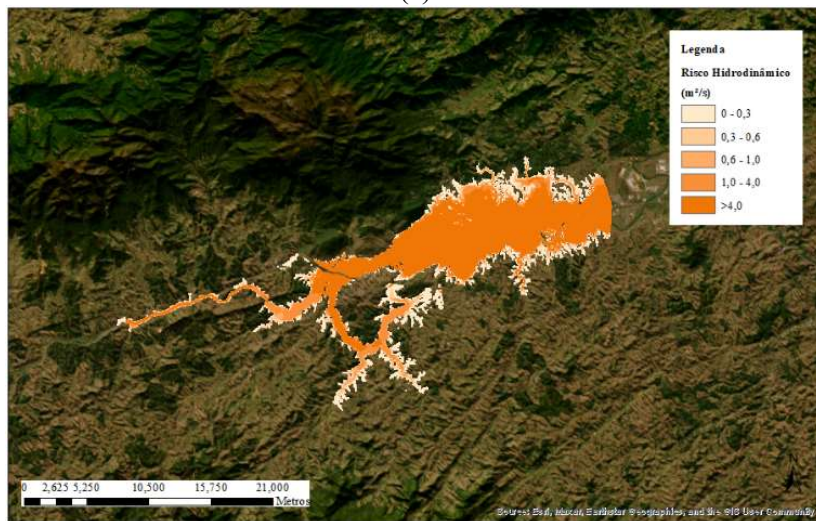
Figura 33 - Risco Hidrodinâmico Máximo do Conjunto 6: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.



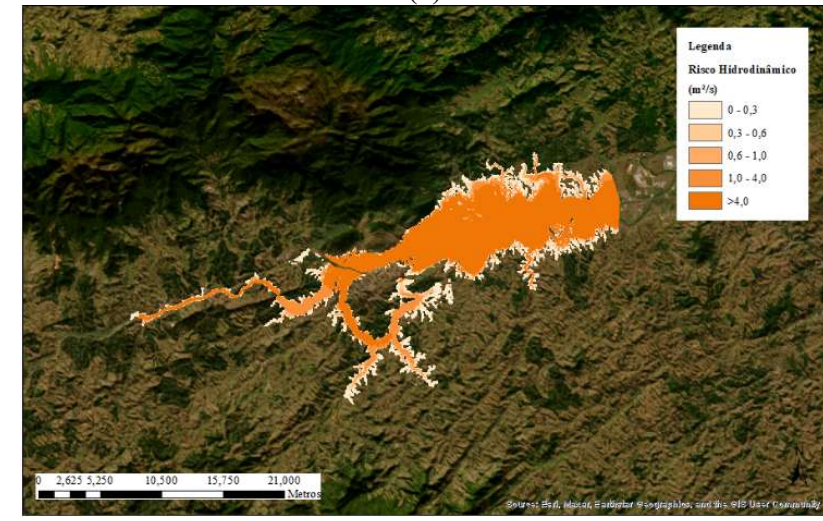
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Da autora (2026).

Figura 34 - Risco Hidrodinâmico Máximo do Conjunto 7: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Elaboração própria.

Figura 35 - Risco Hidrodinâmico Máximo do Conjunto 8: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.



(a)



(b)



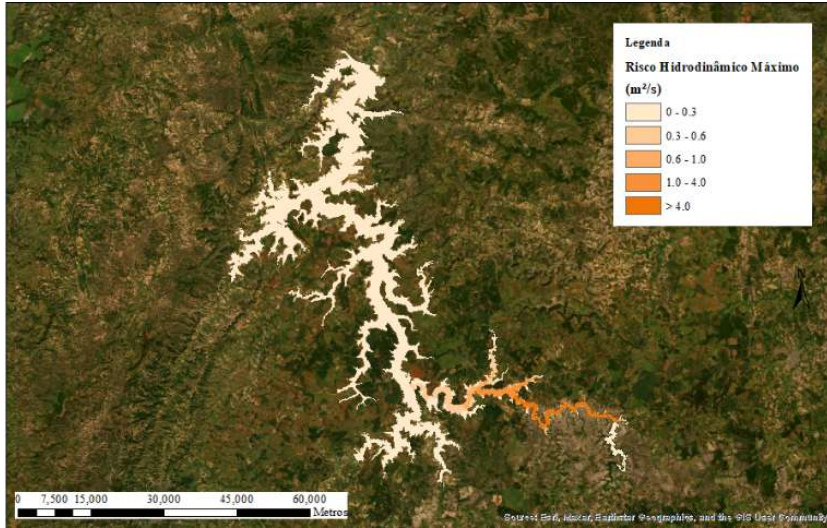
(c)



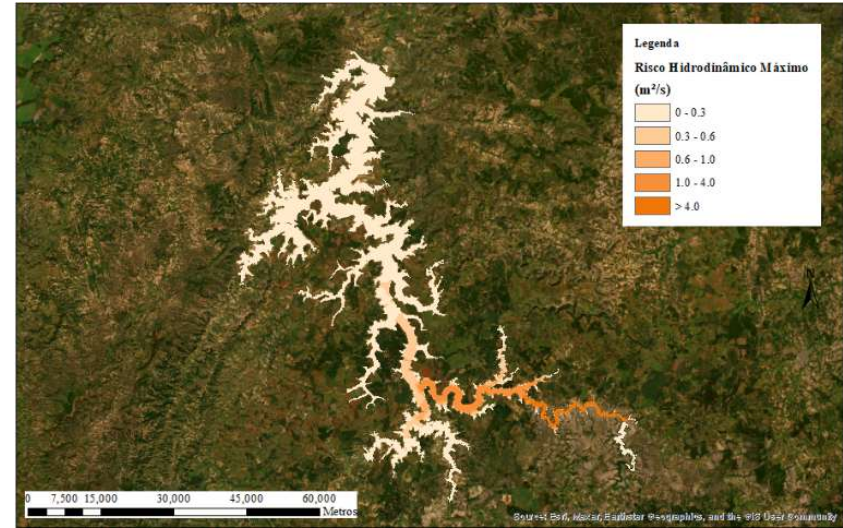
(d)

Fonte: Elaboração própria.

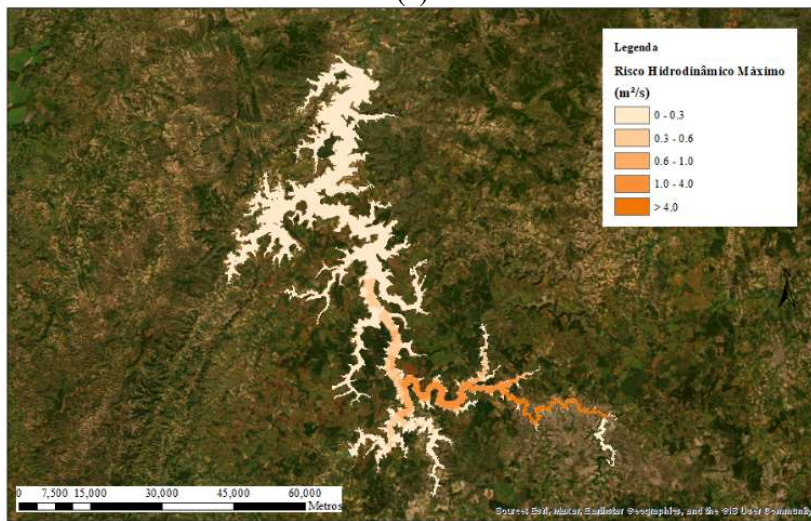
Figura 36 - Risco Hidrodinâmico Máximo do Conjunto 9: (a) cenário 1, (b) cenário 2, (c) cenário 3 e (d) cenário 4.



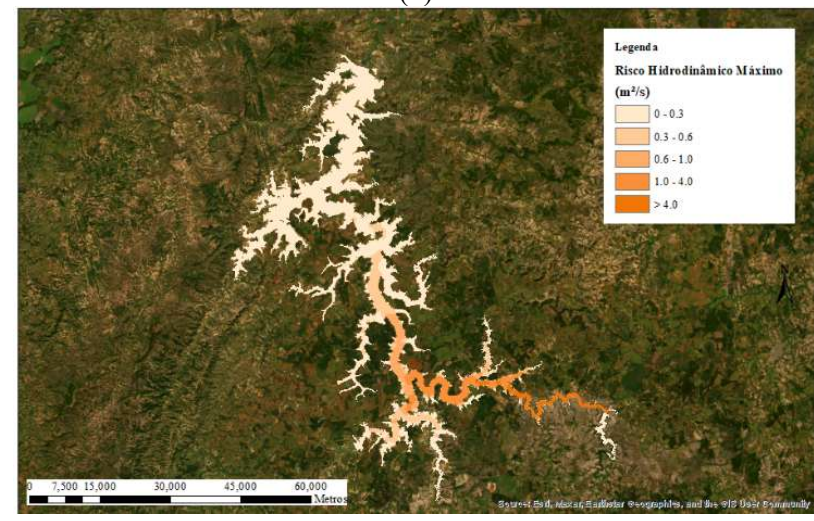
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Elaboração própria.

O quadro 15 apresenta os valores máximos de risco hidrodinâmico em cada simulação. É importante ressaltar que foram considerados apenas os valores da mancha de inundação que não pertencem a cursos hídricos ou áreas de reservatórios, locais em que não faz sentido avaliar o dano potencial associado, uma vez que já são inundados.

Quadro 15 – Valores máximos de risco hidrodinâmico (m²/s).

Cenário	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
1	0,70	0,23	0,16	40,54	17,36	11,00	51,27	163,85	38,39
2	0,71	1,81	1,15	44,25	17,57	181,99	51,34	163,85	38,39
3	0,71	2,50	1,41	45,66	17,63	184,53	51,38	163,85	38,39
4	0,84	4,76	1,28	48,14	18,00	189,48	51,49	163,85	38,39

Fonte: Elaboração própria.

Com base nos resultados apresentados no Quadro 15 pode-se notar que o risco hidrodinâmico associado ao rompimento de barragens de pequeno porte (Conjuntos C1, C2 e C3) é bem menor que o risco hidrodinâmico associado aos conjuntos de maior porte, independentemente da contribuição da precipitação.

Dentre os conjuntos de maior porte (C4 a C9), observa-se maiores valores de risco hidrodinâmico naqueles em que houve ruptura em cascata (C4, C6, C7 e C8). Para os conjuntos C5 e C9, a diferença de magnitudes é dada em função do porte da barragem de montante, que é médio em C5 e grande em C9.

Observando esses dados e analisando-os sob os critérios de Smith *et al.* (2014), pode-se afirmar que todos os cenários dos conjuntos C4 a C9, além do último cenário do conjunto C2, pertencem à zona de risco H6 (Inseguro para veículos e pessoas. Todos os tipos de edifícios considerados vulneráveis a falhas), os cenários 2, 3 e 4 do conjunto C3, bem como os cenários 2 e 3 do conjunto C2 estão inseridos na zona de risco H5 (Inseguro para veículos e pessoas. Todos os edifícios vulneráveis a danos estruturais. Alguns edifícios menos robustos sujeitos a falhas), todos os cenários do conjunto C1 estão inseridos na zona de risco H4 (Inseguro para veículos e pessoas) e o primeiro cenário dos conjuntos C2 e C3 estão inseridos na zona de risco H1 (Geralmente seguro para veículos, pessoas e edifícios.).

Cabe salientar que a classificação quanto ao dano potencial associado pelos critérios de Smith *et al.* (2014) não deve ser feita baseada em apenas um parâmetro, devendo ser analisados simultaneamente profundidade máxima, velocidade máxima e risco hidrodinâmico máximos em cada caso.

Dessa forma, todos os cenários do conjunto C1, bem como o primeiro cenário dos conjuntos C2 e C3 pertencem à zona de risco H5, enquanto todos os demais resultados se enquadram na zona de risco H6.

Por fim, a magnitude dos resultados, independente da classificação, mostra que os impactos gerados pelas barragens de pequeno porte são baixos quando comparados aos impactos das barragens maiores. Porém, as pequenas barragens são tratadas pela legislação com a mesma rigorosidade com que são tratadas as barragens de médio e grande porte.

5.7 Proposição Metodológica

No contexto da PNSB, a classificação quanto ao dano potencial associado é aplicada às barragens de forma individual, não contemplando explicitamente situações em que múltiplas estruturas se encontram dispostas em cascata ao longo de um mesmo curso d'água. Nesses sistemas, a interação hidráulica entre as barragens pode alterar a propagação da onda de cheia, resultando tanto na amplificação quanto na atenuação dos impactos a jusante, a depender do porte das estruturas, do volume armazenado e da geometria do vale, como foi ilustrado pelas simulações.

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam que, quando a barragem localizada a montante é de pequeno porte, observa-se, nos cenários simulados, uma amortização do volume vertido e dos parâmetros hidrodinâmicos associados. Essa amortização também pode ocorrer nos conjuntos de médio e grande porte, desde que a barragem de jusante tenha porte maior ou igual ao da barragem de montante, porém os parâmetros hidrodinâmicos associados a esses conjuntos apresentam maior magnitude.

Por outro lado, em conjuntos compostos por barragens de médio e grande porte, quando ocorre ruptura em cascata, a interação entre as estruturas pode resultar na intensificação local dos impactos, elevando ainda mais a magnitude dos parâmetros hidrodinâmicos.

Diante do exposto, tornam-se necessárias propostas de classificação quanto ao dano potencial associado voltadas especificamente para sistemas de barragens em cascata, considerando não apenas os impactos potenciais tradicionalmente previstos pela PNSB, mas também os níveis de risco hidrodinâmico resultantes da interação entre as estruturas. Essa abordagem pode contribuir para uma classificação mais representativa das condições reais de perigo, evitando tanto a subestimação quanto a superestimação dos impactos associados, especialmente em situações nas quais os parâmetros hidrodinâmicos indicam baixo potencial

destrutivo, mas os critérios atuais ainda enquadram os barramentos em categorias mais restritivas.

Inicialmente, seria interessante incorporar, como base para a classificação, o estudo de ruptura hipotética para todo o conjunto, rompendo inicialmente a barragem localizada à montante e observando o efeito dessa ruptura nos demais barramentos. Para um conjunto composto por três barragens em cascata, a proposta é que sejam feitos três estudos: um com ruptura hipotética da barragem localizada à montante, outro com ruptura hipotética da barragem intermediária e outro com ruptura hipotética da barragem localizada à jusante. Dessa forma seria possível avaliar o efeito de uma barragem sobre as demais, se haverá amortização da onda de cheia ou se esta causará galgamento nas demais estruturas, bem como os efeitos do conjunto no vale à jusante.

Além disso, uma forma de otimizar a veracidade da classificação seria considerar os critérios de Smith *et al.* (2014) para medir os danos do impacto causado pela inundação. Dessa forma, se a envoltória de inundação gerada pelo estudo de ruptura hipotética abranger áreas residenciais, comerciais, estradas ou rodovias, deve-se avaliar os valores dos parâmetros hidrodinâmicos nesses pontos a fim de averiguar qual nível de dano eles podem acarretar. Caso haja divergência entre as zonas de risco geradas por cada parâmetro, deverá prevalecer a de maior dano.

É importante ainda verificar o porte e a posição das estruturas no conjunto em cascata. Nesse sentido, propõe-se as seguintes alterações ao documento de classificação vigente da Resolução nº 143 do CNRH (2012) para que seja aplicado às barragens em cascata (Quadro 16).

Quadro 16 – Proposta de classificação quanto ao dano potencial associado para barragens em cascata.

(Continua)

Volume Total do Reservatório (a) Combinação de Volumes dos Reservatórios (a)	Potencial de perdas de vidas humanas (b)	Impacto ambiental (c)	Impacto socioeconômico (d)
Pequeno ← 5 milhões m ³ (+) BAIXO Barragem de jusante com porte superior ao porte da barragem de montante (1)	INEXISTENTE (não existem pessoas permanentes/residentes ou temporárias/transitando na área afetada a jusante da barragem) (0)	SIGNIFICATIVO (área afetada das barragens não representa área de interesse ambiental, áreas protegidas em legislação específica ou encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais) (3)	INEXISTENTE (não existem quaisquer instalações e serviços de navegação na área afetada por acidente das barragens) (0)

Quadro 16 – Proposta de classificação quanto ao dano potencial associado para barragens em cascata.

(Conclusão)

<p>Médio 5 milhões a 75 milhões m³ (2) MÉDIO Barragem de jusante com porte igual ao porte da barragem de montante (2)</p>	<p>POUCO FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local) (4) BAIXO (a área afetada a jusante da barragem abrange residências, comércios, rodovia municipal, estadual, federal ou outro local e/ou empreendimento, e a inundação tem classificação H1 segundo os critérios de Smith <i>et al.</i> (2014)) (4)</p>	<p>MUITO SIGNIFICATIVO (área afetada das barragens apresenta interesse ambiental relevante ou protegida em legislação específica) (5)</p>	<p>BAIXO (existe pequena concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura na área afetada das barragens ou instalações portuárias ou serviços de navegação) (4)</p>
<p>Grande 75 milhões a 200 milhões m³ (3) ALTO Barragem de jusante com porte inferior ao porte da barragem de montante (3)</p>	<p>FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal, estadual, federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas) (8) MÉDIO (a área afetada a jusante da barragem abrange residências, comércios, rodovia municipal, estadual, federal ou outro local e/ou empreendimento, e a inundação tem classificação H2 ou H3 segundo os critérios de Smith <i>et al.</i> (2014)) (8)</p>	-	<p>ALTO (existe grande concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais, de infraestrutura e serviços de lazer e turismo na área afetada das barragens ou instalações portuárias ou serviços de navegação) (8)</p>
<p>Muito Grande > 200 milhões m³ (5) -</p>	<p>EXISTENTE (existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas) (12) ALTO (a área afetada a jusante da barragem abrange residências, comércios, rodovia municipal, estadual, federal ou outro local e/ou empreendimento, e a inundação tem classificação H4, H5 ou H6 segundo os critérios de Smith <i>et al.</i> (2014)) (12)</p>	-	-

Fonte: Elaboração própria.

Dessa forma, propõe-se uma classificação mais eficaz e representativa no que diz respeito à previsibilidade dos danos e que leva em consideração a interação entre as estruturas, ao invés de analisar cada barragem de forma individual, de modo que possa ser utilizada para classificar os conjuntos de barragens em cascata.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo evidenciaram que a consideração da ruptura em cascata é fundamental para a adequada avaliação do DPA em sistemas de barragens. A análise dos diferentes cenários simulados demonstrou que a propagação da onda de ruptura pode ser amortizada ou intensificada pela interação entre estruturas, a depender da combinação de portes e posicionamentos das barragens dentro do sistema em cascata.

Analisando-se os resultados foi possível observar que os impactos gerados pelas barragens de pequeno porte são baixos quando comparados aos impactos das barragens de médio e grande porte, além de que, geralmente, o volume vertido pelas barragens de pequeno porte, quando estas estão à montante, é usualmente amortizado pela barragem de jusante.

Observou-se ainda que essa amortização pode ocorrer nos conjuntos de maior porte, desde que a barragem de jusante tenha porte maior ou igual ao porte da barragem de montante. Porém, quando essa condição não é observada, pode ocorrer o galgamento da estrutura de jusante e a intensificação dos parâmetros hidrodinâmicos, conseqüentemente ampliando os danos ao vale de jusante.

Outro achado importante é que, na maioria dos casos, a vazão advinda da precipitação, por mais extrema que seja, não causa significativa ampliação nos parâmetros hidrodinâmicos como se previa. Os conjuntos que apresentaram maior sensibilidade às vazões foram aqueles de menor porte das estruturas (C2 e C3) ou maior área da bacia de contribuição (C6).

A utilização do risco hidrodinâmico como parâmetro integrado mostrou-se particularmente eficiente na identificação de áreas de maior potencial destrutivo, permitindo uma avaliação mais abrangente dos impactos em comparação à análise isolada de profundidade ou velocidade.

Entretanto, destaca-se que os resultados estão sujeitos a incertezas inerentes à modelagem, incluindo a resolução do modelo digital de elevação e as simplificações adotadas nos modelos hidrológicos e hidrodinâmicos. Assim, recomenda-se que estudos futuros incorporem análises probabilísticas e avaliações de sensibilidade, visando maior robustez na estimativa dos impactos.

Além disso, os resultados obtidos permitiram propor uma adaptação metodológica para a avaliação do dano potencial associado em sistemas de barragens em cascata. Observou-se que a aplicação dos critérios atuais da PNSB, desenvolvidos para barragens avaliadas individualmente, pode não representar adequadamente os impactos reais observados em conjuntos de barragens, especialmente nos casos envolvendo estruturas de pequeno porte. Em

diversos cenários analisados, verificou-se que a barragem de jusante atuou como elemento amortecedor da onda de cheia, reduzindo significativamente os parâmetros hidrodinâmicos e os impactos à jusante, mesmo diante de cenários hidrológicos extremos. Dessa forma, propõe-se que a classificação de barragens em cascata incorpore estudos integrados de ruptura hipotética do conjunto, considerando a interação hidráulica entre as estruturas e parâmetros hidrodinâmicos como profundidade, velocidade e risco hidrodinâmico. Essa abordagem pode contribuir para classificações mais representativas das condições reais de perigo, evitando tanto a superestimação quanto a subestimação dos impactos associados.

Por fim, este trabalho contribui para o avanço das metodologias de análise do DPA ao incorporar os efeitos da ruptura em cascata, evidenciando a necessidade de abordagens mais integradas e realistas na avaliação da segurança de barragens. Os resultados obtidos podem subsidiar o aprimoramento de critérios normativos e auxiliar na tomada de decisão em políticas de gestão de riscos e segurança de barragens.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Modelagem hidrológica aplicada à gestão de recursos hídricos**. Brasília: ANA, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Relatório de segurança de barragens 2024-2025**. Brasília: ANA, 2025.

ALVES JUNIOR, Francisco Moreira; KOBIYAMA, Masato; CORSEUIL, Cláudia Weber. FLOOD RISK INDEX MAPPING OF AN AREA DOWNSTREAM OF A DAM IN CASE OF A BREAK. **Mercator**, Fortaleza, v. 22, apr. 2023. ISSN 1984-2201. Disponível em: <http://www.mercator.ufc.br/mercator/article/view/e22004>. Acesso em 10 fev. 2026.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). **45 barragens preocupam órgãos fiscalizadores, aponta Relatório de Segurança de Barragens elaborado pela ANA**. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/45-barragens-preocupam-orgaos-fiscalizadores-aponta-relatorio-de-seguranca-de-barragens-elaborado-pela-ana/grande_2071.jpg/@images/b9936b2d-e6a7-4139-a645-2c00ea6e6396.jpeg. Acesso em: 13 abril 2026.

BRASIL. Lei nº 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**, Poder Executivo, Brasília, DF, de 20 de setembro de 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm. Acesso em 24 jan. 2026.

BRASIL. Lei nº 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). **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, de 30 de setembro de 2020. em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14066.htm#art2. Acesso em: 24 jan. 2026.

CAMPOS, R. **Proposta de uma metodologia para obtenção de parâmetros de brechas em rupturas de barragens em cascata utilizando modelagem física**. 2020. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2020.

CARVALHO, Milena Cristina de Paula; VILELA SILVA, Luís Gustavo; SOUZA CÂNDIDO, Eduardo; DE MOURA LEÃO, Luisa; RESENDE LUIZ FIA, Fátima; CORNÉLIO RIBEIRO, André Geraldo. Análise de ruptura hipotética para barragens em cascata. **Ciência ET Praxis**, [S. l.], v. 19, n. 34, p. 64–82, 2024. DOI: 10.36704/cipraxis.v19i34.8062. Disponível em: <https://revista.uemg.br/praxys/article/view/8062>. Acesso em: 24 jan. 2026.

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS (CNRH). **Resolução nº 143, de 10 de julho de 2012**. Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume, em atendimento ao art. 7º da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Brasília, 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). **Relatório técnico sobre ocorrência envolvendo barragem de rejeitos no município de Itabirito – MG**. Brasília: DNPM, 2014.

ESTADO DE MINAS. **Minas que transbordaram ficam cerca de 20 km de distância uma da outra**. Belo Horizonte, 26 jan. 2026. Disponível em: <https://www.em.com.br/gerais/2026/01/7340686-minas-que-transbordaram-ficam-cerca-de-20km-de-distancia-uma-da-outra.html>. Acesso em: 5 de fevereiro de 2026.

FELL, R.; MACGREGOR, P.; STAPLEDON, D.; BELL, G. **Geotechnical engineering of dams**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015.

FROELICH, D. C. Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 134, n. 12, 2008. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:12\(1708\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:12(1708)). Acesso em: 24 jan. 2026.

GUMBEL, E. J. **Statistics of Extremes**. Columbia University Press, 1958.

HUFF, F. A. Time distribution of rainfall in heavy storms. **Water Resources Research**, v. 3, n. 4, p. 1007-1019, 1967. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/WR003i004p01007>. Acesso em 15 dez. 2025.

IBERDROLA. **Energia hidrelétrica: estudo geológico**. 2023. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/documents/20125/3765235/Estudiogeologico-746x419.jpg/add441ce-6e8f-ab77-fcc7-9cd2bc0ec9e6?t=1703071701906>. Acesso em: 13 abril 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Relatório de avaliação de impactos ambientais decorrentes do rompimento da barragem de Fundão**. Brasília: IBAMA, 2016.

ISTOÉ DINHEIRO. **Barragem de Forquilha 3 em alerta máximo de risco tem trincas superficiais, diz Vale**. 2019. Disponível em: <https://istoedinheiro.com.br/wp-content/uploads/sites/17/2024/09/barragem-forquilha-iii-da-vale-em-mg-1074x654-1.jpg>. Acesso em: 13 abril 2026.

JAAFAR, H.; AHMAD, F., 2019. **GCN250, global curve number datasets for hydrologic modeling and design**. figshare. Dataset. Disponível em: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.7756202.v1>. Acesso em 24 jan. 2026.

JUNIOR, Renato Steinke; KIPPER, Priscila Maria; FRAGA, Fernando de Oliveira; FERLA, Rute; MELO, José Falcão de; SMIDERLE, Camila de Souza Dahm; TORNIN, Cassiano Korndoerfer; SANAGIOTTO, Daniela Guzzon; ENDRES, Luiz Augusto Magalhães; MARQUES, Marcelo Giulian; PRÁ, Mauricio Dai; TEIXEIRA, Eder Daniel. **Mapa de risco hidrodinâmico: diferenças observadas entre simulações hidrodinâmicas com MDE livre e levantado em campo**. In: *II FluHidros e XVI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos (ENES)*. Porto Alegre: UFRGS, 2024.

LIMA, D. A. *et al.* Application of a simplified methodology for classification of small dams in cascade. **Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté,

v. 17, n. 1, e 2790, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2790>. Acesso em: 24 jan. 2026.

MORGENSTERN, N. R. *et al.* **Fundão tailings dam review panel: final report**. Vancouver: Independent Expert Panel, 2016.

Neto, L.V. **Estudo de ruptura da Barragem da Pampulha, em Belo Horizonte: Retroanálise da brecha do acidente de 1954 e ruptura hipotética nas condições atuais**. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 304 p. 2016.

NONATO, Letícia Maria de Siqueira; CARVALHO JUNIOR, Walter Corrêa; PAES, Rafael Pedrollo de. **Proposta para classificação de barragens de porte reduzido e uso múltiplo em Mato Grosso**. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 21., 2015. Anais [...]. [S.l.]: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2015.

OLIVEIRA, Josimar Alves de; CARNEIRO, Helton França; PERTUSATTI, Jonas; BARROS, Altair Maciel de; OLIVEIRA, Yagara Cristina Alves de. **Avaliação de impactos e risco associado ao rompimento de barragens usando o software DAMBREAK Model**. In: *XXXV Seminário Nacional de Grandes Barragens*, 2025, Porto Alegre – RS. Anais [...]. Porto Alegre: Comitê Brasileiro de Barragens, 2025. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Josimar-Oliveira/.../AVALIACAO-DE-IMPACTOS-E-RISCO-...-DAMBREAK-MODEL.pdf>. Acesso em: 24 jan. 26.

OLIVEIRA, L. C. S; NETO, I. E. L. Simulação do rompimento de barragens em cascata em uma bacia hidrográfica semiárida. **Revista DAE**, São Paulo, v. 70, n, 235, 203-216, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.36659/dae.2022.031>. Acesso em: 24 jan. 2026.

PEREIRA, A. S.; SILVA, A. F.; NÓBRIGA, S. L.; FARIA, M. M. Proposta de classificação de barragens quanto ao dano potencial associado para o estado de Roraima. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.3, p.679-695, 2021. Disponível em: <http://doi.org/10.6008/CBPC21796858.2021.003.0054>. Acesso em: 24 jan. 2026.

PEREIRA, A. M. *et al.* Análise da propagação de cheias resultante de rompimentos em cascata hipotéticos de barragens localizadas no município de Caruaru-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.17, n.1, 529-546, 2024. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>. Acesso em: 24 jan. 2026.

ROCHA, A. J. M. M. **Análise de sensibilidade dos parâmetros reológicos em software bidimensional para estudos de ruptura de barragem de rejeito**. 2025. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hídrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2025.

RONDÔNIA DINÂMICA. **Vale é multada por vazamentos em minas de Congonhas e Ouro Preto**. 2026. Disponível em: <https://www.rondoniadinamica.com/noticias/2026/01/vale-e-multada-por-vazamentos-em-minas-de-congonhas-e-ouro-preto%2C236840.shtml>. Acesso em: 5 de fevereiro de 2026.

ROSSI, C. L. C. U. **Proposta de abordagem simplificada para avaliação dos efeitos oriundos da ruptura de barragens**. 2020. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

ROSSI, C. *et al.* Dam-Break analysis: proposal of a simplified approach. **Brazilian Journal of Water Resources**. Porto Alegre, v. 26, n. 02, 1-15, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbrh/a/8BnG3BNbncVgqYG7Sd3hGqF/?format=pdf&lang=en>. Acesso em 24 jan. 2026.

SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS). **National Engineering Handbook: Section 4 – Hydrology**. Washington, DC: United States Department of Agriculture (USDA), 1972.

SMITH, G., DAVEY, E., COX, R. **Flood hazard**: WRL Technical Report 2014/07. Sydney: UNSW, 2014. Disponível em: <https://knowledge.aidr.org.au/media/2334/wrl-flood-hazard-technical-report-september-2014.pdf>. Acesso em 24 jan. 2026.

SILVA, Thalya Evelyn; ARAÚJO, Carmina Maria Gomes de; SOUSA, Francisco Jaquiel Vieira de; SAMPAIO, Francisco Jurimar Pereira; SILVA, Thiago Fernandes da. **Perspectivas futuras para a Política Nacional de Segurança de Barragens: melhorias e inovações**. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL*, 14., 2023, Natal. **Anais [...]**. Natal: IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2023. Disponível em: 10.55449/congea.14.23.V-021. Acesso em 24 jan. 26.

THOMPSON, F.; OLIVEIRA, J. G.; SILVA, L. F. **Tailings dam failures in Brazil: lessons learned from Mariana and Brumadinho**. *Resources Policy*, v. 67, 101688, 2020.

Turkel, A.O., Zaifoglu, H. & Yanmaz, A.M. Probabilistic modeling of dam failure scenarios: a case study of Kanlıkoy Dam in Cyprus. **Nat Hazards**, 120, 10087–10117, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06599-w>. Acesso em 10 fev. 26.

USACE – UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. *HEC-HMS Technical Reference Manual*. Davis: Hydrologic Engineering Center, 2016.

USBR. **DOWNSTREAM HAZARD CLASSIFICATION GUIDELINES**. Denver, Colorado, 1988. Disponível em: <https://mde.maryland.gov/programs/Water/DamSafety/Documents/Dam-Breach-Analysis/USBR-ACER-TM11-Downstream-Hazard-Classification-Guidelines.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2026.

VOROGUSHYN, S.; MERZ, B.; LALL, U.; BLÖSCHL, G. Systematic flood risk assessment: A review of concepts and methods. **Natural Hazards**, Dordrecht, v. 54, n. 3, p. 519–540, 2010.

WaterPower Magazine. Dam of 14 de Julho power plant in Brazil partially collapses. *International Water Power*, 2024. Disponível em: <https://www.waterpowermagazine.com/news/dam-of-14-de-julho-power-plant-in-brazil-partially-collapses-fatalities-reported-11737530/>. Acesso em: 5 de fevereiro de 2026.

WMO – WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. *Guide to Hydrological Practices*. 6. ed. Geneva: World Meteorological Organization, 2009. (WMO-No. 168).

APÊNDICES

APÊNDICE A – DADOS TÉCNICOS

Cascata	Barragem Montante				Barragem Jusante				i [%]
	Tipo	Hmáx [m]	L [m]	Volume (hm ³)	Tipo	Hmáx [m]	L [m]	Volume (hm ³)	
1	Terra	4,00	60,00	0,01	Terra	4,50	75,00	0,03	0,83
2	Terra	6,00	205,00	0,07	Terra	8,00	740,00	7,80	0,26
3	Terra	2,00	260,00	0,22	Terra	23,00	2900,00	519,00	0,09
4	Terra	28,00	155,00	21,80	Terra	12,75	85,00	0,20	1,57
5	Terra	30,00	280,00	25,00	Terra	17,00	900,00	20,08	0,13
6	Terra-Enrocamento	18,50	416,64	9,38	Terra	50,00	2560,00	8880,00	0,27
7	Terra	45,00	550,00	84,33	Terra	6,00	212,00	0,24	0,21
8	Terra	52,00	1630,00	284,50	Terra	30,00	1240,00	69,57	0,22
9	Terra	45,00	1351,67	241,59	Terra	61,20	2700,00	18855,30	0,14

APÊNDICE B – PARÂMETROS CHUVA DE PROJETO

Cascata	Parâmetros – Equação de Chuvas				A [km ²]	L [km]	So [m/km]	t [min]	I [mm/h]			P [mm]		
	K	a	b	c					TR 500	TR 1000	TR 10000	TR 500	TR 1000	TR 10000
1	755,9257	0,1519	9,7811	0,7241	0,09	0,79	78,27	11,24	214,18	237,96	337,61	40,11	44,56	63,22
2	779,2406	0,1191	9,7869	0,7243	13,87	6,20	18,71	66,28	70,89	76,99	101,28	78,31	85,04	111,88
3	734,6753	0,1223	9,7856	0,7242	3,10	3,79	7,65	64,39	69,46	75,60	100,20	74,54	81,14	107,53
4	741,5813	0,1463	9,7867	0,7242	326,17	50,95	6,18	363,66	25,25	27,94	39,13	153,02	169,35	237,19
5	732,9526	0,1938	9,7806	0,7241	26,47	10,85	46,45	70,88	101,75	116,37	181,83	120,20	137,48	214,80
6	764,9397	0,1364	9,7853	0,7242	12525,66	496,19	2,87	1994,79	7,25	7,97	10,91	241,09	265,00	362,78
7	708,0927	0,1887	9,7871	0,7243	106,03	21,46	9,04	185,17	50,21	57,23	88,37	154,95	176,61	272,71
8	1265,319	0,1368	15	0,7853	4058,44	202,19	1,90	1280,77	10,65	11,70	16,04	227,23	249,83	342,34
9	822,9826	0,1304	9,7863	0,7242	11188,85	411,71	1,29	2288,46	6,81	7,45	10,06	259,66	284,22	383,76

APÊNDICE C – HIETOGRAMAS

C1			TR = 500		TR = 1000		TR = 10000	
%t	1° Q	t [min]	P [mm]	ΔP [mm]	P [mm]	ΔP [mm]	P [mm]	ΔP [mm]
0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,05	0,16	0,56	6,42	6,42	7,13	7,13	10,12	10,12
0,1	0,33	1,12	13,24	6,82	14,70	7,58	20,86	10,75
0,15	0,43	1,69	17,25	4,01	19,16	4,46	27,18	6,32
0,2	0,52	2,25	20,86	3,61	23,17	4,01	32,87	5,69
0,25	0,6	2,81	24,06	3,21	26,74	3,56	37,93	5,06
0,3	0,66	3,37	26,47	2,41	29,41	2,67	41,72	3,79
0,35	0,71	3,93	28,48	2,01	31,64	2,23	44,89	3,16
0,4	0,75	4,49	30,08	1,60	33,42	1,78	47,41	2,53
0,45	0,79	5,06	31,68	1,60	35,20	1,78	49,94	2,53
0,5	0,82	5,62	32,89	1,20	36,54	1,34	51,84	1,90
0,55	0,84	6,18	33,69	0,80	37,43	0,89	53,10	1,26
0,6	0,86	6,74	34,49	0,80	38,32	0,89	54,37	1,26
0,65	0,88	7,30	35,29	0,80	39,21	0,89	55,63	1,26
0,7	0,9	7,86	36,10	0,80	40,10	0,89	56,90	1,26
0,75	0,92	8,43	36,90	0,80	41,00	0,89	58,16	1,26
0,8	0,94	8,99	37,70	0,80	41,89	0,89	59,43	1,26
0,85	0,96	9,55	38,50	0,80	42,78	0,89	60,69	1,26
0,9	0,97	10,11	38,90	0,40	43,22	0,45	61,32	0,63
0,95	0,98	10,67	39,31	0,40	43,67	0,45	61,96	0,63
1	1	11,24	40,11	0,80	44,56	0,89	63,22	1,26
C2			TR = 500		TR = 1000		TR = 10000	
%t	1° Q	t [min]	P [mm]	ΔP [mm]	P [mm]	ΔP [mm]	P [mm]	ΔP [mm]
0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,05	0,16	3,31	12,53	12,53	13,61	13,61	17,90	17,90
0,1	0,33	6,63	25,84	13,31	28,06	14,46	36,92	19,02
0,15	0,43	9,94	33,67	7,83	36,57	8,50	48,11	11,19
0,2	0,52	13,26	40,72	7,05	44,22	7,65	58,18	10,07
0,25	0,6	16,57	46,98	6,26	51,03	6,80	67,13	8,95
0,3	0,66	19,88	51,68	4,70	56,13	5,10	73,84	6,71
0,35	0,71	23,20	55,60	3,92	60,38	4,25	79,43	5,59
0,4	0,75	26,51	58,73	3,13	63,78	3,40	83,91	4,48
0,45	0,79	29,83	61,86	3,13	67,19	3,40	88,38	4,48
0,5	0,82	33,14	64,21	2,35	69,74	2,55	91,74	3,36
0,55	0,84	36,45	65,78	1,57	71,44	1,70	93,98	2,24
0,6	0,86	39,77	67,34	1,57	73,14	1,70	96,22	2,24
0,65	0,88	43,08	68,91	1,57	74,84	1,70	98,45	2,24
0,7	0,9	46,39	70,48	1,57	76,54	1,70	100,69	2,24
0,75	0,92	49,71	72,04	1,57	78,24	1,70	102,93	2,24
0,8	0,94	53,02	73,61	1,57	79,94	1,70	105,17	2,24
0,85	0,96	56,34	75,17	1,57	81,64	1,70	107,40	2,24
0,9	0,97	59,65	75,96	0,78	82,49	0,85	108,52	1,12
0,95	0,98	62,96	76,74	0,78	83,34	0,85	109,64	1,12
1	1	66,28	78,31	1,57	85,04	1,70	111,88	2,24

C3			TR = 500		TR = 1000		TR = 10000	
%t	1° Q	t [min]	P [mm]	ΔP [mm]	P [mm]	ΔP [mm]	P [mm]	ΔP [mm]
0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,05	0,16	3,22	11,93	11,93	12,98	12,98	17,20	17,20
0,1	0,33	6,44	24,60	12,67	26,78	13,79	35,48	18,28
0,15	0,43	9,66	32,05	7,45	34,89	8,11	46,24	10,75
0,2	0,52	12,88	38,76	6,71	42,19	7,30	55,91	9,68
0,25	0,6	16,10	44,73	5,96	48,68	6,49	64,52	8,60
0,3	0,66	19,32	49,20	4,47	53,55	4,87	70,97	6,45
0,35	0,71	22,54	52,93	3,73	57,61	4,06	76,34	5,38
0,4	0,75	25,76	55,91	2,98	60,85	3,25	80,65	4,30
0,45	0,79	28,98	58,89	2,98	64,10	3,25	84,95	4,30
0,5	0,82	32,20	61,13	2,24	66,53	2,43	88,17	3,23
0,55	0,84	35,42	62,62	1,49	68,16	1,62	90,32	2,15
0,6	0,86	38,63	64,11	1,49	69,78	1,62	92,47	2,15
0,65	0,88	41,85	65,60	1,49	71,40	1,62	94,62	2,15
0,7	0,9	45,07	67,09	1,49	73,02	1,62	96,78	2,15
0,75	0,92	48,29	68,58	1,49	74,65	1,62	98,93	2,15
0,8	0,94	51,51	70,07	1,49	76,27	1,62	101,08	2,15
0,85	0,96	54,73	71,56	1,49	77,89	1,62	103,23	2,15
0,9	0,97	57,95	72,31	0,75	78,70	0,81	104,30	1,08
0,95	0,98	61,17	73,05	0,75	79,51	0,81	105,38	1,08
1	1	64,39	74,54	1,49	81,14	1,62	107,53	2,15
C4			TR = 500		TR = 1000		TR = 10000	
%t	2° Q	t [min]	P [mm]	ΔP [mm]	P [mm]	ΔP [mm]	P [mm]	ΔP [mm]
0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,05	0,03	18,18	4,59	4,59	5,08	5,08	7,12	7,12
0,1	0,08	36,37	12,24	7,65	13,55	8,47	18,98	11,86
0,15	0,12	54,55	18,36	6,12	20,32	6,77	28,46	9,49
0,2	0,16	72,73	24,48	6,12	27,10	6,77	37,95	9,49
0,25	0,22	90,92	33,66	9,18	37,26	10,16	52,18	14,23
0,3	0,29	109,10	44,38	10,71	49,11	11,85	68,79	16,60
0,35	0,39	127,28	59,68	15,30	66,05	16,94	92,50	23,72
0,4	0,51	145,46	78,04	18,36	86,37	20,32	120,97	28,46
0,45	0,62	163,65	94,87	16,83	105,00	18,63	147,06	26,09
0,5	0,7	181,83	107,12	12,24	118,55	13,55	166,03	18,98
0,55	0,76	200,01	116,30	9,18	128,71	10,16	180,26	14,23
0,6	0,81	218,20	123,95	7,65	137,18	8,47	192,12	11,86
0,65	0,85	236,38	130,07	6,12	143,95	6,77	201,61	9,49
0,7	0,88	254,56	134,66	4,59	149,03	5,08	208,73	7,12
0,75	0,91	272,75	139,25	4,59	154,11	5,08	215,84	7,12
0,8	0,93	290,93	142,31	3,06	157,50	3,39	220,59	4,74
0,85	0,95	309,11	145,37	3,06	160,89	3,39	225,33	4,74
0,9	0,97	327,30	148,43	3,06	164,27	3,39	230,07	4,74
0,95	0,99	345,48	151,49	3,06	167,66	3,39	234,82	4,74
1	1	363,66	153,02	1,53	169,35	1,69	237,19	2,37

C5			TR = 500		TR = 1000		TR = 10000	
%t	1° Q	t [min]	P [mm]	ΔP [mm]	P [mm]	ΔP [mm]	P [mm]	ΔP [mm]
0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,05	0,16	3,54	19,23	19,23	22,00	22,00	34,37	34,37
0,1	0,33	7,09	39,67	20,43	45,37	23,37	70,88	36,52
0,15	0,43	10,63	51,69	12,02	59,12	13,75	92,36	21,48
0,2	0,52	14,18	62,50	10,82	71,49	12,37	111,70	19,33
0,25	0,6	17,72	72,12	9,62	82,49	11,00	128,88	17,18
0,3	0,66	21,26	79,33	7,21	90,74	8,25	141,77	12,89
0,35	0,71	24,81	85,34	6,01	97,61	6,87	152,51	10,74
0,4	0,75	28,35	90,15	4,81	103,11	5,50	161,10	8,59
0,45	0,79	31,90	94,96	4,81	108,61	5,50	169,69	8,59
0,5	0,82	35,44	98,56	3,61	112,73	4,12	176,14	6,44
0,55	0,84	38,98	100,97	2,40	115,48	2,75	180,43	4,30
0,6	0,86	42,53	103,37	2,40	118,23	2,75	184,73	4,30
0,65	0,88	46,07	105,77	2,40	120,98	2,75	189,03	4,30
0,7	0,9	49,62	108,18	2,40	123,73	2,75	193,32	4,30
0,75	0,92	53,16	110,58	2,40	126,48	2,75	197,62	4,30
0,8	0,94	56,71	112,99	2,40	129,23	2,75	201,91	4,30
0,85	0,96	60,25	115,39	2,40	131,98	2,75	206,21	4,30
0,9	0,97	63,79	116,59	1,20	133,36	1,37	208,36	2,15
0,95	0,98	67,34	117,79	1,20	134,73	1,37	210,51	2,15
1	1	70,88	120,20	2,40	137,48	2,75	214,80	4,30
C6			TR = 500		TR = 1000		TR = 10000	
%t	4° Q	t [h]	P [mm]	ΔP [mm]	P [mm]	ΔP [mm]	P [mm]	ΔP [mm]
0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,05	0,02	1,66	4,82	4,82	5,30	5,30	7,26	7,26
0,1	0,05	3,32	12,05	7,23	13,25	7,95	18,14	10,88
0,15	0,08	4,99	19,29	7,23	21,20	7,95	29,02	10,88
0,2	0,1	6,65	24,11	4,82	26,50	5,30	36,28	7,26
0,25	0,13	8,31	31,34	7,23	34,45	7,95	47,16	10,88
0,3	0,16	9,97	38,58	7,23	42,40	7,95	58,05	10,88
0,35	0,19	11,64	45,81	7,23	50,35	7,95	68,93	10,88
0,4	0,22	13,30	53,04	7,23	58,30	7,95	79,81	10,88
0,45	0,25	14,96	60,27	7,23	66,25	7,95	90,70	10,88
0,5	0,28	16,62	67,51	7,23	74,20	7,95	101,58	10,88
0,55	0,32	18,29	77,15	9,64	84,80	10,60	116,09	14,51
0,6	0,35	19,95	84,38	7,23	92,75	7,95	126,97	10,88
0,65	0,39	21,61	94,03	9,64	103,35	10,60	141,49	14,51
0,7	0,45	23,27	108,49	14,47	119,25	15,90	163,25	21,77
0,75	0,51	24,93	122,96	14,47	135,15	15,90	185,02	21,77
0,8	0,59	26,60	142,25	19,29	156,35	21,20	214,04	29,02
0,85	0,72	28,26	173,59	31,34	190,80	34,45	261,20	47,16
0,9	0,84	29,92	202,52	28,93	222,60	31,80	304,74	43,53
0,95	0,92	31,58	221,81	19,29	243,80	21,20	333,76	29,02
1	1	33,25	241,09	19,29	265,00	21,20	362,78	29,02

C7			TR = 500		TR = 1000		TR = 10000	
%t	1° Q	t [min]	P [mm]	ΔP [mm]	P [mm]	ΔP [mm]	P [mm]	ΔP [mm]
0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,05	0,16	9,26	24,79	24,79	28,26	28,26	43,63	43,63
0,1	0,33	18,52	51,13	26,34	58,28	30,02	90,00	46,36
0,15	0,43	27,78	66,63	15,50	75,94	17,66	117,27	27,27
0,2	0,52	37,03	80,58	13,95	91,84	15,89	141,81	24,54
0,25	0,6	46,29	92,97	12,40	105,96	14,13	163,63	21,82
0,3	0,66	55,55	102,27	9,30	116,56	10,60	179,99	16,36
0,35	0,71	64,81	110,02	7,75	125,39	8,83	193,63	13,64
0,4	0,75	74,07	116,22	6,20	132,45	7,06	204,53	10,91
0,45	0,79	83,33	122,41	6,20	139,52	7,06	215,44	10,91
0,5	0,82	92,58	127,06	4,65	144,82	5,30	223,62	8,18
0,55	0,84	101,84	130,16	3,10	148,35	3,53	229,08	5,45
0,6	0,86	111,10	133,26	3,10	151,88	3,53	234,53	5,45
0,65	0,88	120,36	136,36	3,10	155,41	3,53	239,99	5,45
0,7	0,9	129,62	139,46	3,10	158,95	3,53	245,44	5,45
0,75	0,92	138,88	142,56	3,10	162,48	3,53	250,90	5,45
0,8	0,94	148,13	145,66	3,10	166,01	3,53	256,35	5,45
0,85	0,96	157,39	148,76	3,10	169,54	3,53	261,80	5,45
0,9	0,97	166,65	150,30	1,55	171,31	1,77	264,53	2,73
0,95	0,98	175,91	151,85	1,55	173,07	1,77	267,26	2,73
1	1	185,17	154,95	3,10	176,61	3,53	272,71	5,45
C8			TR = 500		TR = 1000		TR = 10000	
%t	3° Q	t [h]	P [mm]	ΔP [mm]	P [mm]	ΔP [mm]	P [mm]	ΔP [mm]
0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,05	0,03	1,07	6,82	6,82	7,50	7,50	10,27	10,27
0,1	0,06	2,13	13,63	6,82	14,99	7,50	20,54	10,27
0,15	0,09	3,20	20,45	6,82	22,49	7,50	30,81	10,27
0,2	0,12	4,27	27,27	6,82	29,98	7,50	41,08	10,27
0,25	0,15	5,34	34,08	6,82	37,48	7,50	51,35	10,27
0,3	0,19	6,40	43,17	9,09	47,47	9,99	65,04	13,69
0,35	0,23	7,47	52,26	9,09	57,46	9,99	78,74	13,69
0,4	0,27	8,54	61,35	9,09	67,46	9,99	92,43	13,69
0,45	0,32	9,61	72,71	11,36	79,95	12,49	109,55	17,12
0,5	0,38	10,67	86,35	13,63	94,94	14,99	130,09	20,54
0,55	0,45	11,74	102,25	15,91	112,43	17,49	154,05	23,96
0,6	0,57	12,81	129,52	27,27	142,41	29,98	195,13	41,08
0,65	0,7	13,88	159,06	29,54	174,88	32,48	239,63	44,50
0,7	0,79	14,94	179,51	20,45	197,37	22,49	270,44	30,81
0,75	0,85	16,01	193,15	13,63	212,36	14,99	290,99	20,54
0,8	0,89	17,08	202,24	9,09	222,35	9,99	304,68	13,69
0,85	0,92	18,14	209,05	6,82	229,85	7,50	314,95	10,27
0,9	0,95	19,21	215,87	6,82	237,34	7,50	325,22	10,27
0,95	0,97	20,28	220,42	4,54	242,34	5,00	332,07	6,85
1	1	21,35	227,23	6,82	249,83	7,50	342,34	10,27

C9			TR = 500		TR = 1000		TR = 10000	
%t	4° Q	t [h]	P [mm]	ΔP [mm]	P [mm]	ΔP [mm]	P [mm]	ΔP [mm]
0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,05	0,02	1,91	5,19	5,19	5,68	5,68	7,68	7,68
0,1	0,05	3,81	12,98	7,79	14,21	8,53	19,19	11,51
0,15	0,08	5,72	20,77	7,79	22,74	8,53	30,70	11,51
0,2	0,1	7,63	25,97	5,19	28,42	5,68	38,38	7,68
0,25	0,13	9,54	33,76	7,79	36,95	8,53	49,89	11,51
0,3	0,16	11,44	41,55	7,79	45,48	8,53	61,40	11,51
0,35	0,19	13,35	49,34	7,79	54,00	8,53	72,91	11,51
0,4	0,22	15,26	57,13	7,79	62,53	8,53	84,43	11,51
0,45	0,25	17,16	64,91	7,79	71,06	8,53	95,94	11,51
0,5	0,28	19,07	72,70	7,79	79,58	8,53	107,45	11,51
0,55	0,32	20,98	83,09	10,39	90,95	11,37	122,80	15,35
0,6	0,35	22,88	90,88	7,79	99,48	8,53	134,32	11,51
0,65	0,39	24,79	101,27	10,39	110,85	11,37	149,67	15,35
0,7	0,45	26,70	116,85	15,58	127,90	17,05	172,69	23,03
0,75	0,51	28,61	132,43	15,58	144,95	17,05	195,72	23,03
0,8	0,59	30,51	153,20	20,77	167,69	22,74	226,42	30,70
0,85	0,72	32,42	186,96	33,76	204,64	36,95	276,31	49,89
0,9	0,84	34,33	218,11	31,16	238,75	34,11	322,36	46,05
0,95	0,92	36,23	238,89	20,77	261,49	22,74	353,06	30,70
1	1	38,14	259,66	20,77	284,22	22,74	383,76	30,70

APÊNDICE D – PARÂMETROS HEC-HMS

Cascata	CN	t lag
1	79	6,74
2	78	39,77
3	79	38,63
4	83	218,20
5	78	42,53
6	82	1196,87
7	86	111,10
8	82	768,46
9	82	1373,07