

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Rodrigo Perdigão Gomes Bezerra

**AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DE INCERTEZAS RELACIONADAS A PARÂMETROS
DE BRECHA E COEFICIENTES DE RUGOSIDADE NA MODELAGEM HIDRODINÂMICA
BIDIMENSIONAL DE INUNDAÇÕES**

Belo Horizonte
2022

Rodrigo Perdigão Gomes Bezerra

AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DE INCERTEZAS RELACIONADAS A PARÂMETROS DE BRECHA E COEFICIENTES DE RUGOSIDADE NA MODELAGEM HIDRODINÂMICA BIDIMENSIONAL DE INUNDAÇÕES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Hidráulica e Recursos Hídricos.

Linha de pesquisa: Modelagem física e matemática em hidráulica.

Orientador: Prof. Julian Cardoso Eleutério

Belo Horizonte
2022

B574a	<p>Bezerra, Rodrigo Perdigão Gomes. Avaliação probabilística de incertezas relacionadas a parâmetros de brecha e coeficientes de rugosidade na modelagem hidrodinâmica bidimensional de inundações [recurso eletrônico] / Rodrigo Perdigão Gomes Bezerra. – 2022. 1 recurso online (124 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Julian Cardoso Eleutério.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexos: f. 105-124.</p> <p>Bibliografia: f. 101-104. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Recursos hídricos - Desenvolvimento - Teses. 3. Incerteza - Teses. 4. Python (Linguagem de programação de computador) - Teses. 5. Inundações - Teses. I. Eleutério, Julian Cardoso. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p>
-------	---

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
[ESCOLA DE ENGENHARIA]
COLEGIADO DO CURSO DE GRADUAÇÃO / PÓS-GRADUAÇÃO EM [SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS
HÍDRICOS]

FOLHA DE APROVAÇÃO

Avaliação Probabilística de Incertezas Relacionadas A Parâmetros de Brecha e Coeficientes de Rugosidade Na Modelagem Hidrodinâmica Bidimensional de Inundações

RODRIGO PERDIGÃO GOMES BEZERRA

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof. Julian Cardoso Eleutério

Prof. Francisco Eustáquio Oliveira e Silva

Prof. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva

Prof. Pedro Luiz Borges Chaffe

Aprovada pelo Colegiado do PPG SMARH

Versão Final aprovada por

Prof^ª. Sonaly Cristina Rezende Borges de Lima

Prof. Julian Cardoso Eleutério

Coordenadora

Orientador

Belo Horizonte, 24 de maio de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Luiz Borges Chaffe, Usuário Externo**, em 24/05/2022, às 12:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Cauduro Dias de Paiva, Usuário Externo**, em 24/05/2022, às 12:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Francisco Eustaquio Oliveira e Silva, Professor do Magistério Superior**, em 24/05/2022, às 12:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Julian Cardoso Eleuterio, Servidor(a)**, em 25/05/2022, às 08:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Priscilla Macedo Moura, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 20/09/2022, às 08:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1473662** e o código CRC **94DFF3EB**.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a UFMG, CAPES, FAPEMIG e CNPq pelo amparo concedido para o desenvolvimento da pesquisa. Agradeço aos meus pais, Rogério e Valéria, que desde sempre batalharam arduamente para garantir as melhores condições possíveis para que eu pudesse me desenvolver profissionalmente e nunca hesitaram em cobrir a minha vida e a dos meus irmãos de muito amor e suporte. Nunca conseguirei retribuir o quão grato sou a vocês. Aos meus irmãos, Rogério Filho e Raphael, parceiros da minha vida toda. Muito obrigado por serem quem são e por todo carinho e apoio.

Agradeço à Prof.^a Cleuda, aos professores Marllus e Ruberto. Agradeço imensamente ao meu orientador Julian Eleutério que acolheu as ideias de pesquisa que trouxe e pôde direcionar meu projeto para uma abordagem científica pertinente e que me permitiu adquirir muito conhecimento técnico. Aos professores Éber, Francisco, Véber e Wilson com os quais adquiri diversos aprendizados relevantes quanto aos conhecimentos de programação, hidrologia e estatística.

Amplio meus agradecimentos aos diversos amigos que estiveram próximos a mim nos últimos anos. Aos amigos que trouxe de minha vivência em Maceió, em especial a Altair Maciel, Wallisson, Jáder, Cayo, Letícia e Thainá. Aos amigos que fiz na HIDROBR e foram muito importantes em meu processo de obtenção de conhecimento em estudos de inundação, em especial a Ana Araújo, Anna Marina, Clara Demattos, Guilherme, Luís, Ana Oliveira e Pedro Solha. Aos amigos e mestres que tenho hoje na Pimenta de Ávila, em especial a Flávia Alves e HÉlvio Felizberto.

Agradeço ainda aos amigos que estiveram junto comigo durante meu mestrado. Aos amigos do grupo de pesquisa de inundações, em especial a Alexandre Ângelo por todo suporte, parceria e pela gentileza ao me permitir continuar os estudos por ele desenvolvidos, ao André e a Malena também pelas diversas trocas enriquecedoras que tivemos. Agradeço também aos queridos amigos de minha turma de mestrado sem os quais eu não conseguiria concluir esse ciclo, em especial ao meu grande amigo David Jimenez, ao Alan, Thomaz, Bruna, Vitória e Alexandre Braga. Sou muito grato por tê-los comigo nessa caminhada.

RESUMO

O mapeamento probabilístico de inundações permite se considerar as incertezas relacionadas à modelagem hidrodinâmica de forma a atribuir probabilidades de ocorrência aos resultados simulados. Dentre as fontes de incertezas relacionadas a modelagens hidrodinâmicas analisadas, pode-se destacar as incertezas relacionadas aos dados topobatimétricos, ao coeficiente de rugosidade de Manning e aos parâmetros da brecha, em casos de rompimento de barragens. Com o intuito de analisar tais incertezas de forma probabilística com mais eficiência e abrangência, a automatização de processos da modelagem hidrodinâmica se torna um mecanismo bastante vantajoso (DYSARZ, 2018; HAMOUDA, 2018; PAPAIONNOU et al., 2017). Nesse sentido, o presente estudo propõe uma análise do impacto de incertezas relacionadas aos parâmetros de brecha de ruptura na modelagem hidrodinâmica bidimensional de inundações decorrentes do rompimento de barragens de terra. Para isso, é proposta uma ferramenta desenvolvida em Python que permite a automatização do modelo bidimensional da ferramenta HEC-RAS para aplicação do Método de Monte Carlo (MMC). A rotina computacional é estruturada de forma a variar os dados de entrada do modelo (i.e: tempo de formação, altura, largura, inclinação da brecha de ruptura e coeficiente de rugosidade de Manning) conforme distribuições probabilísticas selecionadas, além de executar as simulações automaticamente e manipular os dados de saída avaliando a sensibilidade do modelo aos parâmetros estudados por meio de métricas em escala global, regional e local. A validação da ferramenta desenvolvida é feita por meio de um estudo de caso de rompimento de barragens proposto pelo ICOLD (ZENZ & GOLDGRUBER, 2013) que trata de uma barragem hipotética projetada em uma região montanhosa, localizada 3,5 km a montante de uma área urbana.

Palavras-chave: HEC-RAS; Incertezas; Python.

ABSTRACT

Probabilistic flood inundations maps allow to considerate uncertainties related to a hydrodynamic modeling as a probability of occurrence of the results. Among the sources of uncertainty related to a model, it can be highlighted uncertainties related to Manning coefficient, topobathymetric data and breach parameters when dealing with dam break studies. To analyze such uncertainties in a probabilistic efficient and comprehensive way, programming tools applied to dynamic processes becomes a very significant mechanism (DYSARZ, 2018; HAMOUDA, 2018; PAPAIONNOU et al., 2017). This study analyse the impact of uncertainties related to breach and resistance parameters in two-dimensional hydrodynamics modeling of a dam break scenario. A tool developed in Python is proposed to automate HEC-RAS two-dimensional model for the application of Monte Carlo Method (MMC). The computational routine is structured in such a way that it varies the model input data (i.e: formation time, height, width and slope of the dam breach, Manning Coefficient) according to a selected probability distribution, run automatic simulations and manipulates output data evaluating the model sensitivity through measurements on a global, regional and local scale. The validation of the developed tool is done through a dam failure case study proposed by ICOLD (ZENZ & GOLDGRUBER, 2013) which present a hypothetical dam located in a mountainous region, 3,5 km upstream an urban area.

Keywords: HEC-RAS; Uncertainties; Python.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Fluxograma de des. de estudo de ruptura hipotética de barragem.	19
Figura 3.2 – Mapa de inundação probab. incertezas hidrológicas e hidráulicas.	27
Figura 3.3 – Mapa de inundação probabilístico e envoltória determinística.	29
Figura 3.4 – Esquema metodológico de mapeamento probab. com método PEM....	30
Figura 3.5 – Esquema metodológico de mapeamento probabilístico considerando incertezas em parâmetros hidrológicos e hidrodinâmicos.	31
Figura 4.1 - Esquema de etapas metodológicas adotados no estudo.	43
Figura 4.2 - Esquema da metodologia utilizada para automatização de simulações: Variação de coeficiente de rugosidade.	44
Figura 4.3 – Exemplo de dados de uso e ocupação do solo com classes originais e com o acréscimo de classes alternativas.	45
Figura 4.4 – Identificação de resultados da mod. hidrodinâmica em arquivo HDF5..	49
Figura 4.5 - Esquema da metodologia utilizada para automatização de simulações: Variação de parâmetros de brecha.	50
Figura 4.6 – Identificação de arquivo de plano de simulação (.p01).	51
Figura 4.7 – Identificação de parâmetros de brecha na interface do HEC-RAS.....	51
Figura 4.8 – Identificação de hidrograma de ruptura na saída do modelo(.p01.hdf).	53
Figura 4.9 – Identificação de resultados da mod. hidrodinâmica em arquivo HDF5..	53
Figura 4.10 – Fluxograma metodológico aplicado para ajuste de distribuições probabilísticas aos parâmetros de brecha.....	60
Figura 4.11 – Vista frontal do reservatório analisado no estudo de caso.	62

Figura 4.12 – Vista traseira do reservatório analisado no estudo de caso.	62
Figura 4.13 - Planta geral da área de estudo.	63
Figura 4.14 - Seção transversal do maciço da barragem avaliado.....	63
Figura 4.15 – Curva Cota-Volume do reservatório analisado.....	64
Figura 4.16 - Mapa hipsométrico da área de estudo.	65
Figura 4.17 - Mapa de uso e cobertura do solo da área de estudo.....	66
Figura 4.18 – Zonas urbanas da área de estudo.....	67
Figura 4.19 - Esquema metodológico adotado no estudo de caso.....	68
Figura 4.20 - Hidrograma de ruptura gerado para cenário fixo com variação de coeficiente de rugosidade de Manning.....	69
Figura 4.21 - Modelo hidrodinâmico configurado para estudo de caso	72
Figura 4.22 - Seções definidas na área de estudo.	76
Figura 4.23 – Pontos de referências adotados em análise local.	77
Figura 5.1 – Diagrama de caixa de áreas inundadas:Coef.rugosidade de Manning. 79	
Figura 5.2 - Diagrama de caixa de áreas inundadas:Parâmetros de brecha.....	80
Figura 5.3 – Perfis com quantis de níveis d’água simulados: variação de coeficiente de rugosidade de Manning.	82
Figura 5.4 – Perfis com quantis de níveis d’água simulados: variação de parâmetros de brecha de ruptura.	84
Figura 5.5 – Resultados de análise local: Manning (Estabelecimento Comercial). ...	85
Figura 5.6 – Resultados de análise local: Manning (Centro Empresarial).....	86

Figura 5.7 – Resultados de análise local: Manning (Área Residencial).....	86
Figura 5.8 – Resultados de análise local: Brecha (Estabelecimento Comercial).....	87
Figura 5.9 – Resultados de análise local: Brecha (Centro Empresarial).	88
Figura 5.10 – Resultados de análise local: Brecha (Área Residencial).	88
Figura 5.13 – Áreas de inundação para diferentes prob. de excedência: Manning...90	
Figura 5.14 – Mapa de Inundação Probabilístico com incertezas no coeficiente de rugosidade de Manning.....	92
Figura 5.15 - Áreas de inundação para diferentes prob. de excedência: Brecha.....	93
Figura 5.16 - Mapa de Inundação Probabilístico com incertezas nos parâmetros de brecha de ruptura.	94
Figura C.1 – Envoltória de Inundação – Probabilidade de Excedência 95%.	114
Figura C.2 – Envoltória de Inundação – Probabilidade de Excedência 90%.	115
Figura C.3 – Envoltória de Inundação – Probabilidade de Excedência 50%.	116
Figura C.4 – Envoltória de Inundação – Probabilidade de Excedência 20%.	117
Figura C.5 – Envoltória de Inundação – Probabilidade de Excedência 10%.	118
Figura D.1 – Ajuste de coeficientes de rugosidade de Manning as distribuições probabilísticas adotadas para cada um dos tipos de uso e cobertura do solo.	121
Figura D.2 - Ajuste de parâmetros de brecha de ruptura as distribuições probabilísticas adotadas.....	122
Figura E.1 – Diagramas de Caixa de Tempo Computacional: MMC Manning x MMC Brecha.....	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Limites de aplicação de equacionamentos empíricos para estimativa de parâmetros de brecha de ruptura.	21
Tabela 3.2 – Síntese de aplicações com variação de parâmetros hidrológicos.	26
Tabela 3.3 - Síntese de aplicações com variação de parâmetros hidrológicos.	31
Tabela 3.4 - Síntese de aplicações com variação de parâmetros hidrológicos.	35
Tabela 4.1 – Estatística descritiva das amostras dos parâmetros de brecha.	59
Tabela 4.2 – Distribuições probab. de melhor ajuste aos parâmetros de brecha.	61
Tabela 4.3 – Características gerais da barragem em análise.	64
Tabela 4.4 – Classificação de uso e cobertura do solo conforme padrão NLCD.	66
Tabela 4.5 – Descrição das zonas urbanas da área de estudo.	67
Tabela 4.6 – Tipos de uso e cobertura do solo identificados na área de estudo e respectivos parâmetros de distribuições probabilísticas.	70
Tabela 4.7 – Parâmetros das distribuições probabilísticas utilizadas para amostragem de parâmetros de brecha.	71
Tabela 4.8 – Síntese dos parâmetros do modelo hidrodinâmico configurado.	74
Tabela 5.1 – Quantis de vazão e tempo de pico dos hidrogramas de ruptura simulados considerando os cenários em que cada parâmetro foi mais crítico.	80
Tabela 5.2 – Áreas de inundação associadas a diferentes probabilidades de excedência: MMC Coeficiente de Rugosidade de Manning.	90
Tabela 5.3 – Áreas de inundação associadas a diferentes probabilidades de excedência: MMC Parâmetros de Brecha.	93

LISTA DE ABREVIATURAS

B - Largura média da brecha

El.fundo - Cota de fundo da brecha

FEMA - Federal Emergency Management Agency

HB - Altura da Brecha

Hd - Altura da barragem

ICOLD - International Commission on Large Dams

L_{Bf} Largura de fundo da brecha

L_{Bt} Largura de topo da brecha

L_{crista} Largura de crista

LHS – Latin hypercube sampling / Amostragem por hipercubo latino

MMC - Método de Monte Carlo

NLCD - National Land Cover Database

PEM - Point Estimate Method / Método de Estimativa Pontual

T_f - Tempo de Formação da brecha

USACE - United States Army Corps of Engineers

USBR - United States Bureau of Reclamation

Z - Declividade da parede latera da brecha

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	17
3	REVISÃO DE LITERATURA	18
3.1	Estudo de ruptura hipotética de barragens	18
3.2	Modelagens hidrodinâmicas com análise do impacto de incertezas	24
3.3	Técnicas de automatização de modelos hidrodinâmicos	36
3.4	Modelo hidrodinâmico HEC-RAS	38
4	METODOLOGIA	42
4.1	Desenvolvimento de Ferramenta Probabilística	43
4.2	Escolha de distribuições de probabilidades	56
4.3	Estudo de caso	61
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	78
5.1	Análise geral de parâmetros hidrodinâmicos	78
5.2	Análise regional de parâmetros hidrodinâmicos	80
5.3	Análise local de parâmetros hidrodinâmicos	85
5.4	Mapas de Inundação Probabilísticos	89
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	95
	REFERÊNCIAS	101
	APÊNDICE A – ALG. MMC VARIAÇÃO DE MANNING	105
	APÊNDICE B – ALG. MMC VARIAÇÃO DE PARÂMETROS DE BRECHA... ..	109
	APÊNDICE C – ENVOLTÓRIAS PROBABILÍSTICAS DE INUNDAÇÃO	113
	APÊNDICE D - AVALIAÇÃO DE DEMANDA COMPUTACIONAL	119
	APÊNDICE E - AVALIAÇÃO DE DEMANDA COMPUTACIONAL	123

1 INTRODUÇÃO

O mapeamento de inundações é uma ferramenta indispensável à gestão do risco. Tradicionalmente, esse estudo é feito de forma determinística com o intuito de se analisar impactos em cenários pré-definidos, comumente associados a probabilidades de ocorrência de hidrológica naturais. Para inundações não-naturais, ou tecnológicas, geralmente a análise é puramente determinística. Contudo, incertezas de diversas ordens são inerentes aos fenômenos naturais e tecnológicos e, conseqüentemente, aos estudos que buscam compreendê-los.

No que concerne a modelagem hidrodinâmica em cenários de inundações naturais, estudos recentes apontam principalmente para incertezas relacionadas aos parâmetros hidrodinâmicos, com ênfase no coeficiente de rugosidade de Manning, e aos dados topobatimétricos (CANDELA *et al.*, 2016; LIU *et al.*, 2018; JUNG *et al.*, 2012; OUBENACEUR *et al.*, 2018). Por outro lado, no mapeamento de inundações decorrentes de falhas tecnológicas, estudos recentes apontam para as incertezas presentes em parâmetros de área/volume de reservatório, além de parâmetros de brecha gerada tais como largura, inclinação lateral e tempo de formação (KIM *et al.*, 2016; TSAI *et al.*, 2019; TSCHIEDEL *et al.*, 2018; SILVA, 2021, YU *et al.*, 2015).

Abordagens determinísticas tendem a representar de maneira incompleta os riscos potenciais dificultando uma avaliação objetiva de incertezas e de danos associados à ocorrência de inundações (KHERADMAND *et al.*, 2018). Já o mapeamento probabilístico de inundações permite se considerar essas incertezas com o intuito de também atribuir ao mapeamento, probabilidades de ocorrência associadas às incertezas existentes (PAPAIOANNOU *et al.*, 2017). Recentemente, uma maior atenção é dada a esse tipo de mapeamento que, apesar de mais rigoroso, ainda apresenta vários desafios práticos e científicos.

Um dos grandes desafios enfrentados para o mapeamento probabilístico de inundações é a execução de múltiplas simulações de modelos hidrodinâmicos tendo em vista a aplicação de métodos de variação tais como o tradicional método de Monte Carlo, métodos de perturbação (PEM) ou o método da amostragem por hipercubo latino (LHS). Dessa forma, algoritmos de programação para automatização e controle de modelos hidrodinâmicos se tornam importantes

ferramentas para viabilizar aplicações probabilísticas de mapeamento de inundações.

O desenvolvimento de técnicas de mapeamento probabilístico de inundações levando em consideração incertezas em múltiplos parâmetros é recente e lacunas importantes são identificadas na literatura, principalmente quando se trata de inundações decorrentes de falhas de obras hidráulicas. Destaca-se a escassez de estudos com foco na automatização de modelos hidrodinâmicos bidimensionais tendo em vista que a ampla maioria dos estudos encontrados na literatura fazem uso de modelos truncados para obter hidrogramas probabilísticos a serem propagados em modelos completos. Além disso, ressalta-se a lacuna de estudos que abordam a análise de sensibilidade de modelos hidrodinâmicos bidimensionais considerando incertezas associadas a parâmetros de brecha de e do vale de jusante conjuntamente.

Nesse contexto, o presente trabalho objetiva ampliar a possibilidade de análise de incertezas por meio de simulações probabilísticas que levem em consideração múltiplos parâmetros, possibilitando também comparação entre diferentes fontes de incerteza.

O trabalho se insere na sequência do estudo desenvolvido por Silva (2021) que teve como objetivo a identificação de distribuições probabilísticas para os parâmetros de brecha de ruptura com base em registros de casos históricos de ruptura em barragens de terra, além da estimativa de hidrogramas defluentes de um estudo de ruptura hipotética de barragem de terra tomando uma abordagem probabilística.

Assim, é proposta uma metodologia para mapeamento probabilístico de inundações provenientes de rompimentos de barragens considerando as imprecisões nos parâmetros de brecha de ruptura e no coeficiente de rugosidade de Manning. O desenvolvimento metodológico se fundamenta nos conceitos referentes ao mapeamento de inundação para desenvolvimento de uma ferramenta computacional em Python que permite a aplicação do Método de Monte Carlo associado ao modelo bidimensional do programa HEC-RAS de modo a realizar múltiplas simulações considerando a variação dos parâmetros de entrada segundo distribuições probabilísticas pré-selecionadas e a análise da variação dos parâmetros

hidrodinâmicos modelados. Etapas parciais do desenvolvimento dessa ferramenta foram apresentadas em publicações recentes (BEZERRA, ELEUTÉRIO e MELO, 2021; BEZERRA e ELEUTÉRIO, 2021; SILVA, BEZERRA e ELEUTÉRIO, 2021).

Contando com esse capítulo introdutório que aborda a contextualização geral da problemática indicando avanços recentes e lacunas existentes na literatura, essa dissertação conta com um total de sete capítulos e três apêndices. O segundo capítulo aborda os objetivos gerais e específicos da pesquisa desenvolvida. O terceiro capítulo apresenta uma revisão de literatura com os principais conceitos, estado da arte do tema pesquisado e aspectos técnicos do modelo hidrodinâmico utilizado no trabalho. O quarto capítulo aborda a metodologia adotada para o desenvolvimento da ferramenta computacional proposta e para a validação dessa ferramenta no estudo de caso selecionado. O quinto capítulo apresenta os resultados obtidos para o estudo de caso realizado considerando abrangências locais, regionais e gerais. Por fim, o sexto capítulo apresenta as considerações finais a respeito do trabalho, indicando limitações e novas perspectivas com base no que foi aqui desenvolvido. Nos Apêndices A e B são apresentados integralmente os algoritmos computacionais desenvolvidos para a aplicação do Método de Monte Carlo com variação do coeficiente de rugosidade de Manning e dos parâmetros de brecha respectivamente. O Apêndice C apresenta as envoltórias de inundação associadas a diferentes probabilidades de ocorrência comparando as variações com o coeficiente de rugosidade de Manning e com os parâmetros de brecha de ruptura.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é desenvolver uma ferramenta que permita o mapeamento probabilístico de inundações considerando incertezas relacionadas aos parâmetros de brecha e ao coeficiente de rugosidade de Manning na modelagem hidrodinâmica bidimensional de inundações decorrentes de rompimentos de barragens.

2.2 Objetivos Específicos

Seus objetivos específicos são:

- Desenvolvimento de algoritmo computacional que possibilita o mapeamento probabilístico de inundações decorrentes do rompimento de barragens considerando as incertezas associadas aos parâmetros de brecha de ruptura e ao coeficiente de rugosidade de Manning;
- Análise da sensibilidade de modelagem hidrodinâmica bidimensional de ruptura de barragens de terra aos parâmetros de brecha e ao coeficiente de rugosidade de Manning considerando os impactos gerados nas áreas inundadas, profundidades de escoamento e tempos de chegada da onda de ruptura.

3 REVISÃO DE LITERATURA

O estudo de inundações decorrentes da ruptura hipotética de barragens é fundamental para o planejamento e gestão do risco, orientando uma série de políticas públicas tais como planos de evacuação, resgate de fauna, proteção e minimização dos potenciais impactos em áreas afetadas pela mancha de inundação.

Um produto fundamental do estudo de rompimento hipotético de barragens consiste no mapeamento hidrodinâmico de inundações potenciais sobre uma região com o intuito de identificar áreas potencialmente impactadas pelo escoamento, além de condições de profundidade, velocidade, risco hidrodinâmico e tempo de chegada da onda de modo a subsidiar o desenvolvimento dos planos anteriormente citados.

Diversos parâmetros utilizados no mapeamento hidrodinâmico de inundações estão sujeitos a incertezas sejam eles associados a configuração da brecha de ruptura, tais como largura, altura e tempo de formação da brecha, ou sejam eles associados a características do vale de jusante da área de estudo como parâmetros de resistência e topografia. Apesar de não ser tradicionalmente quantificado, o impacto dessas imprecisões nos resultados hidrodinâmicos tais como área inundada, profundidade de escoamento e tempo de chegada da onda de ruptura tende a ser elevado e a afetar significativamente os planos de ação desenvolvidos (KIM *et al.*, 2016; TSAI *et al.*, 2019).

Os itens seguintes abordam conceitos sobre estudos de ruptura hipotética de barragens, o estado da arte de mapeamentos de inundações com análises de incertezas associadas, técnicas de automatização de modelos hidrodinâmicos e aspectos teóricos do modelo utilizado no presente trabalho.

3.1 Estudo de ruptura hipotética de barragens

Para a elaboração de estudos de ruptura hipotética de barragens, diversas considerações e premissas precisam ser realizadas. A Figura 3.1 apresenta um fluxograma de desenvolvimento desse tipo de estudo sintetizando quatro principais etapas que são apresentadas nos itens seguintes.

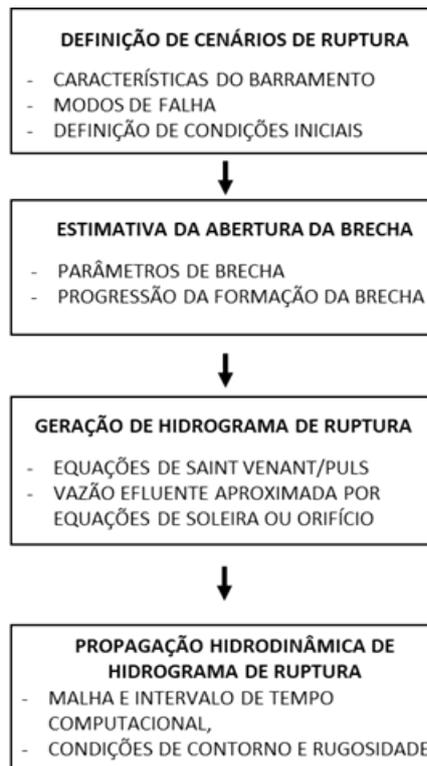


Figura 3.1 – Fluxograma de desenvolvimento de estudo de ruptura hipotética de barragem.

3.1.1 Definição de Cenários de Ruptura

Como ponto de partida do estudo do rompimento hipotético de barragens, a definição do(s) cenário(s) de ruptura tem como objetivo identificar possíveis modos de falha da estrutura que podem estar relacionados a características da barragem tais como estado de conservação, material de construção e modo de operação de estruturas vertentes. Por meio da verificação da capacidade do sistema extravasor descarregar um evento de cheia de projeto afluente, por exemplo, pode ser avaliada a suscetibilidade de um barramento a ocorrência de galgamento levando a consideração ou não dessa hipótese como um cenário de ruptura.

Nesse sentido, avalia-se a ocorrência de diferentes modos de falha do barramento (e.g: galgamento, erosão interna, instabilização e liquefação) que podem ser iniciados por mecanismos tais como eventos de cheia extrema, falha estrutural de fundação, ruptura de estrutura a montante e eventos sísmicos. A partir da definição dos cenários de simulação, pode-se estimar os parâmetros de brecha e estabelecer condições de contorno iniciais tal como o nível da água no reservatório.

Além da avaliação das condições do barramento, critérios adicionais também vêm sendo sugeridos em recomendações de órgãos institucionais. Como exemplo, têm-se as recomendações dispostas em FEAM (2021), nas quais a Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais estabeleceu critérios objetivos para definição de cenários de ruptura em estudo de rompimento hipotético de barragens. O órgão estabelece como critério a definição de um cenário de ruptura mais provável, considerando as características da barragem tais como tipo de barragem, estado de conservação e modo de operação, além de um cenário de ruptura mais extremo considerando o agravamento não só dos parâmetros da brecha, como também das vazões afluentes ao reservatório de modo se registrem os níveis mais elevados.

3.1.2 Estimativa da Abertura da Brecha

A estimativa da abertura da brecha envolve duas etapas, sendo a determinação de parâmetros de brecha de ruptura e a estimativa da progressão da formação da brecha. Para a determinação de parâmetros de brecha de ruptura, diversos estudos abordam equações de regressão para as dimensões da brecha (largura, inclinações laterais, altura) e para o tempo de formação da brecha com base em registros históricos de rupturas ocorridas majoritariamente em barragens de terra e enrocamento (USACE, 2021).

A Tabela 3.1 apresenta alguns dos estudos com equações empíricas desenvolvidas considerando registros históricos com diferentes dimensões de barramento, tipos de barragem e modelos de falha considerados.

Tabela 3.1 – Limitações de equações empíricas para estimativa de parâmetros de brecha.

Referências	Altura Hd (m) [mín - máx]	Volume Vw (m³) [mín - máx]	Tipos de Barragem ¹	Modos de falha ²	Nº Obs.
Von Thun & Gillette (1990)	3,66 – 86,9	24.660 – 660.000.000	AT / REJ / ENR	EF / ESC / GG / INF / PIP / NI	58
Froehlich (1995)	3,66 – 86,9	13.900 – 660.000.000	-	EF / ESC / GG / PIP	63
Froehlich (2008)	3,1 – 86,9	13.900 – 660.000.000	AT / ENR	EF / ESC / GG / PIP / N.I	74
Xu & Zhang (2009)	3,7 – 86,9	24.700 – 650.000.000	AT / REC	GG / PIP	182
Froehlich (2016)	2,1 – 86,9	13.900 – 660.000.000	AT / ENR	GG / PIP	111

¹ AT – Aterro, REJ – Rejeitos, ENR – Enrocamento, REC – Aterro revestida com concreto.

² PIP – *Pipping*, INF – Infiltração, GG – Galgamento, EF – Erosão por fluxo, ESC – Escorregamento, NI – Não Identificado.

Fonte: Adaptado de Silva, 2021.

Dentre as formulações apresentadas, o equacionamento mais recente é o apresentado por Froehlich (2016) considerando 111 registros históricos de barragens de aterro e enrocamento que sofreram falhas devido a galgamento e erosão interna (*pipping*) das estruturas. A formulação proposta pelo autor permite o cômputo da largura média e do tempo de formação da brecha por meio da **Eq. 1** e da **Eq. 2** respectivamente.

$$\bar{B} = 0,23 \cdot K_o \cdot V_w^{1/3} \quad \text{Eq. 1}$$

$$T_f = 60 \cdot \sqrt{\frac{V_w}{g \cdot H_b^2}} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde: B é a largura média da brecha (m); V_w é o volume do reservatório (m³); H_b é a altura da brecha (m); Z é a inclinação lateral (m/m); K_o é adotado em função do tipo do modo de falha (galgamento ou erosão interna).

A progressão da brecha de ruptura pode ser estimada por meio de comportamento linear, não-linear ou senoidal. Tomando o comportamento linear, considera-se que as dimensões da brecha de ruptura vão progredir linearmente durante o tempo de formação da brecha determinado até a brecha de ruptura estar configurada em suas dimensões finais. Já o comportamento senoidal considera que a brecha se desenvolve inicialmente em uma pequena taxa, aumenta sua taxa de progressão em

função do aumento das velocidades de escoamento e das tensões sob a brecha e desacelera novamente no processo final de formação da brecha à medida que o nível d'água no reservatório decai para níveis inferiores. Os equacionamentos não-lineares e senoidais desenvolvidos por Fread & Lewis (1998) e Brunner (2002) são apresentados a seguir:

$$\beta(t_b) = \left(\frac{t_b}{\tau}\right)^{\rho_0} \quad \text{Linear}$$

$$\beta(t_b) = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \sin\left[\pi \cdot \left(\frac{t_b}{\tau} - \frac{1}{2}\right)\right]\right) \quad \text{Senoidal}$$

Eq. 3

Onde: β é a taxa de progressão da brecha; t_b é o tempo de simulação; τ é o tempo total de formação da brecha; ρ_0 é o coeficiente de linearidade.

3.1.3 Geração de Hidrograma de Ruptura

Para a geração de hidrogramas de ruptura, majoritariamente dois métodos podem ser utilizados: o equacionamento de Saint Venant considerando escoamento unidimensional ou bidimensional variado (1) ou o equacionamento do método de Puls (2) (USACE, 2021). De modo geral, o primeiro tende a ser mais preciso por considerar a declividade da linha d'água no reservatório à medida que a brecha de ruptura se desenvolve ao passo que o segundo considera a superfície da água plana com nível d'água calculado por meio dos dados de curva cota-volume, curva cota-vazão e da aplicação da Eq. 4. Nesse sentido, reservatórios com geometria mais alongada e estreita tendem a ter maiores declividades de linha d'água do que reservatório mais largos e curtos e conseqüentemente tendem a apresentar maiores variações em relação a aplicação das duas metodologias.

$$\frac{S_{t+1} - S_t}{\Delta t} = \frac{I_t + I_{t+1}}{2} - \frac{Q_t + Q_{t+1}}{2}$$

Eq. 4

Onde: I_t e I_{t+1} são a vazão de entrada no reservatório em t e $t+1$; Q_t e Q_{t+1} são vazões de saída no reservatório; S_t e S_{t+1} são o armazenamento no reservatório.

Na aplicação de ambas as metodologias, todavia, têm-se o mesmo equacionamento para o cômputo das vazões do hidrograma de ruptura. Quando considerado o

cenário de ruptura por galgamento, a vazão efluente é aproximada pela equação de soleiras vertentes (Eq. 5) enquanto a simulação de ruptura por erosão interna (*pipping*) considera o cômputo das vazões efluentes por meio da equação de orifícios (Eq. 6).

$$Q = C_d \cdot L_e \cdot H^{\frac{3}{2}} \quad \text{Eq. 5}$$

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{2gH} \quad \text{Eq. 6}$$

Onde: Q é a vazão (m³/s); Cd é o coeficiente de descarga; Le é a largura efetiva (m); H é a carga hidráulica (m); A é a área do orifício (m²); g é a aceleração da gravidade (m/s²).

3.1.4 Propagação Hidrodinâmica no Vale de Jusante

De posse do hidrograma de ruptura determinado, a propagação das vazões no vale de jusante pode ser feita por meio de modelos unidimensionais, bidimensionais ou ainda pela combinação de ambos.

Em estudos de rompimento hipotético de barragens, a utilização de modelos hidrodinâmicos bidimensionais tende a gerar resultados mais refinados considerando a não-linearidade do fenômeno de rompimento de barragens que, em geral, está associado a variações abruptas de profundidade de escoamento e de velocidade do fluxo em diferentes direções. A aplicação de modelos hidrodinâmicos bidimensionais aprimora ainda mais a análise quando a área de estudo em questão possui vale aberto com topografia plana (USACE, 2020).

Outros pontos relevantes em relação a modelagem hidrodinâmico do rompimento de barragens estão relacionados a:

- Definição de malha computacional: Considerando simulações bidimensionais, a configuração da malha computacional de modelagem deve ser realizada com cautela de modo a identificar e incorporar geometrias para possíveis interferências hidráulicas tais como pontes, rodovias e diques, além de

apresentar resolução espacial capaz de garantir uma boa representação da área de estudo;

- Intervalo de tempo computacional: Deve ser escolhido de forma criteriosa de modo a reduzir a ocorrência de instabilidades no modelo em função do uso de valores muito baixos ou elevados. Tendo em vista o baixo tempo de ascensão do hidrograma de cheia e as altas velocidades de escoamento, são indicados valores típicos de intervalo de tempo computacional entre 1 e 60 segundos (USACE, 2021);
- Condições de contorno de jusante: Representam outro fator que pode gerar instabilidade numérica do modelo além de gerar erros no cômputo de parâmetros hidrodinâmicos quando a condição imposta como premissa não é de fato identificada no cenário de simulação. Nesse sentido, boas práticas indicam a alocação de condições de contorno de jusante em um ponto suficientemente afastado da área de interesse de modo a reduzir o impacto da condição de contorno nas células em análise (USACE, 2021);
- Coeficiente de rugosidade de Manning: É apontado como ampla fonte de incerteza em estudos de rompimento hipotético de barragens principalmente pelo fato de que os valores sugeridos em literatura ou calibrados em função de registros de eventos de cheia foram determinados para vazões de magnitude amplamente inferior as esperadas em cenários de rompimento de barragens

O equacionamento matemático adotado em modelos hidrodinâmico é abordado em maiores detalhes no item 3.4.

3.2 Modelagens hidrodinâmicas com análise do impacto de incertezas

Com exceção da avaliação de magnitude de inundações naturais em função de diferentes tempos de recorrência, a aplicação de modelos hidrodinâmicos para mapeamento de inundações adota tradicionalmente uma abordagem determinística que tende a representar de maneira incompleta os riscos potenciais dificultando uma avaliação objetiva de incertezas e de danos associados à ocorrência de inundações

(KHERADMAND *et al.*, 2018). Como alternativa a essa abordagem, o mapeamento probabilístico de inundações permite se considerar as incertezas em diferentes parâmetros da modelagem com o intuito de também atribuir ao mapeamento, probabilidades de ocorrência associadas às incertezas existentes (PAPAIOANNOU *et al.*, 2017). Recentemente, uma maior atenção é dada a esse tipo de mapeamento, que apesar de mais rigoroso, ainda apresenta vários desafios práticos e científicos.

Nesse sentido, os tópicos seguintes apresentam uma síntese de estudos recentes voltados ao mapeamento probabilístico de inundações com a consideração de diferentes fontes de incertezas e metodologias. O tópico 3.2.1 apresenta aplicações de modelagens hidrodinâmicas de eventos de cheias naturais com a incorporação de incertezas associadas a parâmetros da modelagem hidrológica. O tópico 3.2.2 indica aplicações de modelagens hidrodinâmicas de eventos de cheias naturais com a incorporação de incertezas associadas aos parâmetros hidrológicos e hidrodinâmicos da modelagem. Por fim, o tópico 3.2.3 apresenta especificamente estudos de modelagem hidrodinâmica de ruptura hipotética de barragens com a incorporação de incertezas associadas aos parâmetros de brecha de ruptura e a características do vale de jusante tais como rugosidade e dados topográficos.

O levantamento dos estudos citados teve como principal objetivo a identificação de metodologias e critérios mais apropriados para serem utilizados no desenvolvimento da presente pesquisa.

3.2.1 Incertezas em variáveis hidrológicas

Começando pelos estudos que abordaram as incertezas hidrológicas individualmente, Candela *et al.* (2016) aplicaram o modelo hidrodinâmico MLFP-2D para analisar o impacto das incertezas associadas à condição de contorno de hidrograma de cheia na modelagem hidrodinâmica. A geração dos hidrogramas considerou análise bivariada baseada na teoria de cópulas, permitindo a geração de uma série de combinações de vazão de pico e volume de escoamento. Os autores apontam a importância de consideração desses dois parâmetros tendo em vista a ocorrências de falhas em obras hidráulicas devido à excedência de limiares de vazão de pico e volume de armazenamento. O estudo considerou a geração de 300 hidrogramas de cheia, sendo 100 hidrogramas para cada um dos tempos de retorno

analisados (i.e: 50, 100 e 300 anos), e apresentou mapas de inundação probabilísticos determinados por meio da manipulação de matrizes binárias determinadas para cada simulação com base na identificação de células secas e inundadas e no cálculo da porcentagem de inundação para cada célula da área de estudo.

Kheradmand *et al.* (2018) também elaboraram mapas probabilísticos abordando as incertezas em processos hidrológicos individualmente. Os autores propuseram uma metodologia para geração de mapas probabilísticos associando uma análise estatística de vazões extremas para diferentes tempos de retorno (2 a 1000 anos) à aplicação do modelo HEC-RAS 1D. O estudo utilizou os resultados obtidos para elaborar curvas de perdas e avaliar o impacto da mudança do material que compõe as edificações e da altura dos diques presentes da região nas perdas associadas às inundações. A Tabela 3.2 sintetiza as informações dos estudos levantados com variação dos parâmetros hidrológicos.

Tabela 3.2 – Síntese de aplicações com variação de parâmetros hidrológicos.

Autor	Ferramenta Utilizada	Parâmetros de Incerteza
Candela <i>et al.</i> (2016)	MLFP-2D	Hidrograma de Cheia
Kheradmand <i>et al.</i> (2018)	HEC-RAS 1D	Vazão de pico

3.2.2 Incertezas em parâmetros hidrodinâmicos do vale de jusante

Estudos científicos com análise de incertezas referentes aos parâmetros hidrodinâmicos do vale de jusante tiveram ênfase principal no coeficiente de rugosidade de Manning, contudo com frequência também foram avaliados parâmetros voltados aos dados topográficos ou às geometrias utilizadas para modelagem dos corpos hídricos.

Jung *et al.* (2012) propuseram uma metodologia com aplicação do modelo HEC-RAS 1D para análise de incertezas referentes à topografia, ao coeficiente de rugosidade e à vazão de entrada na modelagem de inundações de eventos naturais. Os autores aplicaram o método *Generalized Likelihood Uncertainty Estimativo* (GLUE) para avaliação das combinações de parâmetros amostrados. A aplicação do método GLUE permite abordar o conceito de equifinalidade, ao analisar se diferentes combinações dos parâmetros de entrada apresentam os mesmos resultados. Jung

et al. (2012) obtiveram resultados que apontam uma maior sensibilidade do modelo às incertezas referentes aos dados topográficos.

Beven *et al.* (2014) aplicaram o modelo JFLOW 2D considerando as incertezas associadas à capacidade do canal, ao coeficiente de rugosidade de Manning e ao hidrograma de cheia para TR 100 anos. Os autores tomaram diferentes combinações desses três parâmetros considerando a distribuição uniforme para sorteio de valores de Manning, a distribuição normal para sorteios de vazões de projeto dentro de um intervalo de confiança de 95% e o sorteio aleatório uniforme de valores de capacidade do canal com base em limites de referência. Os autores estabeleceram a probabilidade de inundação em cada célula da malha computacional utilizando novamente a determinação de matrizes binárias com representação de células secas e inundadas ao longo de 500 iterações e posterior cômputo de probabilidades de inundação com base na frequência em que as células estiveram inundadas, como mostra a Figura 3.2.

Beven *et al.* (2014) apontam a identificação de diversas áreas inundadas na modelagem probabilística que não estiveram inundadas no mapeamento determinístico da inundação na mesma área de estudo e ressaltam a necessidade de consideração de diferentes probabilidades de inundação de referência a depender da finalidade do estudo realizado.

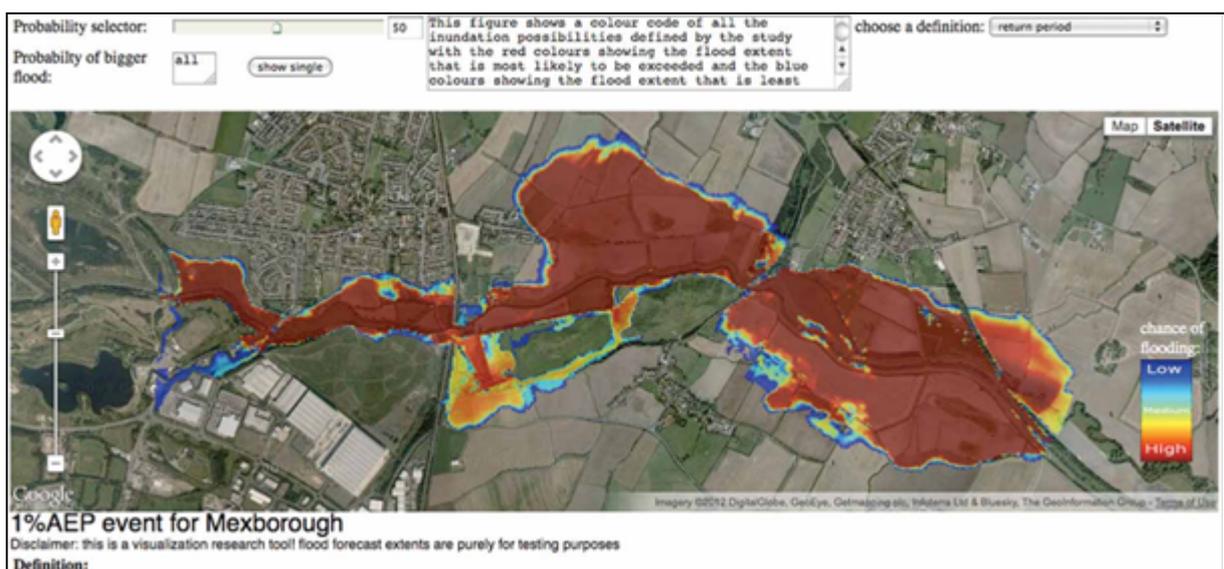


Figura 3.2 – Mapa de inundação probabilístico considerando incertezas hidrológicas e hidráulicas.

Fonte: BEVEN *et al.*, 2014.

Yu *et al.* (2015) também elaboraram mapas de inundação probabilísticos considerando incertezas referentes ao coeficiente de rugosidade, porém com aplicação do modelo LISFLOOD. Os autores propuseram uma metodologia com amostragem pelo método do hipercubo latino (LHS) considerando a distribuição uniforme. Com base em registros históricos da envoltória de inundações e na aplicação do método GLUE, diferentes combinações do coeficiente de rugosidade são avaliadas de modo a calcular a probabilidade de cada uma das combinações sorteadas. Os autores indicam que a metodologia apresenta boa performance para estimativa das distribuições probabilísticas *a priori* do coeficiente de rugosidade de Manning permitindo a definição de intervalos de confiança para as profundidades de escoamento simuladas.

Papaioannou *et al.* (2017) utilizaram o modelo HEC-RAS 1D para elaborar mapas de inundação probabilísticos considerando incertezas relativas ao coeficiente de rugosidade do canal e da planície de inundação. Para sorteio dos valores da variável dentro das faixas selecionadas, foi novamente utilizado o método de amostragem por hipercubo latino (LHS) com o intuito de garantir que todas as partes da distribuição de probabilidades adotada para o sorteio do coeficiente de rugosidade esteja representada. O sorteio dos parâmetros considerou a geração de 1000 coeficientes de rugosidade de Manning que foram considerados aceitáveis considerando novamente o uso de registros de inundações históricas por meio de imagens de satélite. Os autores apresentaram ainda resultados de coletas do material do fundo do talvegue para estimativa da distribuição do coeficiente de rugosidade por meio de equações empíricas em função da granulometria do material de fundo do talvegue.

Os resultados obtidos por Papaioannou *et al.* (2017) apontam para as distribuições Lognormal e Gamma como as de maior aderência as variações do coeficiente de rugosidade de Manning dentre a avaliação das distribuições Normal, Lognormal, Exponencial, Gama, Beta, Uniforme, Logística, Cauchy e Weibull, Considerando a distribuição Lognormal como a de melhor ajuste ao coeficiente de rugosidade de Manning, os autores elaboraram o mapa de inundação probabilístico da área de estudo que pôde ser comparado ao mapa de inundação gerado por meio de abordagem determinística como mostra a Figura 3.3.

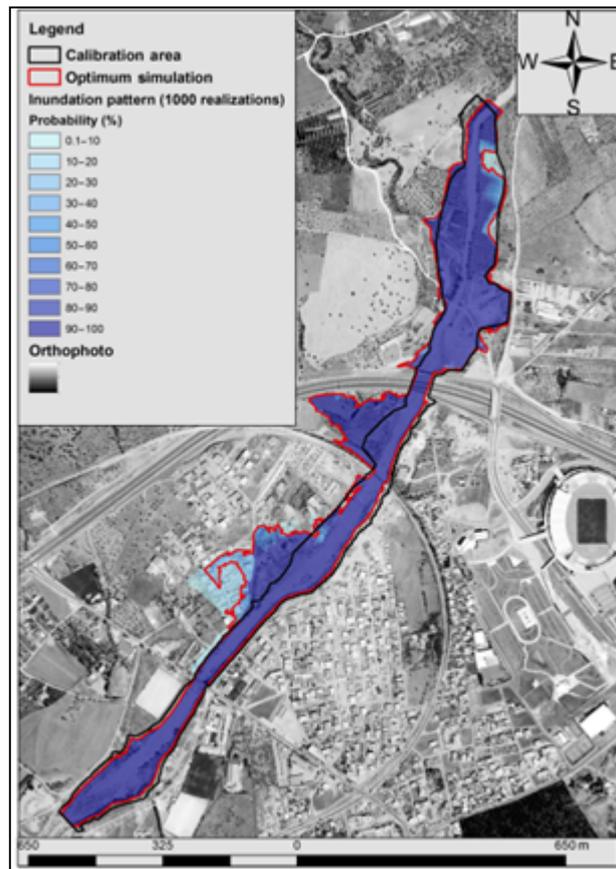


Figura 3.3 – Mapa de inundação probabilístico e envoltória determinística (vermelho).

Fonte: PAPAIOANNOU *et al.*, 2017.

Liu *et al.* (2018) propuseram a elaboração de mapas de inundação probabilísticos com o uso do modelo LISFLOOD 1D/2D para realização de 81 simulações com variação da geometria do canal (retangular, parabólico ou triangular), largura do canal, coeficiente de rugosidade e vazão de entrada. O estudo aborda a aplicação do método *Bayesian Model Averaging* (BMA) para combinar previsões por conjuntos de diferentes simulações hidráulicas e obter um modelo mais refinado.

Já Oubennaceur *et al.* (2018) avaliaram a aplicação do método *Point Estimate Method* (PEM) para analisar as incertezas decorrentes da vazão de entrada, do coeficiente de rugosidade e dos dados topográficos nos níveis d'água calculados por meio do modelo bidimensional H2D2. A Figura 3.4 apresenta um esquema da metodologia utilizada indicando que cada parâmetro de incertezas é avaliado com três valores de referência (mínimo, médio e máximo) de modo que a análise para os três parâmetros é feita com 27 cenários de combinação.

O uso dos métodos de perturbação (PEM) objetiva avaliar o modelo a partir de uma quantidade discreta de valores dos parâmetros de incerteza e combinar as incertezas das variáveis aleatórias por meio de pesos. Uma das principais vantagens do método é a redução da demanda computacional em relação a outras abordagens como a do método de Monte Carlo.

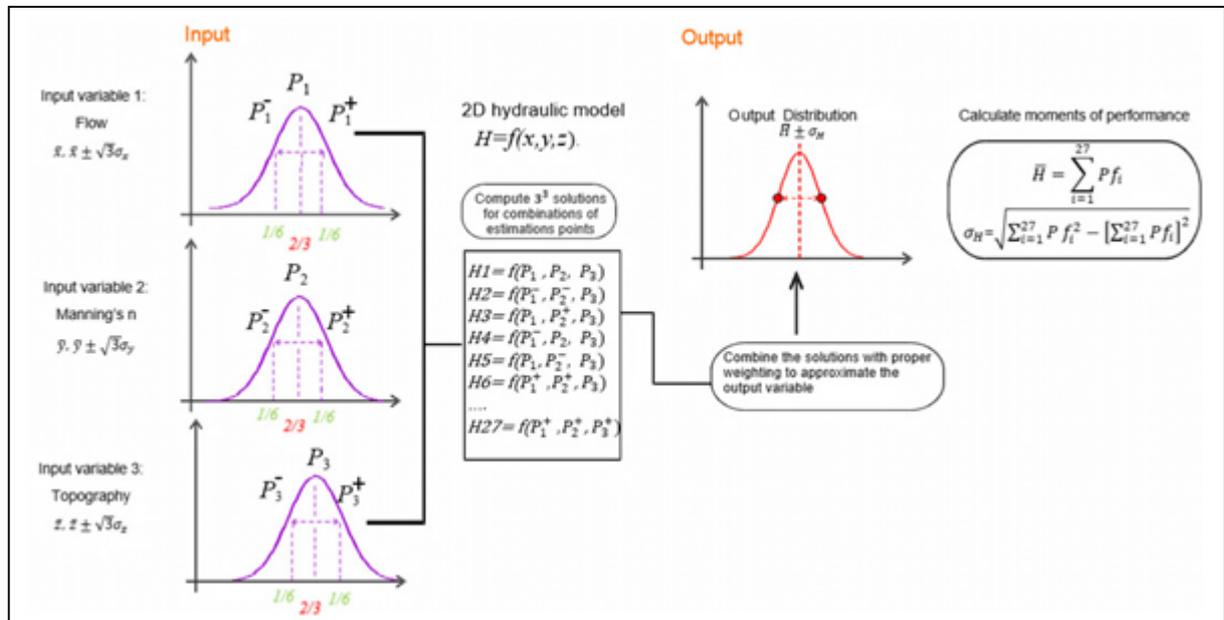


Figura 3.4 – Esquema metodológico de mapeamento probabilístico com método PEM.

Fonte: OUBENNACEUR *et al.*, 2018.

Finalmente, Stephens *et al.* (2019) aplicaram o MMC associado ao modelo HEC-RAS 1D. Os autores avaliaram o impacto das imprecisões relacionadas aos hidrograma de cheia, ao coeficiente de rugosidade e aos dados topográficos considerando variações conforme distribuições lognormal, lognormal e normal respectivamente. O estudo indica a aplicação de 1.000 simulações e a elaboração de mapas de inundação probabilísticos tomando matrizes binárias com identificação de células secas e inundadas para cada repetição conforme apresentado na Figura 3.5.

A Tabela 3.3 sintetiza as informações dos estudos levantados com variação dos parâmetros hidrodinâmicos.

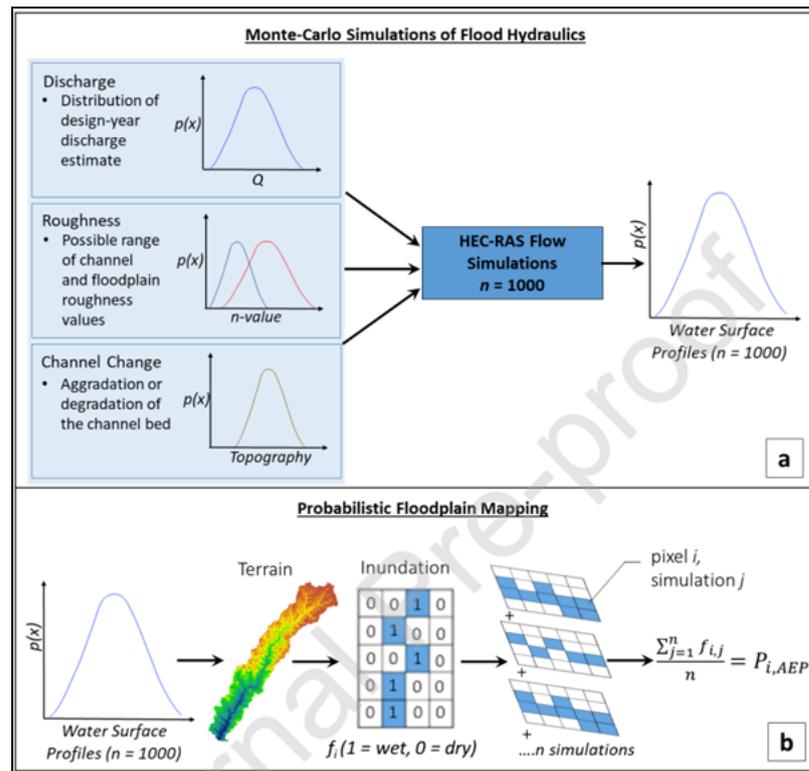


Figura 3.5 – Esquema metodológico de mapeamento probabilístico considerando incertezas em parâmetros hidrológicos e hidrodinâmicos.

Fonte: STEPHENS *et al.*, 2019.

Tabela 3.3 - Síntese de aplicações com variação de parâmetros hidrodinâmicos.

Autor	Ferramenta Utilizada	Parâmetros de Incertezas	Método	Distribuição de probabilidades para Rugosidade
Jung <i>et al.</i> (2012)	HEC-RAS 1D	Rugosidade, hidrograma de cheia e topografia	MMC e GLUE	Uniforme
Beven <i>et al.</i> (2014)	JFLOW 2D	Rugosidade, capacidade do canal e hidrograma de cheia	MMC	Uniforme
Yu <i>et al.</i> (2015)	LISFLOOD	Rugosidade	LHS, MMC e GLUE	Uniforme
Papaioannou <i>et al.</i> (2017)	HEC-RAS 1D	Rugosidade	LHS e MMC	Lognormal
Liu <i>et al.</i> (2018) ¹	LISFLOOD 1D/2D	Rugosidade, geometria do canal e hidrograma de cheia	BMA	-
Oubennaceur <i>et al.</i> (2018)	H2D2	Rugosidade, hidrograma de cheia e topografia	PEM	Distribuição Normal
Stephens <i>et al.</i> (2019)	HEC-RAS 1D	Rugosidade, hidrograma de cheia e topografia	MMC	Lognormal

¹ Metodologia não utilizou amostragem de parâmetro conforme distribuição probabilística.

3.2.3 Incertezas em parâmetros de obras hidráulicas

Para as aplicações de análises de sensibilidade em modelagens decorrentes de rompimento de barragens, estudos recentes apontam para duas principais estratégias adotadas. A primeira abordagem utiliza modelos hidrodinâmicos truncados para redução de demanda computacional e a incorporação de incertezas presentes nos parâmetros de entrada do modelo por meio da avaliação probabilística dos hidrogramas de ruptura gerados. Ao passo que uma outra abordagem adotada considera a simulação de modelos completos seja por meio do tradicional Método de Monte Carlo ou de outras técnicas como os métodos de Perturbação.

Considerando o uso de modelos hidrodinâmicos truncados, McCann *et. al* (2016) aplicaram o programa *McBreach* considerando imprecisões nos parâmetros de largura de brecha de ruptura e tempo de falha variando conforme distribuições normais com parâmetros de referência adotados conforme equações empíricas de Froehlich (2008) e Bowles *et al.* (2014), Os autores realizaram 18000 simulações com o modelo HEC-RAS 1D e obtiveram resultados que apontam para vazões de pico do hidrograma de ruptura com variação de cerca de três vezes (14.732 – 48.158 m³/s) e maiores variações de parâmetros hidrodinâmicos no vale de jusante nas seções transversais no entorno do barramento.

De forma análoga, Lara (2016) aplicou o programa *McBreach* realizando 20.000 simulações e considerando as distribuições uniforme e normal para variação dos parâmetros de brecha de ruptura no programa HEC-RAS 1D. O autor considerou a variação nos parâmetros de tempo de ruptura, coeficientes de descarga, elevação de *piping*, elevação inferior, largura e inclinações laterais da brecha. A adoção dos limites amostrais dos parâmetros foi realizada com base em equações empíricas, referências de literatura e na análise dos limites impostos no projeto da barragem em estudo.

Silva (2021) também aplicou a ferramenta *McBreach*, porém associado ao modelo HEC-RAS 2D e a distribuições probabilísticas avaliadas por meio do ajuste de dados de rompimentos de barragens registrados em diversos países como abordado de forma detalhada no item 4.2.2 do presente estudo. Para a aplicação do MMC, Silva

(2021) utilizou um modelo hidrodinâmico truncado, ou seja, um modelo hidrodinâmico com representação simplificada do vale de jusante de modo a avaliar o aspecto probabilístico nos hidrogramas de ruptura da barragem.

Dessa forma, os mapas de inundação probabilísticos foram realizados por meio da determinação de quantis de vazão de pico associados a diferentes probabilidades de excedência e da simulação de um modelo hidrodinâmico completo apenas para os hidrogramas de ruptura associados aos quantis de vazão de pico determinados.

Uma das limitações identificadas por Silva (2021) está relacionada à dificuldade de se obter um hidrograma de ruptura probabilístico a partir da série de hidrogramas obtida após aplicação do MMC tendo em vista que os quantis de vazão de pico determinados possuem maior ou menor dano potencial associado em função de outros parâmetros como tempo de pico e tempo de base.

Silva, Bezerra e Eleutério (2021) realizaram estudo aplicando a linguagem Python para automatização das simulações com variação dos parâmetros de brecha de modo a permitir a incorporação de distribuições probabilísticas e critérios de sorteio de parâmetros adicionais, trazendo benefícios em relação a ferramenta *McBreach*.

Considerando aplicações com simulações de modelos hidrodinâmicos completos, Tsai *et al.* (2019) utilizaram o método de perturbação PEM para análise de incertezas em mapas de inundação decorrentes de rompimento de barragens tomando duas abordagens. A primeira considera a aplicação do método PEM unicamente para o modelo de ruptura da barragem *Dam Break Model* e não inclui a variação do coeficiente de rugosidade. Já a segunda envolve a variação dos parâmetros de brecha e do coeficiente de rugosidade de Manning por meio do acoplamento dos modelos *Dam Break Model* e HEC-RAS 1D. Os autores consideraram as imprecisões relacionadas à largura da brecha formada, à área superficial do reservatório e ao coeficiente de rugosidade de Manning do vale em estudo.

Inicialmente, o coeficiente de rugosidade do modelo HEC-RAS 1D foi calibrado com dados monitorados e, em seguida, foi aplicada uma metodologia de perturbação para analisar a sensibilidade do modelo às variações dos parâmetros citados. Os

resultados obtidos apontam que a largura da brecha foi o parâmetro que teve maior influência nos resultados de nível d'água enquanto os demais parâmetros demonstraram aproximadamente a mesma influência na geração do mapa de inundação.

Kim *et al.* (2016) aplicaram o modelo bidimensional BREZO para simular a ruptura de uma barragem em um evento extremo ocorrido considerando incertezas associadas aos dados de topobatimetria, à geometria da brecha, à precipitação e aos parâmetros de rugosidade. Para isso, inicialmente o modelo foi calibrado utilizando os dados mais precisos disponíveis e, em seguida, foram estabelecidos sete cenários com variações dos parâmetros citados. Dentre os resultados, destaca-se a forte sensibilidade do modelo aos dados de topobatimetria.

Tschiedel *et al.* (2018) elaboraram um estudo objetivando avaliar as incertezas relacionadas ao mapeamento de áreas inundadas pelo rompimento de barragens em duas regiões de diferentes características: uma caracterizada por um vale estreito com altas declividades e outra caracterizada por um vale aberto com baixa declividade. Para avaliar tais incertezas, os autores propuseram a aplicação do modelo HEC-RAS 2D com variação dos coeficientes de rugosidade, dos parâmetros da brecha, do volume do reservatório, dos dados topográficos e da equação usada pelo modelo (2D Diffusive Model ou Saint Venant 2D Equations).

Bellos *et al.* (2020) aplicou o MMC considerando as imprecisões em sete parâmetros de brecha de ruptura: largura e elevação da base da brecha, inclinações laterais, coeficiente do reservatório, tempo de formação da brecha e nível inicial do reservatório. O autor utilizou o modelo HEC-RAS 1D e a distribuição uniforme para ajuste dos parâmetros e a realização de 10.000 simulações com combinações aleatórias dos parâmetros em análise para avaliar os impactos gerados nos hidrogramas de ruptura, nas vazões de pico e nas profundidades de escoamento simuladas ao longo do manancial. Os resultados obtidos apontam que os parâmetros de tempo de formação da brecha, largura e elevação do fundo da brecha foram responsáveis pelo impacto mais significativo nos resultados do modelo hidrodinâmico.

A Tabela 3.4 sintetiza as informações dos estudos levantados com variação dos parâmetros hidrodinâmicos.

Tabela 3.4 - Síntese de aplicações com variação de parâmetros hidrológicos.

Autor	Ferramenta Utilizada	Parâmetros de Incerteza	Método
McCann <i>et al.</i> (2016)	McBreach / HEC-RAS 1D	Largura de Brecha Tempo de Formação	
Lara (2016)	McBreach / HEC-RAS 1D	Tempo de ruptura Coeficientes de descarga Elevação de piping, Elevação inferior Largura e inclinações laterais da brecha	Modelagem probabilística de hidrogramas de ruptura
Silva (2021)	McBreach / HEC-RAS 2D	Tempo de formação Elevação inferior Largura e inclinações laterais da brecha	
Kim <i>et al.</i> (2016)	BREZO	Topobatimetria, Geometria da brecha Precipitação Coeficiente de rugosidade	Variação determinística
Tschiedel <i>et al.</i> (2018)	HEC-RAS 2D	Coeficiente de rugosidade Parâmetros da brecha Volume do reservatório Dados topográficos Equação do modelo	Variação determinística
Tsai <i>et al.</i> (2019)	Dam Break Model / HEC-RAS 1D	Largura da brecha Área superficial do reservatório Coeficiente de rugosidade	PEM
Bellos <i>et al.</i> (2020)	HEC-RAS 1D	Largura e elevação da base da brecha Inclinações laterais Coeficiente do reservatório Tempo de formação da brecha Nível inicial do reservatório	MMC

Com base no levantamento dos estudos realizados na última década, identificou-se que, considerando as incertezas associadas aos parâmetros de brecha de ruptura, apenas Silva (2021) abordou o mapeamento probabilístico de inundações em modelos bidimensionais ao passo que Kim *et al.* (2016) e Tschiedel *et al.* (2018) realizaram análises de sensibilidade também envolvendo modelos hidrodinâmicos bidimensionais.

Um cenário análogo foi identificado para as aplicações considerando incertezas associadas aos parâmetros hidrodinâmicos do vale de jusante considerando que apenas os estudos desenvolvidos por Beven *et al.* (2014), Liu *et al.* (2018) e Oubennaceur *et al.* (2018) utilizaram modelos hidrodinâmicos bidimensionais.

O único estudo que analisou conjuntamente a variação do coeficiente de rugosidade de Manning e dos parâmetros de brecha de ruptura por meio de mapas de inundação probabilísticos foi desenvolvido por Tsai *et. al* (2019) considerando a modelagem hidrodinâmica unidimensional.

3.3 Técnicas de automatização de modelos hidrodinâmicos

Tendo em vista a recorrente necessidade de realização de múltiplos cenários nas abordagens probabilísticas de mapeamento de inundações seja com o uso do método de Monte Carlo ou de outras técnicas como os métodos de Perturbação citados anteriormente, a automatização das simulações de modelos hidrodinâmicos por meio de linguagens de programação passa a ser uma alternativa valiosa no desenvolvimento de ferramentas que permitam a modelagem hidrodinâmica com incorporação de incertezas nos diferentes parâmetros de entrada, como visto no capítulo anterior.

Nas aplicações de mapeamento probabilístico de inundações, destaca-se o uso das ferramentas HEC-RAS (JUNG *et al.*, 2012; MCCANN *et al.*, 2016, Lara *et al.*, 2016; PAPAIOANNOU *et al.*, 2017; TSCHIEDEL *et al.*, 2018; KHERADMAND *et al.*, 2018; STEPHENS *et al.*, 2019; TSAI *et al.*, 2019; BELLOS *et al.*, 2020; SILVA, 2021), LISFLOOD (YU *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2018), H2D2 (OUBENNACEUR *et al.*, 2018), BREZO (KIM *et al.*, 2016), MLFP-2D (CANDELA *et al.*, 2016) e JFLOW 2D (BEVEN *et al.*, 2014), conforme detalhado anteriormente.

Dentre eles, o modelo HEC-RAS foi o mais frequentemente aplicado em estudos realizados para essa finalidade. O modelo é gratuito e conta com interface de programação de aplicações (API) que facilita a automatização, o HEC-RASController, além de apresentar ampla capacidade de realização de modelagens hidrodinâmicas bidimensionais e configuração de cenários de ruptura em obras hidráulicas.

Goodell (2014) apresentou detalhadamente técnicas de automatização do programa HEC-RAS por meio da ferramenta HEC-RASController acessada na linguagem *Visual Basic for Applications* (VBA) de modo a incorporar diversas funções e sub-rotinas antes apenas acessíveis pela interface gráfica do programa. Apesar de a

ferramenta HEC-RASController apresentar a ampla maioria de suas funções aplicáveis apenas ao módulo unidimensional do HEC-RAS, Goodell (2014) ressalta a possibilidade de associar a aplicação de funções básicas do HEC-RASController a manipulação de dados de entrada e saída do programa por meio de funções próprias da linguagem computacional utilizada e, dessa forma, ampliar o potencial de automatização nas modelagens hidrodinâmicas.

A estratégia proposta por Goodell (2014) foi aplicada por diversos autores nos anos seguintes. Leon *et al.* (2016) ampliou as funcionalidades do HEC-RASController utilizando a linguagem Matlab para elaborar novos procedimentos de controle do HEC-RAS 1D a partir da manipulação dos dados de entrada e saída do modelo de forma a extrair dados da geometria do modelo e realizar análise automática de manobras de comportas em um sistema de barragens em série.

Dysarz (2018) introduziu o uso da biblioteca *HECRASController* associada à linguagem Python. A utilização da linguagem Python para controlar procedimentos do modelo HEC-RAS resulta em uma série de benefícios principalmente porque essa linguagem tem grande potencial para manipulação de arquivos XML, como dados de transporte de sedimentos, e arquivos HDF, como resultados de simulações bidimensionais de escoamento. Além disso, a linguagem Python possibilita uma grande interação entre as simulações no HEC-RAS e ferramentas de geoprocessamento como QGIS e ARCGIS. O autor apresenta uma série de aplicações como calibração automática do coeficiente de Manning em simulações unidimensionais e automatização de simulações de transporte de sedimentos.

Aplicando também a linguagem Python, Desrochers *et al.* (2020) utilizou dados de nível d'água obtidos por meio de imagens de alta resolução (Radarsat – 2 SAR) para calibração de um modelo hidráulico unidimensional com a incorporação das funções do *HECRASController* a novas funcionalidades desenvolvidas.

Por fim, Hamouda (2018) apresentou um avanço significativo nas técnicas de automatização do programa HEC-RAS ao apresentar uma metodologia para calibração automática do modelo bidimensional do HEC-RAS por meio de algoritmo desenvolvido em Python para variação dos coeficientes de rugosidade de Manning da malha computacional configurada. A estratégia abordada pelo autor considerou a

manipulação dos arquivos matriciais de uso e cobertura do solo pré-configurados na interface gráfica do modelo de modo a otimizar a variação do coeficiente de rugosidade de Manning e análise dos resultados obtidos.

A aplicação desenvolvida por Hamouda (2018) foi inovadora na automatização de processos específicos do modelo bidimensional no programa HEC-RAS, os avanços obtidos pelo autor são diretamente aplicados no presente trabalho.

3.4 Modelo hidrodinâmico HEC-RAS

Por ser o modelo empregado no presente trabalho, nesse item são apresentados os principais fundamentos relacionados ao programa HEC-RAS.

O *Hydrologic Engineering Center River Analysis System* (HEC-RAS) foi desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE) para a modelagem hidráulica de rios, planícies de inundação, reservatórios e diversos tipos de obras hidráulicas tais como barragens, bueiros e pontes. Até o ano de 2015, a modelagem hidráulica com o HEC-RAS permitia a simulação do escoamento unidimensional uniforme e variado.

Para o cômputo do escoamento em regime uniforme, o método se baseia na equação de conservação de energia e na aplicação do método de passo padrão (*Standard Step Method*). Ao passo que para a modelagem do escoamento em regime variado, o método aplica as equações de continuidade e conservação de momento.

Em 2015, com o avanço dos desenvolvimentos tecnológicos, a versão 5.0 do programa HEC-RAS passou a permitir a modelagem hidrodinâmica bidimensional em regime transiente. O novo módulo implementado no HEC-RAS se baseia no equacionamento de Navier-Stokes para escoamento tridimensional com a aplicação das seguintes simplificações (USACE, 2021):

- Consideração de fluxo incompressível, densidade e pressão hidrostática uniformes;
- Movimento turbulento aproximado pela viscosidade de redemoinho;

- Dimensão vertical muito menor que a horizontal acarretando a desconsideração da velocidade e aceleração vertical;

Por meio das considerações acima apresentadas, a equação vetorial de conservação de momento pode ser descrita conforme a Eq. 7 na qual o primeiro membro contém os termos referentes à aceleração e o segundo membro contém os termos referentes as forças internas e externas que atuam no fluido:

$$\begin{array}{c}
 \boxed{\text{Aceleração convectiva}} \quad \boxed{\text{Pressão barotrópica}} \quad \boxed{\text{Atrito de Fundo}} \\
 \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} + f_c \cdot k \times \mathbf{V} = -g \nabla z_s + \frac{1}{h} \nabla \cdot (\nu_t h \nabla \mathbf{V}) - \frac{\tau_b}{\rho R} + \frac{\tau_s}{\rho h} \\
 \boxed{\text{Aceleração variada}} \quad \boxed{\text{Efeito de Coriolis}} \quad \boxed{\text{Momento difusivo}} \quad \boxed{\text{Força do vento}}
 \end{array}$$

Eq. 7

Onde: \mathbf{V} é o vetor de velocidade; k é o vetor unitário na direção vertical; ν_t é o tensor de viscosidade de redemoinho; τ_b é o vetor de tensão de atrito no fundo do canal; τ_s é o vetor de tensão superficial do vento

Os primeiros dois termos da equação representam a aceleração Euleriana e podem ser sintetizados na derivada Lagrangiana da aceleração:

$$\frac{D\mathbf{V}}{Dt} = \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} \quad \text{Eq. 8}$$

O terceiro termo da Eq. 8 representa o efeito de Coriolis que pondera o equacionamento referenciado à Terra com base na rotação do planeta em torno de seu próprio eixo, sendo dado pela Eq. 9 :

$$f_c = 2 \omega \sin \varphi \quad \text{Eq. 9}$$

Onde: ω é a velocidade angular sideral da Terra; φ é a latitude

Considerando a modelagem da turbulência, o termo de viscosidade é representado tal como um processo de gradiente difusivo conforme a Eq. 10:

$$\mathbf{v}_t = \mathbf{D}u_*h + (C_s\Delta)^2|S| \quad \text{Eq. 10}$$

Onde: \mathbf{D} é o tensor do coeficiente de mistura; u^* é a velocidade de atrito; h é a profundidade da água; C_s é o coeficiente de Smagorinsky; Δ é o filtro de largura referente a resolução da malha computacional; S é a taxa de deformação.

O penúltimo termo da equação representa a tensão de atrito no fundo do canal e é dado pela Eq. 11:

$$\tau_b = \rho C_D |\mathbf{v}| \mathbf{v} \quad \text{Eq. 11}$$

Onde: ρ é a densidade da água; C_D é o coeficiente de descarga.

Na equação 3, o cálculo do coeficiente de descarga é feito com base no coeficiente de rugosidade de Manning conforme apresentado na Eq. 12:

$$C_D = \frac{n^2 \cdot g}{R^{1/3}} \quad \text{Eq. 12}$$

Onde: n é o coeficiente de rugosidade de Manning; R é o raio hidráulico; g é a aceleração da gravidade.

Por fim, a tensão superficial gerada pelo vento é dada pela Eq. 13:

$$\tau_s = \rho_a C_D |W_{10}| W_{10} \quad \text{Eq. 13}$$

Onde: ρ_a é a densidade do ar no nível do mar; C_D é o coeficiente de arrasto; W_{10} é o vetor de velocidade do vento na altura de 10 metros.

O equacionamento acima descrito contempla a solução das equações de Navier-Stokes com base nas equações de Águas-Rasas (*Shallow Water*). O programa HEC-RAS apresenta ainda um equacionamento aplicável especificamente para modelagens em que os termos de gravidade e atrito de fundo do canal são dominantes do comportamento do escoamento de forma que a equação de momento pode ser simplificada com a desconsideração dos termos de advecção,

viscosidade e aceleração variada no equacionamento denominado de Onda Difusiva (*Diffusion Wave*).

4 METODOLOGIA

O estudo foi realizado por meio de três principais etapas metodológicas: (1) desenvolvimento de um ferramenta computacional capaz de aplicar o MMC associado as simulações bidimensionais do software HEC-RAS considerando as incertezas no coeficiente de rugosidade de Manning e em cinco parâmetros de brecha de ruptura (i.e.: altura, largura, inclinações laterais e tempo de formação da brecha); (2) escolha de distribuições de probabilidades a serem adotados para o sorteio dos valores de coeficiente de rugosidade de Manning e dos parâmetros de brecha na aplicação do MMC; e (3) aplicação da ferramenta probabilística em um estudo de caso hipotético com o intuito de quantificar o impacto das incertezas referentes ao coeficiente de rugosidade de Manning e aos parâmetros de brecha na modelagem hidrodinâmica.

A escolha do coeficiente de rugosidade de Manning para representar as imprecisões associadas a rugosidade dos diferentes trechos da calha fluvial e da planície de inundação da área de estudo considerou inicialmente que em abordagens determinísticas o coeficiente de rugosidade de Manning é calibrado para eventos de cheia monitorados e é adotado para a modelagem de eventos de inundação com condições amplamente distintas das do evento de calibração (PAPPAIOANOU *et al.*, 2017). Além disso, considerou-se o impacto significativo das variações desse parâmetro em modelagens hidrodinâmicas apontado em estudos recentes (BEVEN *et al.*, 2014; YU *et al.*, 2015; LIU *et al.*, 2018; OUBENNACEUR *et al.*, 2018; TSAI *et al.*, 2019).

Por outro lado, a escolha dos cinco parâmetros de brecha citados se deu considerando os parâmetros significativos adotados em estudos análogos realizados por McCann *et al.* (2016), Lara (2016), Tsai *et al.* (2019), Bellos *et al.* (2020) e Silva (2021) e tendo em vista que variáveis como nível do reservatório e parâmetros específicos relacionados a ruptura por erosão interna (*pipping*) não foram considerados pois o estudo de caso proposto considerou um cenário de ruptura por galgamento com nível inicial do reservatório referente a condição de iminência do galgamento.

As diferentes etapas metodológicas (Figura 4.1) são detalhadas nos itens a seguir.

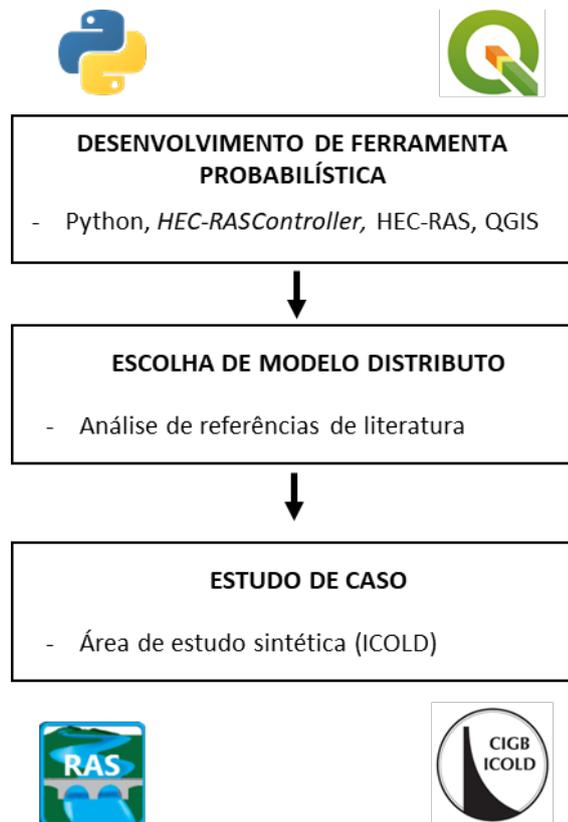


Figura 4.1 - Esquema de etapas metodológicas adotadas no estudo.

4.1 Desenvolvimento de Ferramenta Probabilística

Na primeira etapa, elaborou-se uma ferramenta para aplicação do MMC nas simulações bidimensionais do software HEC-RAS considerando variações no coeficiente de rugosidade (Parte I), nos parâmetros de brecha de ruptura (Parte II) e a análise dos resultados provenientes das duas variações (Parte III). A escolha do software HEC-RAS se deu pela fácil integração do modelo a ferramentas de geoprocessamento como o QGIS e ArcGIS, por se tratar de um software livre com a existência de uma interface gráfica bem desenvolvida e pela elevada capacidade de automação a partir de ferramentas de programação computacional com o uso do *HEC-RASController*.

4.1.1 Parte I – Variação de coeficiente de rugosidade de Manning

O desenvolvimento da Parte I da ferramenta computacional foi realizado com o intuito de automatizar as simulações do modelo bidimensional da ferramenta HEC-RAS de forma a variar os coeficientes de rugosidade de Manning conforme distribuições probabilísticas adequadas, realizar múltiplas simulações e manipular os dados de saída do modelo possibilitando o mapeamento probabilístico de

inundações. A escolha da linguagem Python se deu principalmente por dois fatores: a existência de referências de aplicações semelhantes na literatura (DYSARZ, 2018; HAMOUDA, 2018) e a capacidade dessa linguagem computacional de manipular arquivos de diversos formatos (arquivos de texto, dados vetoriais, matriciais e de formatação hierárquica).

A metodologia de automatização foi dividida em três módulos de desenvolvimento (Figura 4.2): (i) para manipulação de dados de entrada do modelo; (ii) para execução das simulações; (iii) para manipulação de dados de saída do modelo.

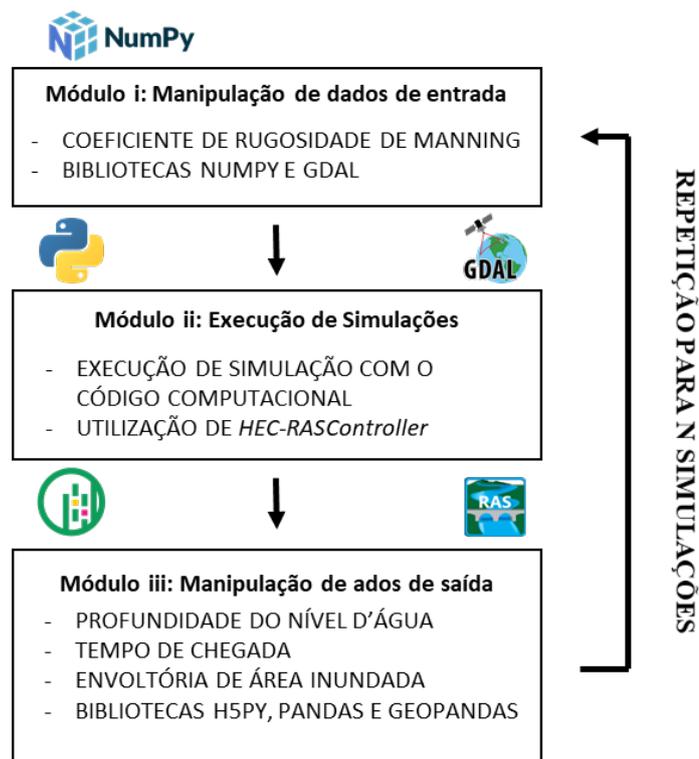


Figura 4.2 - Esquema da metodologia utilizada para automatização de simulações: Variação de coeficiente de rugosidade.

Para a aplicação do Método de Monte Carlo (MMC) considerando a variação dos coeficientes de rugosidade de Manning no modelo bidimensional do HEC-RAS, o módulo i é baseado na manipulação do arquivo matricial Manning.tiff que é gerado automaticamente pelo programa quando se insere um arquivo vetorial de uso e ocupação do solo na ferramenta (*RASMapper > Map Layers > Add New Mannings Layer*). Como exemplo, se considerada a utilização de um arquivo vetorial de uso e ocupação do solo com quatro classes (1- pastagem, 2 – floresta, 3 – área urbana, 4 - canal), o programa criará automaticamente um arquivo matricial contendo células

variando de um a quatro, ou seja, cada célula do arquivo matricial gerado representa a classe de uso do solo referente a uma dada região (Figura 4.3).

Color	Value /	Name	Default Manning's n
	0	nodata	
	1	pastagem	0.0375
	2	floresta	0.12
	3	area urbana	0.12
	4	canal	0.0375

Color	Value	Name	Default Manning's n
	0	nodata	
	1	pastagem	0.0375
	2	floresta	0.12
	3	area urbana	0.12
	4	canal limpo	0.0375
	5	canal com rochas	0.045
	6	canal com banco de areia	0.04
	7	canal com rochas e ilhas	0.05

Figura 4.3 – Exemplo de dados de uso e ocupação do solo com classes originais e com o acréscimo de classes alternativas.

Nesse sentido, o artifício utilizado por Hamouda (2018) para elaboração de uma calibração automática do programa HEC-RAS 2D foi de inserir inicialmente um arquivo vetorial configurado com classes de uso do solo adicionais. Como exemplo, pode-se considerar a utilização de um arquivo vetorial de uso e ocupação do solo com sete classes (1- pastagem, 2 – floresta, 3 – área urbana, 4 – canal limpo, 5 – canal com rochas, 6 – canal com bancos de areia, 7 – canal com rochas e ilhas). Dessa maneira, o arquivo matricial gerado passa a ter sete classes de uso do solo, sendo quatro classes originais (1 - 4) e três classes alternativas (5 – 7) as quais podem ser utilizadas, em um caso de calibração automática, para avaliar um melhor ajuste do modelo a níveis d'água observados (Figura 4.2).

O artifício adotado por Hamouda (2018) para criação de um arquivo matricial de Manning possuindo classes de uso do solo originais e alternativas é um ponto fundamental para a automatização de simulações bidimensionais com variação do coeficiente de rugosidade utilizada na presente pesquisa. Essa estratégia amplia as funcionalidades da API HECRASController que possui funções implementadas para variação do coeficiente de rugosidade apenas para simulações hidrodinâmicas unidimensionais.

Considerando a utilização de um arquivo vetorial com N classes de uso do solo que podem representar, por exemplo, 100 valores a serem utilizados no MMC, as demais

etapas da metodologia são voltadas para a manipulação automática do arquivo matricial *Manning.tiff*, para a execução automática das simulações do programa utilizando a ferramenta HECRASController e para a manipulação dos arquivos de saída das simulações.

Para a manipulação automática do arquivo *Manning.tiff*, diversas bibliotecas da linguagem Python podem ser utilizadas (i.e: Rasterio, Gdal, Geopandas). Assim como Hamouda (2018), a presente pesquisa utiliza a biblioteca GDAL a qual permite a leitura do arquivo matricial como uma matriz com índices de classes de uso do solo. Nessa etapa, os índices da matriz referentes à classe original de uso e ocupação do solo, são substituídos pelo índice referente à respectiva classe alternativa. Tomando o exemplo anteriormente citado, a primeira simulação realizada leria a matriz de índices e substituiria todos os índices 4 (Canal limpo) pelo índice 5 (Canal com rochas). Na próxima repetição, a matriz de índices seria lida e os índices 5 (Canal com rochas) seriam substituídos pelo índice 6 (Canal com bancos de areia) e assim sucessivamente.

A partir da estratégia de automatização citada, pode-se realizar a variação automática do coeficiente de rugosidade tanto de uma classe de uso do solo por repetição, o que pode ser interessante para calibrações automáticas ou análises de sensibilidade, como também pode-se variar diversas classes de uso do solo por repetição, estratégia utilizada na presente ferramenta para o mapeamento probabilístico de inundações decorrentes de rompimento de barragens. Ressalta-se, contudo, que o HEC-RAS v. 5.0.7 possui um limite de feições a serem inseridas no arquivo vetorial de classes de uso do solo de 255 classes. Dessa forma, a aplicação do MMC com variação do coeficiente de rugosidade de Manning deve considerar uma alternativa de automatização, como por exemplo, a utilização de uma maior quantidade de arquivos vetoriais de uso do solo.

Como será apresentado no item 4.3, o presente estudo aplicou o MMC com variação do coeficiente de rugosidade de Manning considerando 1000 repetições e a variação concomitante de sete classes de uso do solo por repetição. Tendo em vista a limitação de inserção de classes de uso do solo apresentada anteriormente, esse processamento foi realizado por meio de 30 arquivos vetoriais de uso e ocupação do

solo em que cada arquivo continha 15 coeficiente de rugosidade originais e 238 coeficientes de rugosidade alternativos.

Realizada a inserção e manipulação dos arquivos de entrada citados anteriormente, o módulo ii considera a utilização da ferramenta HECRASController. A metodologia utilizada na presente pesquisa segue a orientação descrita em Goodell (2014) de ampliar as funcionalidades do HECRASController manipulando os arquivos de entrada e saída do modelo com outras bibliotecas e utilizando o HECRASController apenas para abrir o projeto, executar a simulação e salvar o projeto de cada repetição. Na presente pesquisa, a ferramenta HECRASController é utilizada para incorporar as funcionalidades do programa HEC-RAS v. 5.0.7 e realizar as etapas acima descritas por meio das funções `Project_Open()`, `Compute_Current_Plan()` e `Project_Save()` respectivamente.

O módulo iii desenvolvido envolve a manipulação dos arquivos de saída do modelo. O primeiro dado armazenado pelo algoritmo é o conjunto de variáveis aleatoriamente amostradas em cada simulação. Esses dados são armazenados para avaliação do ajuste dos coeficientes de rugosidade gerados às distribuições probabilísticas adotadas por meio de análises gráficas. Considerando os resultados da modelagem, são armazenados os dados de área máxima de inundação em cada simulação realizada. Para isso, antes do início do MMC, o programa é configurado na funcionalidade *RASMapper > Results > Add New Results Map Layer* de forma a gerar um arquivo vetorial (.shp) de envoltória máxima de inundação salvo no disco. Ao configurar a geração desse resultado, o arquivo é armazenado em uma pasta criada automaticamente no diretório do projeto com o mesmo nome do cenário de simulação. Esse arquivo é atualizado automaticamente em cada iteração do MMC e é acessado por meio da biblioteca Geopandas para obtenção da área da envoltória máxima de inundação de cada iteração.

O próximo arquivo manipulado é armazenado com formatação hierárquica (HDF5) e recebe o mesmo código do plano de simulação definido (.p0xhdf). Esse arquivo contém diversas informações em relação à geometria do modelo, às condições de contorno estabelecidas e aos resultados gerados em cada uma das células da malha computacional. Para melhor compreender a organização desse arquivo,

utilizou-se o programa *HDFView 3.1.1* que possibilita visualização de arquivo HDF por meio de representação hierárquica.

Na Figura 4.4, pode-se visualizar a matriz de profundidades de escoamento simuladas em uma repetição, contendo número de colunas igual ao número de células da malha computacional e número de linhas igual ao número de intervalos de tempo simulados (*profiles*). Dessa forma, as profundidades de escoamento para cada tempo de simulação são representadas em cada linha da matriz e a variação das profundidades de escoamento em uma dada célula é representada em cada coluna da matriz armazenada.

Para a manipulação dos dados obtidos em cada uma das simulações, foi utilizada a biblioteca *h5py* que permite o acesso a cada uma das matrizes geradas para armazenamento tanto das profundidades máximas por simulação como também das profundidades ao longo dos intervalos de simulação em cada repetição de modo que pôde-se calcular os tempos de chegada da onda de ruptura. Para tal, tomou-se como referência a recomendação disposta em FEMA (2013) que considera uma variação notável do escoamento em uma dada região do vale de jusante por meio de valores entre 0,31 e 0,61 m (1 e 2 pés) de profundidade. Assim, o tempo de chegada da onda de ruptura foi computado considerando o limiar 0,61 m (2 pés).

The screenshot shows the HDFView 3.1.1 interface. The main window displays a table of data. The columns are labeled 314 through 321. The rows are labeled 69 through 79. The data consists of numerical values, likely representing flow or depth parameters. The interface includes a menu bar (File, Window, Tools, Help), a toolbar, and a sidebar with a tree view showing 'Time', 'Water', and 'Time Data'.

	314	315	316	317	318	319	320	321
69	99645	0.1301096	0.01019...	0.01007...	0.03148...	0.19830...	0.05552...	0.05322...
70	475...	0.12485...	0.00959...	0.00948...	0.03243...	0.19889...	0.05590...	0.05145...
71	129...	0.12137...	0.00914...	0.00905...	0.03929...	0.20311...	0.07181...	0.06793...
72	372...	0.11878...	0.00875...	0.00866...	0.03536...	0.20046...	0.06367...	0.06087...
73	573...	0.11673...	0.00837...	0.00828...	0.03096...	0.19799...	0.05435...	0.05210...
74	270...	0.1328344	0.00804...	0.00796...	0.03750...	0.20189...	0.06552...	0.05855...
75	704...	0.12715...	0.00780...	0.00773...	0.04136...	0.20463...	0.07633...	0.07231...
76	57203	0.15992...	0.00757...	0.00750...	0.03648...	0.20116...	0.06606...	0.06307...
77	194...	0.16234...	0.02637...	0.0257623	0.0437363	0.20594...	0.07927...	0.07427...
78	265...	0.14289...	0.01819...	0.01787...	0.04121...	0.20447...	0.07587...	0.07197...
79	177...	0.14169...	0.01482...	0.01458...	0.03624...	0.20097...	0.06540...	0.06258...

Figura 4.4 – Identificação de resultados da modelagem hidrodinâmica em arquivo HDF5.

Tomando as N matrizes de profundidade de escoamento armazenadas, o algoritmo realiza a manipulação dos dados para análise de variação espacial dos resultados por meio de mapas de inundação probabilísticos. Para isso, as matrizes de profundidade de escoamento foram convertidas em matrizes binárias com representação das células secas (valor 0) e células inundadas (valor 1).

O algoritmo desenvolvido para essa primeira parte da análise se encontra no Apêndice A desse texto.

4.1.2 Parte II – Variação de Parâmetros de Brecha

O desenvolvimento da Parte II do algoritmo computacional teve o intuito de automatizar as simulações do modelo bidimensional da ferramenta HEC-RAS de forma a variar os parâmetros de brecha de ruptura conforme distribuições probabilísticas adequadas, realizar múltiplas simulações e manipular os dados de saída do modelo possibilitando o mapeamento probabilístico de inundações. Na presente pesquisa, as incertezas nos parâmetros de brecha são consideradas por meio de cinco parâmetros sendo o tempo de formação, a inclinação dos taludes esquerdo e direito, a largura e a cota do fundo da brecha.

A escolha dos parâmetros citados se deu considerando estudos análogos realizados por McCann *et al.* (2016), Lara (2016), Tsai *et al.* (2019), Bellos *et al.* (2020) e Silva (2021) tendo em vista que variáveis como nível do reservatório e parâmetros específicos relacionados a ruptura por erosão interna (*pipping*) não foram considerados pois o estudo de caso proposto no presente trabalho considerou um cenário de ruptura por galgamento com nível inicial do reservatório referente a condição de iminência do galgamento. Todavia, ressalta-se que o algoritmo desenvolvido possui ampla capacidade de adaptação para considerar parâmetros

A metodologia de automatização foi novamente dividida em três módulos de desenvolvimento (Figura 4.5): (i) para manipulação de dados de entrada do modelo; (ii) para execução das simulações; (iii) para manipulação de dados de saída do modelo.

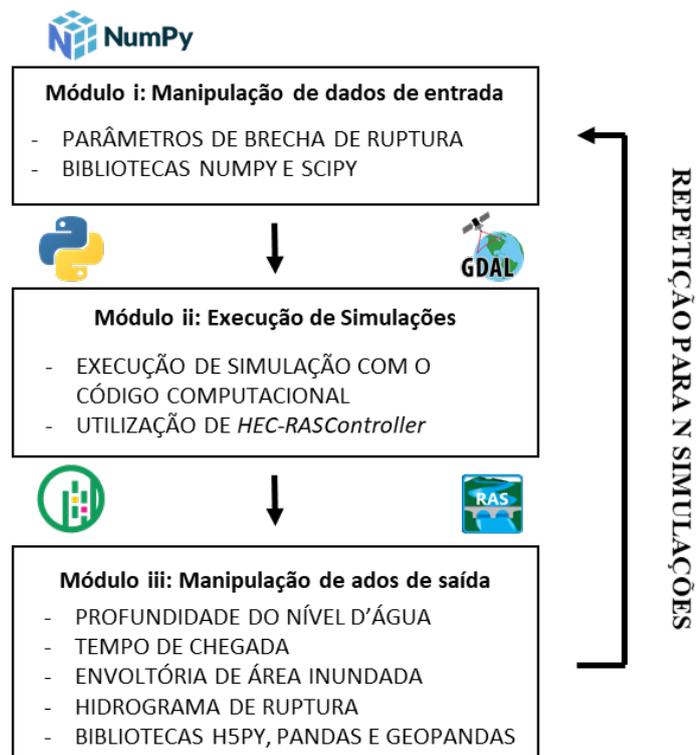


Figura 4.5 - Esquema da metodologia utilizada para automatização de simulações: Variação de parâmetros de brecha.

Para a aplicação do MMC considerando a variação dos parâmetros de brecha de ruptura, o módulo i se baseia na manipulação dos parâmetros de ruptura da barragem que são armazenados em arquivos de texto referentes aos dados do cenário de simulação (.p0X) que contém os dados de tempo de formação,

progressão, método (e.g: galgamento, erosão interna) e geometria da brecha de ruptura. A descrição completa do arquivo do cenário de simulação (.p0X) é apresentada em Goodell (2014), indicando a formatação dos dados e conseqüentemente a maneira como cada parâmetro deve ter manipulado para a correta leitura pelo programa. A Figura 4.6 apresenta a seção do arquivo do plano de simulação em que a geometria da brecha é armazenada destacando a linha referente à geometria da brecha, enquanto a Figura 4.7 apresenta a configuração da geometria da brecha na interface gráfica do HEC-RAS.

```
HDF Use Max Rows=0
HDF Fixed Rows= 1
Breach Loc= , , , True,barragem
Breach Method= 0
Breach Geom=150,60,212.5,1,1,False,,,0.54,1.7
Breach Start=False,272,01jan2000,0005,False,,,0
Breach Progression= 21
0 0 .05 .006 .1 .024 .15 .054 .2 .095
.25 .146 .3 .206 .35 .273 .4 .345 .45 .422
.5 .5 .55 .578 .6 .655 .65 .727 .7 .794
.75 .854 .8 .905 .85 .946 .9 .976 .95 .994
1 1
Simplified Physical Breach Downcutting= 2
0 0 1 1
Simplified Physical Breach Widening= 2
0 0 1 1
```

Figura 4.6 – Identificação de arquivo de plano de simulação (.p01).

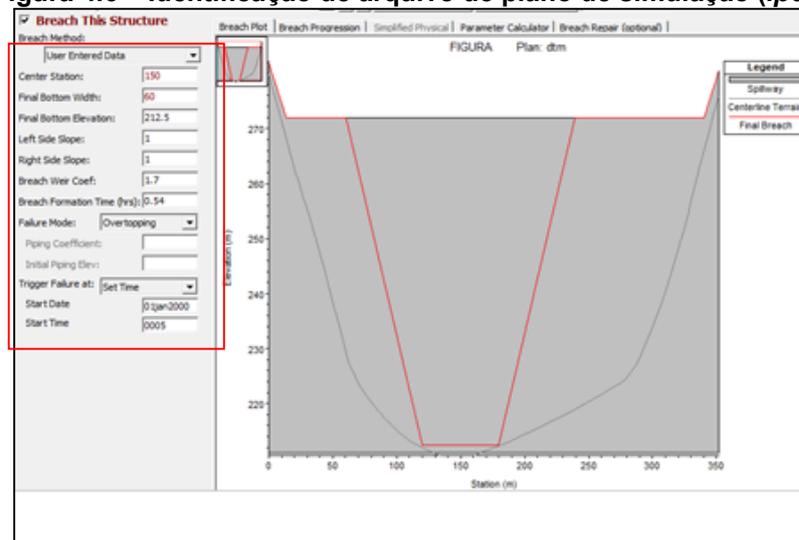


Figura 4.7 – Identificação de parâmetros de brecha na interface gráfica do HEC-RAS.

A geração dos valores aleatórios para os cinco parâmetros selecionados é feita por meio das bibliotecas *numpy* e *scipy* amplamente utilizadas para aplicações estatísticas tais como a geração de valores aleatórios para diversas distribuições probabilísticas.

Para a manipulação do arquivo de entrada (.p0X) e inserção dos novos valores gerados, o algoritmo elaborado utiliza as funções nativas da linguagem Python que permitem a leitura do arquivo de texto como um vetor em que cada elemento é referente a uma linha do arquivo de texto. Assim, o elemento referente aos parâmetros de brecha (Figura 4.6) pode ser manipulado de forma a inserir os novos valores gerados.

Tendo em vista a inserção e manipulação dos arquivos de entrada citadas anteriormente, o módulo ii considera a utilização da ferramenta *HECRASController*. Novamente, a ferramenta *HECRASController* é utilizada para incorporar as funcionalidades do programa HEC-RAS v. 5.0.7 e por meio das funções *Project_Open()*, *Compute_Current_Plan()* e *Project_Save()*.

O módulo iii envolve a manipulação dos arquivos de saída do modelo. O primeiro dado armazenado pelo algoritmo é o conjunto de variáveis aleatoriamente amostradas em cada simulação. Esses dados são armazenados para avaliação do ajuste dos parâmetros de brecha de ruptura às distribuições probabilísticas adotadas por meio de análises gráficas. Tendo em vista que a variação dos parâmetros de brecha resulta na determinação de diferentes hidrogramas de ruptura, foram armazenados os dados dos hidrogramas gerados por meio de parâmetros característicos: tempo e vazão de pico.

Os hidrogramas de ruptura são armazenados em arquivos do plano de simulação em formato HDF5, assim como os resultados de profundidade de escoamento, trazendo informações a partir de uma estrutura hierárquica. Para facilitar a localização dos hidrogramas de ruptura gerados nos arquivos de plano de simulação (.p01.hdf), utilizou-se novamente o programa *HDFView* que permite a exibição dos dados de forma intuitiva, como mostra a Figura 4.8. Observa-se na imagem a estrutura do arquivo que possui uma pasta exclusiva para os dados de saída do modelo e permite ao usuário acesso aos dados do hidrograma de ruptura da barragem salvos em um vetor de vazão ao longo dos intervalos de tempo.

A automatização da manipulação dos arquivos HDF5 gerados foi realizada com base na biblioteca *h5py*. Para cada simulação, foram calculados os parâmetros de vazão e tempo de pico.

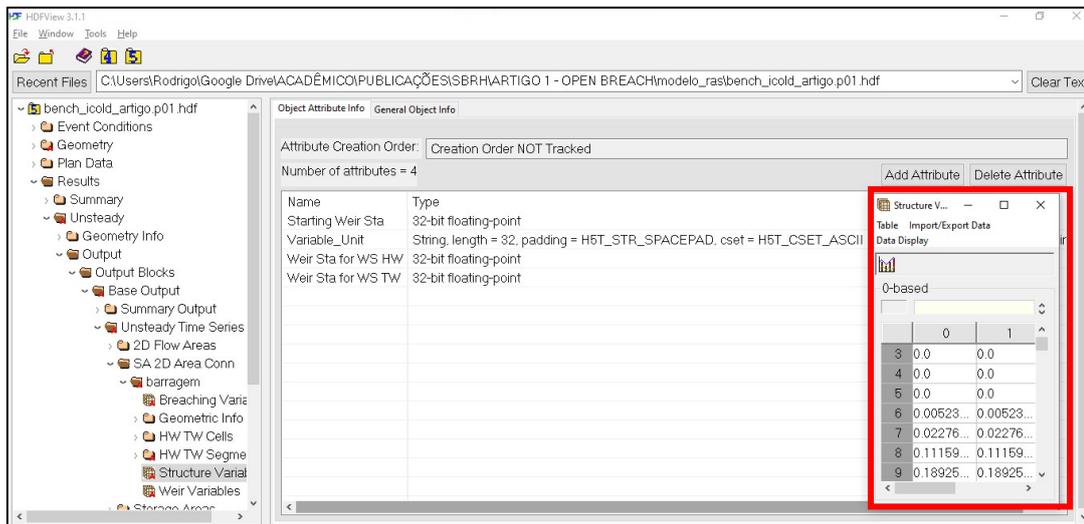


Figura 4.8 – Identificação de hidrograma de ruptura no arquivo de saída do modelo (.p01.hdf).

Para a manipulação dos dados obtidos em cada uma das simulações, foi novamente utilizada a biblioteca h5py que permite o acesso a cada uma das matrizes geradas para armazenamento tanto das profundidades máximas por simulação como também das profundidades ao longo dos intervalos de simulação em cada repetição de modo que pôde-se calcular os tempos de chegada da onda de ruptura. Para tal, tomou-se como referência a recomendação disposta em FEMA (2013) que considera uma variação notável do escoamento em uma dada região do vale de jusante por meio de valores entre 0,31 e 0,61 m (1 e 2 pés) de profundidade. Assim, o tempo de chegada da onda de ruptura foi computado considerando o limiar 0,61 m (2 pés).

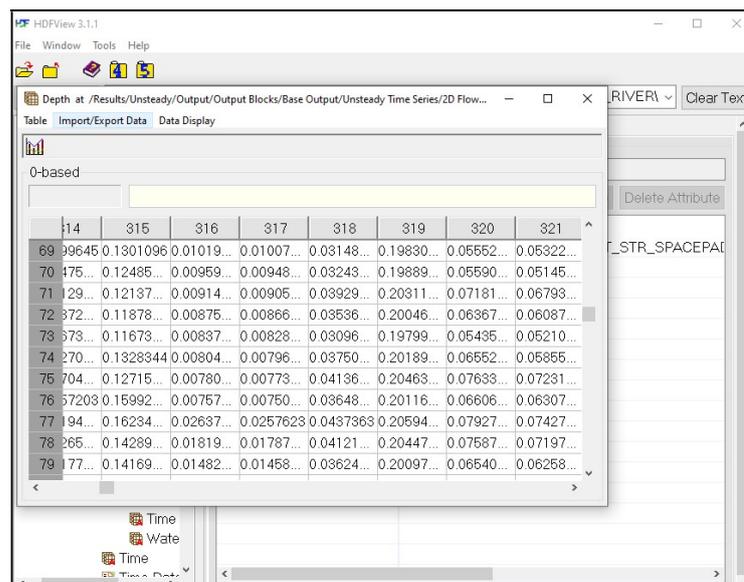


Figura 4.9 – Identificação de resultados da modelagem hidrodinâmica em arquivo HDF5.

Tomando as N matrizes de profundidade de escoamento armazenadas, o algoritmo realiza a manipulação dos dados para análise de variação espacial dos resultados por meio de mapas de inundação probabilísticos. Para isso, as matrizes de profundidade de escoamento foram convertidas em matrizes binárias com representação das células secas (valor 0) e células inundadas (valor 1).

O algoritmo desenvolvido para essa primeira parte da análise se encontra no Apêndice B desse texto.

4.1.3 Parte III – Análise de Resultados

A análise dos resultados obtidos com a aplicação do MMC nas variações do coeficiente de rugosidade de Manning e dos parâmetros de brecha considerou seis etapas: avaliação de variáveis aleatoriamente geradas (1), análise geral de parâmetros hidrodinâmicos (2), análise regional de parâmetros hidrodinâmicos (3), análise local de parâmetros hidrodinâmicos (4), mapas de inundação probabilísticos (5) e avaliação de demanda computacional (6).

A avaliação das variáveis aleatoriamente geradas buscou avaliar o ajuste dos parâmetros aleatoriamente gerados as respectivas distribuições probabilísticas. Para isso foram elaborados gráficos com a sobreposição dos histogramas das variáveis geradas pelas curvas de função de densidade de probabilidades.

A análise geral de parâmetros hidrodinâmicos considerou a variação das áreas máximas inundadas e a variação dos hidrogramas de ruptura especificamente para os resultados do MMC com variação dos parâmetros de brecha. Tomando as N áreas de inundação armazenadas, a primeira análise de sensibilidade do modelo é referente a estatística descritiva dos valores obtidos e a representação gráfica por meio de diagrama de caixa. Como apresentado no item 4.1.2, os parâmetros de vazão e tempo de pico dos hidrogramas de ruptura gerados para o MMC com variação dos parâmetros de brecha foram armazenados de forma que pôde-se analisar a variação dos hidrogramas de ruptura por meio do cálculo de quantis.

A análise regional foi realizada a partir de seções definidas com espaçamento de 1 km com origem no eixo do barramento e traçados até 10 km ao longo do talvegue

principal considerando a extensão da Zona de Autossalvamento (ZAS) com base no critério estabelecido em legislação recente (MINAS GERAIS, 2019; BRASIL, 2017) que definem que a delimitação da Zona de Autossalvamento (ZAS) deve ser realizada considerando a distância que corresponda a um tempo de chegada da onda de inundação igual a trinta minutos ou 10km. Tomando o traçado das seções e os N resultados hidráulicos obtidos em cada uma das células da malha computacional, foram determinados perfis representando o intervalo de variação das profundidades de escoamento em cada um dos pontos da seção. Para isso, foram estabelecidos os perfis de nível d'água associados às probabilidades de excedência de 25, 50, 75 e 90%.

Na análise local, foram amostrados pontos de referência relacionados a diferentes regiões da área de estudo nos quais determinou-se a variação dos resultados hidráulicos por meio de estatística descritiva e gráficos de dispersão. As regiões foram definidas com base em características de zoneamento urbano, sendo essas regiões classificadas como estabelecimento comercial, área residencial e centro empresarial.

Para a elaboração dos mapas de inundação probabilísticos considerou-se que, na ampla maioria dos estudos recentes, o mapeamento probabilístico é realizado por meio da transformação das matrizes de profundidade de escoamento em dados binários, sendo atribuído o valor zero para a célula seca e o valor um para a célula inundada em cada uma das repetições simuladas (BEVEN et. al, 2014; CANDELA et. al, 2016; DOMENEGHETTI et. al, 2013; PAPAIOANNOU et. al, 2017; STEPHENS et. al, 2019). Dessa maneira, a probabilidade de inundação em cada uma das células da área de estudo é determinada por meio da aplicação da Eq. 14.

$$P_{inundacao} = \frac{N^{\circ} \text{ CENÁRIOS COM CÉLULA INUNDADA}}{N^{\circ} \text{ TOTAL DE CENÁRIOS SIMULADOS}} \quad \text{Eq. 14}$$

A última etapa de análise considerou a avaliação da demanda computacional requerida para a execução das simulações tanto nos cenários com variação do coeficiente de rugosidade de Manning quanto nos cenários com variação dos parâmetros de brecha de ruptura por meio de gráficos de dispersão de diagramas de caixa.

4.2 Escolha de distribuições de probabilidades

Para a elaboração do mapeamento probabilístico de inundações, é fundamental se determinar distribuições de probabilidades representativas para as variações dos parâmetros cujas incertezas estão sendo analisadas. No presente estudo, essa determinação se deu com base na análise de literatura recente desenvolvida conforme será apresentado para o coeficiente de rugosidade de Manning (item 4.2.1) e para os parâmetros de brecha de ruptura (item 4.2.2).

4.2.1 Variação de coeficiente de rugosidade de Manning

Critérios para a escolha da distribuição probabilística a ser utilizada para o coeficiente de rugosidade de Manning são encontrados com escassez na literatura. USACE (1986) apresenta um estudo empírico que avaliou os coeficientes de rugosidade de Manning para dez trechos de mananciais com o intuito de analisar a variação das estimativas do coeficiente de rugosidade. A metodologia utilizada considerou a realização de estimativas do coeficiente de rugosidade por diferentes equipes de engenharia hidráulica considerando eventos com tempo de retorno de dois anos. O estudo considerou as distribuições uniforme, normal e lognormal e indicou a distribuição lognormal como de melhor ajuste com base na comparação dos histogramas das curvas de densidade de probabilidade das distribuições candidatas.

Pappenberger *et al.* (2005) utilizou a distribuição uniforme como distribuição de probabilidades *a priori* associado a aplicação do método Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) e aplica técnicas de estatística bayesiana para obter distribuições probabilísticas que melhor se ajustam aos dados de entrada do modelo hidrodinâmico considerando dados observados de inundações históricas. Em aplicações análogas, Yu *et al.* (2015) e Beven *et al.* (2014) aplicaram o método GLUE associado às distribuições uniforme e normal respectivamente. Todavia, em nenhuma das três aplicações referidas houve detalhamento em relação aos critérios utilizados para escolha da distribuição probabilística.

Tomando uma linha diferente da anterior, Papaioannou *et al.* (2017) realizaram coletas de material do fundo do talvegue para estimativa da distribuição do

coeficiente de rugosidade por meio da utilização de equações empíricas em função da granulometria do material. Os autores utilizaram o Método da Contagem de Seixos (*Wolman Pebble Count Method*) associado a diâmetros de referências pré-definidos (d_{50} , d_{65} , d_{75} , d_{84} e d_{94}) e tomaram como candidatas as distribuições Normal, Lognormal, Exponencial, Gamma, Beta, Uniforme, Logística, Cauchy e Weibull. Os resultados obtidos apontaram para a distribuição Lognormal como de melhor ajuste seguida pela distribuição Gamma.

Stephens *et al.* (2019) utilizou o método de Monte Carlo adotando a distribuição lognormal para o coeficiente de rugosidade de Manning considerando os estudos apresentados em USACE (1986). A metodologia aplicada pelos autores considerou como média o valor pré-calibrado desse parâmetro e desvio padrão calculado por meio das equações estabelecidas em USACE (1986).

Para o desenvolvimento da metodologia proposta no presente estudo, considerou-se aplicação análoga a de Stephens *et al.* (2019) tendo em vista os estudos desenvolvidos em Papaioannou *et al.* (2017) e USACE (1986). Assim, a distribuição Lognormal foi selecionada tomando o parâmetro da média por meio de referência da literatura (USACE, 2021) e desvio padrão adotado por meio das equações propostas por USACE (1986) que consideram o valor médio atribuído à distribuição e à confiabilidade de estimativa desse parâmetro, conforme Eq. 15:

$$\sigma = N_r * (0,582 + 0,1 * \ln(n))$$

Eq. 15

Onde N_r representa o coeficiente de confiabilidade podendo (0 – coeficiente de Manning estabelecido com exatidão; 0,5 para estimativa com moderada confiabilidade e 1,0 para baixa confiabilidade com inexistência de calibração ou investigações de campo).

4.2.2 Variação de Parâmetros de Brecha

Estudo recentes apontam para o uso de diferentes distribuições de probabilidades para ajuste dos parâmetros de brecha de ruptura. Altinakar *et al.* (2013) considerou o equacionamento empírico proposto por Froehlich (1995) com erros variando conforme a distribuição lognormal. Lara (2016) considerou as distribuições uniforme

e normal para variação dos parâmetros de brecha por meio da realização de 20.000 simulações com a ferramenta McBreach associada ao módulo unidimensional do programa HEC-RAS. Goodell *et al.* (2018) também utilizou a ferramenta McBreach para realização de 10.000 simulações, porém considerou a variação de nove parâmetros de brecha (i.e: elevação do fundo, largura de fundo, inclinação lateral, tempo de formação, início de falha, coeficiente de reservatório, tipo de progressão, coeficiente de erosão interna, elevação inicial de erosão) seguindo uma distribuição normal. De forma análoga, Bellos *et al.* (2020) considerou a distribuição uniforme para ajuste dos parâmetros de brecha em uma aplicação do método de Monte Carlo para 10.000 repetições do módulo unidimensional do programa HEC-RAS.

Apesar de apresentar diversos avanços em relação à geração probabilística de hidrogramas de ruptura, os estudos acima mencionados adotaram majoritariamente distribuições de probabilidades baseadas em premissas conceituais. Lara (2016) adotou valores de referência para as variações realizadas por meio das distribuições uniforme e normal. Goodell *et al.* (2018) considerou as premissas dispostas em FERC (2014) que estabelecem relações para determinação dos valores mínimos e máximos associados à distribuição normal. Bellos *et al.* (2020) considerou intervalos considerados como faixas de valores plausíveis para a aplicação da distribuição uniforme.

Altinakar *et al.* (2013) considerou o estudo desenvolvido por WAHL (2004) baseado na análise de casos históricos de rompimentos de barragens para estabelecer os intervalos de erros nas estimativas dos parâmetros de brecha por meio de equações empíricas.

Nessa linha, Silva (2021) apresenta um estudo recente com a utilização de ampla base de dados para a análise de distribuições de probabilidades dos parâmetros de brecha. O estudo realizado por Silva (2021) utilizou uma base de dados apresentada em Bernard-Garcia & Mahdi (2020) que é composta por 3.861 registros de ruptura de barragens localizadas em 69 países, contendo informações referentes aos parâmetros de brecha identificados e as características das barragens amostrada. Como disposto em Silva (2021), 2.769 registros são referentes a barragens construídas com algum tipo de controle e 1.049 representam barragens naturais

oriundas de escorregamentos de terra nas encostas dos cursos de água. Os 43 registros restantes se dividem em barragens de rejeitos (19), modelos reduzidos de laboratório (18) e ensecadeiras (6). A aplicação realizada considerou as barragens construídas em aterros, que totalizaram 1.954 registros.

A consideração das distribuições probabilísticas dos parâmetros de brecha da presente pesquisa tomou como referência o estudo desenvolvido por Silva (2021) que considerou o levantamento de registros de rompimentos de barragens para identificar as distribuições probabilísticas que melhor se ajustam aos parâmetros de i) declividade da parede lateral (Z); ii) razão entre as alturas da brecha e da barragem (H_b/H_d); iii) tempo de formação da brecha (T_f) e iv) razão entre a larguras de fundo da brecha e o comprimento da crista da barragem (L_{bf}/L_{crista}).

A partir dos 1.954 registros levantados, o autor filtrou as barragens que possuíam dados completos de parâmetros de brecha, considerando a ocorrência de dados faltantes. A Tabela 4.1 apresenta a estatística descritiva das amostras dos parâmetros de brecha extraídos da base de dados de referência.

Tabela 4.1 – Estatística descritiva das amostras dos parâmetros de brecha.

Estatística	Z (m/m)	H_b/H_d(m/m)	T_f(h)	L_{bf}/L_{crista} (m/m)
Tamanho da Amostra	185	314	84	144
Média	1,72	0,91	1,06	0,13
Mediana	0,97	1,00	0,75	0,07
Moda	0,00	1,00	0,50	0,00
Desvio Padrão	2,53	0,39	0,95	0,18
Variância	6,39	0,15	0,90	0,03
Coefficiente de Variação	1,47	0,43	0,90	1,40
Mínimo	0,00	0,00	0,08	0,00
Máximo	17,82	5,33	5,50	1,00

Fonte: SILVA, 2021.

De posse dos registros com dados completos de parâmetros de brecha, a metodologia adotada pelo autor considera uma etapa inicial de análise comparativa por grupos e uma etapa seguinte de avaliação do ajuste de diferentes distribuições probabilísticas aos conjuntos amostrais com verificação dos melhores ajustes. A Figura 4.10 apresenta o fluxograma metodológico da identificação das distribuições

de probabilidade de parâmetros de brecha de ruptura de barragens de terra contemplando as duas etapas citadas anteriormente.

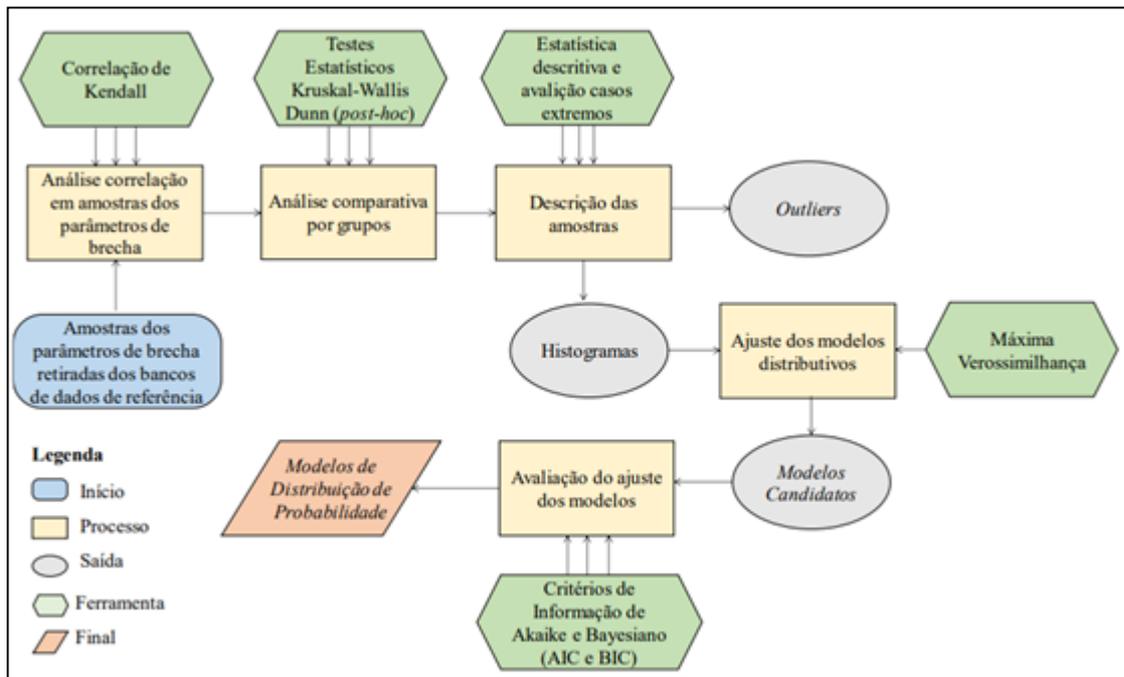


Figura 4.10 – Fluxograma metodológico aplicado para ajuste de distribuições probabilísticas aos parâmetros de brecha.

Fonte: SILVA, 2021.

Por meio da aplicação dos procedimentos descritos, Silva (2021) identificou que os parâmetros de inclinação lateral, tempo de formação e largura da brecha foram melhor ajustados pela distribuição Gamma com base nos critérios de informação de Akaike (AIC) e Bayesiano (BIC). Por outro lado, o parâmetro de altura da brecha obteve melhor ajuste para a distribuição Assimétrica de Laplace. A Tabela 4.2 apresenta o resumo das distribuições probabilísticas avaliadas como de melhor ajuste e os respectivos parâmetros das distribuições. Como pode ser visto, o autor apresentou diferentes ajustes de inclinação lateral para falhas por galgamento ou erosão interna, além de diferentes ajustes de largura da brecha em função do tipo da barragem, classificadas como estreitas, intermediárias e largas.

Tabela 4.2 – Distribuições probabilísticas de melhor ajuste aos parâmetros de brecha.

Amostra	Melhor Ajuste	Parâmetros	
		Valores	Descrição
Z - Galgamento	Gama	$\eta = 0,4974$ $\theta = 0,2281$	Forma e taxa
Z - Erosão Interna	Gama	$\eta = 0,7618$ $\theta = 0,8042$	Forma e taxa
Hb/HD	ALD	$m = 1,0000$ $\lambda = 0,0630$ $\kappa = 0,6933$	Posição, escala e assimetria
Tf	Gama	$\eta = 1,5932$ $\theta = 1,5007$	Forma e taxa
Lbf/Lcrista - Bar. est. total	Gama	$\eta = 0,2515$ $\theta = 1,6397$	Forma e taxa
Lbf/Lcrista - Bar. est. pad.	Gama	$\eta = 0,2568$ $\theta = 2,2476$	Forma e taxa
Lbf/Lcrista - Bar. int. total	Gama	$\eta = 0,5454$ $\theta = 3,6964$	Forma e taxa
Lbf/Lcrista - Bar. est. Pad.	Gama	$\eta = 0,5649$ $\theta = 4,1954$	Forma e taxa
Lbf/Lcrista - Bar. Largas	Gama	$\eta = 0,5402$ $\theta = 10,3472$	Forma e taxa

Fonte: SILVA, 2021.

Para o desenvolvimento da metodologia proposta no presente estudo, foram adotadas as distribuições Gama e Assimétrica de Laplace conforme resultados apresentados por Silva (2021). Para a inclinação lateral da brecha, utilizou-se os parâmetros ajustados para falhas por galgamento ao passo que se considerou barragens estreitas para a escolha dos parâmetros da distribuição Gama.

4.3 Estudo de caso

Com o intuito de compreender o impacto de incertezas relacionadas a parâmetros de brecha conjuntamente com as relacionadas ao coeficiente de rugosidade de Manning, e de modo a validar a ferramenta desenvolvida, elaborou-se um estudo de caso de mapeamento probabilístico de inundação decorrente do rompimento hipotético de uma barragem de terra.

Para isso, foram utilizados os dados dispostos em Zenz & Goldgruber (2013), disponibilizados por Silva (2021). O caso selecionado para análise se trata de um estudo promovido pelo ICOLD no *12° International Benchmark Workshop 2013* que abordou análises numéricas em barragens. O caso apresentado corresponde a uma barragem fictícia implantada em um ambiente virtual. A escolha do referido estudo de caso se deu considerando a ampla disponibilidade de dados (i.e: topografia, uso e cobertura do solo, características do barramento) e a existência de estudos anteriores na área (Altinakar *et al.*, 2013; Silva, 2021).

Os itens seguintes apresentam a área de estudo analisada, as premissas adotadas e a configuração do modelo hidrodinâmico elaborado no programa HEC-RAS.

4.3.1 Área de estudo

Conforme apresentado em Zenz & Goldgruber (2013), a área de estudo em questão trata de um barramento hipotético construído em região montanhosa com finalidades de amortecimento de cheias provenientes de degelo e de eventos climatológicos intensos. A Figura 4.11 e a Figura 4.12 apresentam respectivamente uma vista frontal e traseira do reservatório que pode ser identificado em uma topografia de vale encaixado.

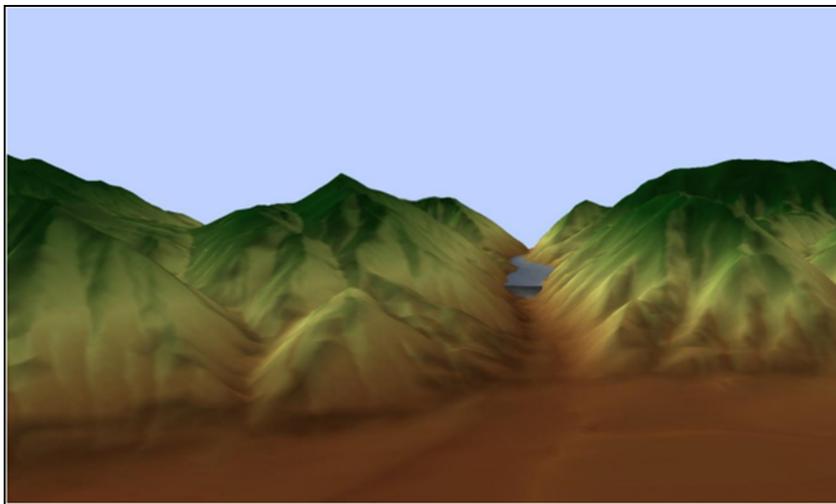


Figura 4.11 – Vista frontal do reservatório analisado no estudo de caso.

Fonte: ZENZ & GOLDGRUBER, 2013.

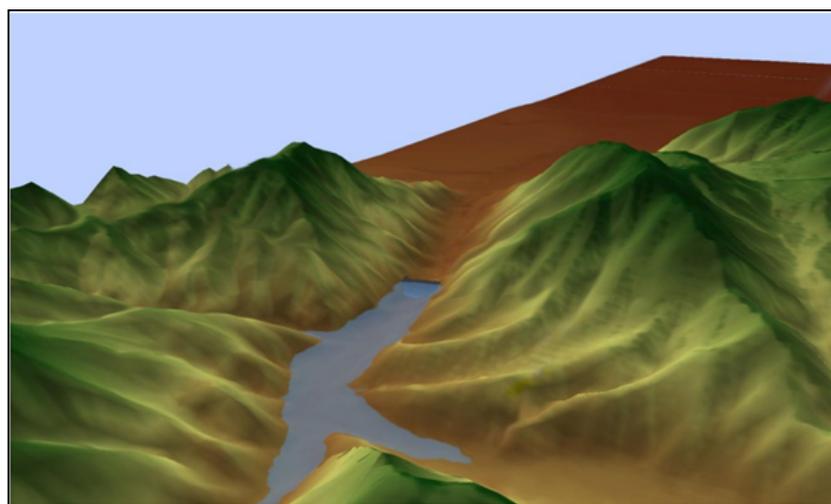


Figura 4.12 – Vista traseira do reservatório analisado no estudo de caso.

Fonte: ZENZ & GOLDGRUBER, 2013.

O barramento em análise possui elevado potencial de dano associado tendo em vista que está localizado a cerca de 3,5 km de uma área urbanizada referente ao município hipotético de Hydropolis. A Figura 4.13 apresenta uma planta geral da área de estudo indicando a localização do barramento, da área urbana potencialmente afetada e a existência de um lago no limite de jusante da área de estudo.

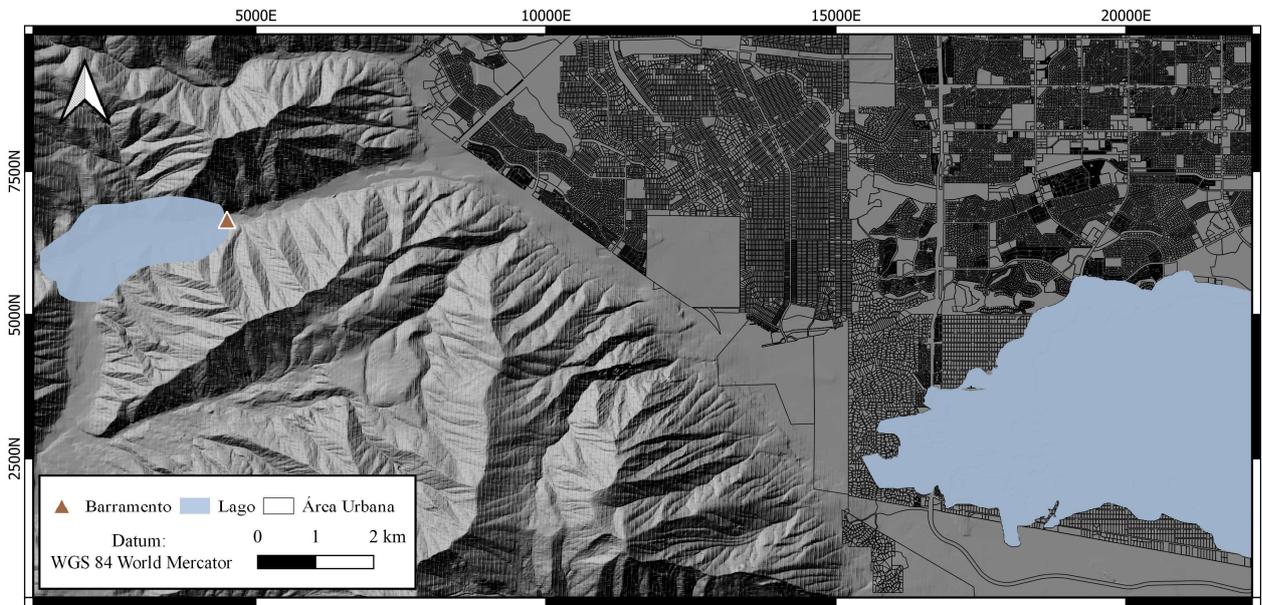


Figura 4.13 - Planta geral da área de estudo.

a) Características do Barramento

O barramento hipotético é composto predominantemente por solos argilo-arenosos e areno-argilosos, possuindo 61 metros de altura. A Figura 4.14 apresenta uma seção transversal da barragem ao passo que a Figura 4.4 apresenta dados complementares da geometria da estrutura.

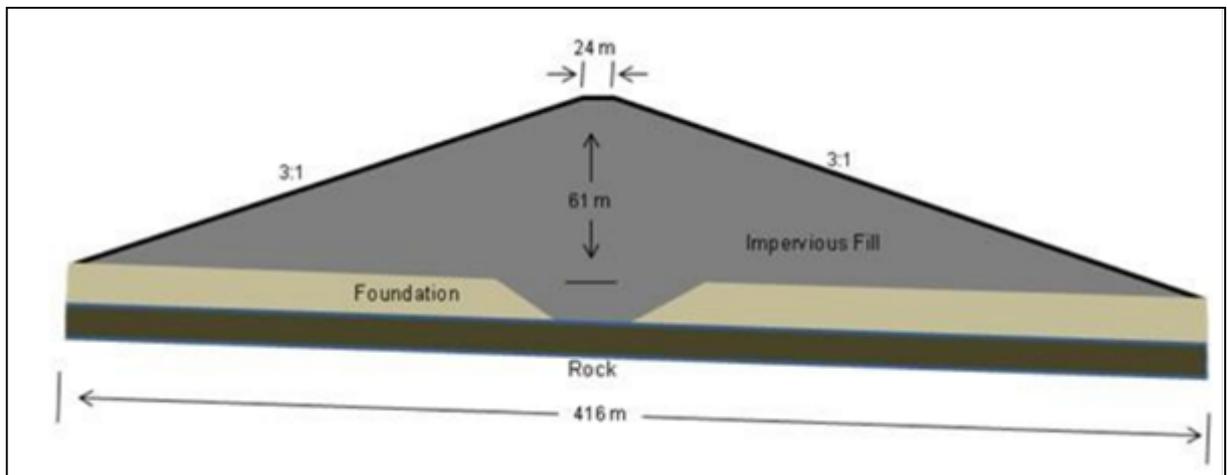


Figura 4.14 - Seção transversal do maciço da barragem avaliada.

Fonte: ZENZ & GOLDGRUBER, 2013.

Tabela 4.3 – Características gerais da barragem em análise.

Parâmetro	Valor
Coordenadas Lat/Long ¹	4499,66 m / 6681,57 m
Comprimento de Crista (m)	360
Largura da Crista (m)	24
Elevação da Crista (m)	272
Elevação do leito fluvial (m)	211
Inclinação do talude de montante (?H:1V)	3
Inclinação do talude de jusante (?H:1V)	3

¹ Datum: WGS 84 / World Mercator (EPSG 3395)

b) Curva Cota x Área x Volume

O reservatório em análise possui capacidade máxima de cerca de 38 milhões de metros cúbicos considerando a elevação da crista do barramento (El. 272 m). A Figura 4.15 apresenta a Curva Cota x Área x Volume do reservatório.

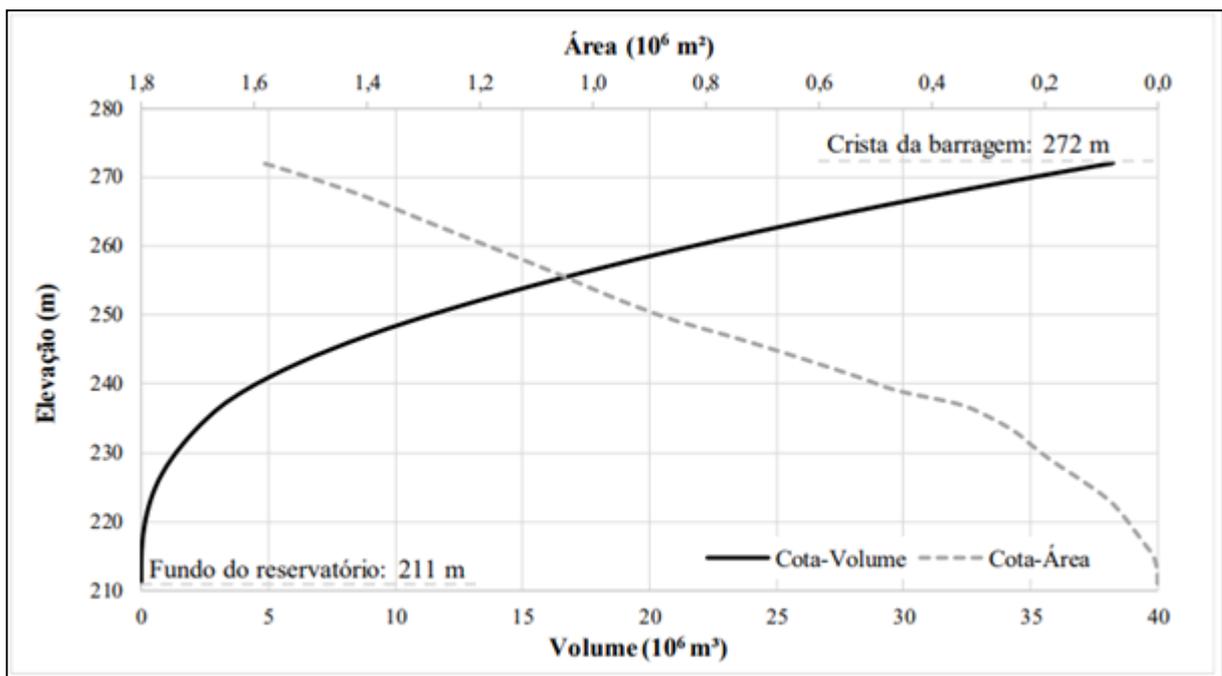


Figura 4.15 – Curva Cota-Volume do reservatório analisado.

Fonte: Silva, 2021.

c) Altimetria

Os dados topográficos fornecidos consistem em dois Modelos Digitais de Terreno (MDT) com resolução espacial de 9,5 metros representando a topografia antes e após a implantação do barramento em análise. A Figura 4.16 apresenta o mapa hipsométrico da área em estudo. Como pode ser visto, o barramento está localizado em uma região de vale bastante encaixado com cerca de 3,5 km de comprimento a partir do barramento. Após esse trecho, a topografia da região é caracterizada pela presença de uma planície aberta com relevo bastante plano e a existência de um lago beirando o centro populacional da área de estudo.

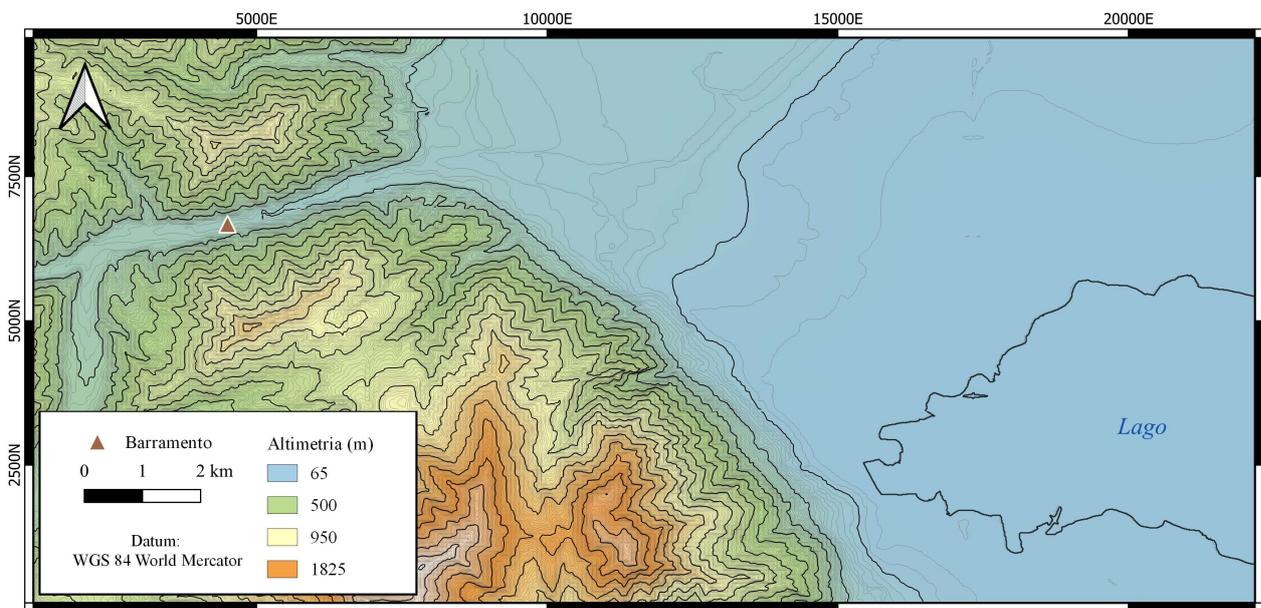


Figura 4.16 - Mapa hipsométrico da área de estudo.

d) Uso e Cobertura do Solo

Em relação aos dados de uso e cobertura do solo, foi fornecido um arquivo matricial com a mesma resolução espacial do Modelo Digital de Terreno (9,5 metros) e classificação conforme padrão *National Land Cover Database* (NLCD) estabelecido pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). A Tabela 4.4 apresenta os identificadores da classificação NLCD com as respectivas descrições de uso e cobertura do solo ao passo que a Figura 4.17 identifica a distribuição dessas categorias na área de estudo.

Tabela 4.4 – Classificação de uso e cobertura do solo conforme padrão NLCD.

Classe NLCD	Descrição	Classe NLCD	Descrição
11	Corpo Hídrico	41	Floresta Densa
12	Neve	42	Floresta Perene
21	Área desenvolvida (locais abertos)	43	Floresta mista
22	Área desenvolvida (baixa intensidade)	52	Arbustos
23	Área desenvolvida (média intensidade)	71	Vegetação baixa
24	Área desenvolvida (Alta intensidade)	81	Pastagem
31	Solo (rocha/areia/argila)	82	Terras agrícolas

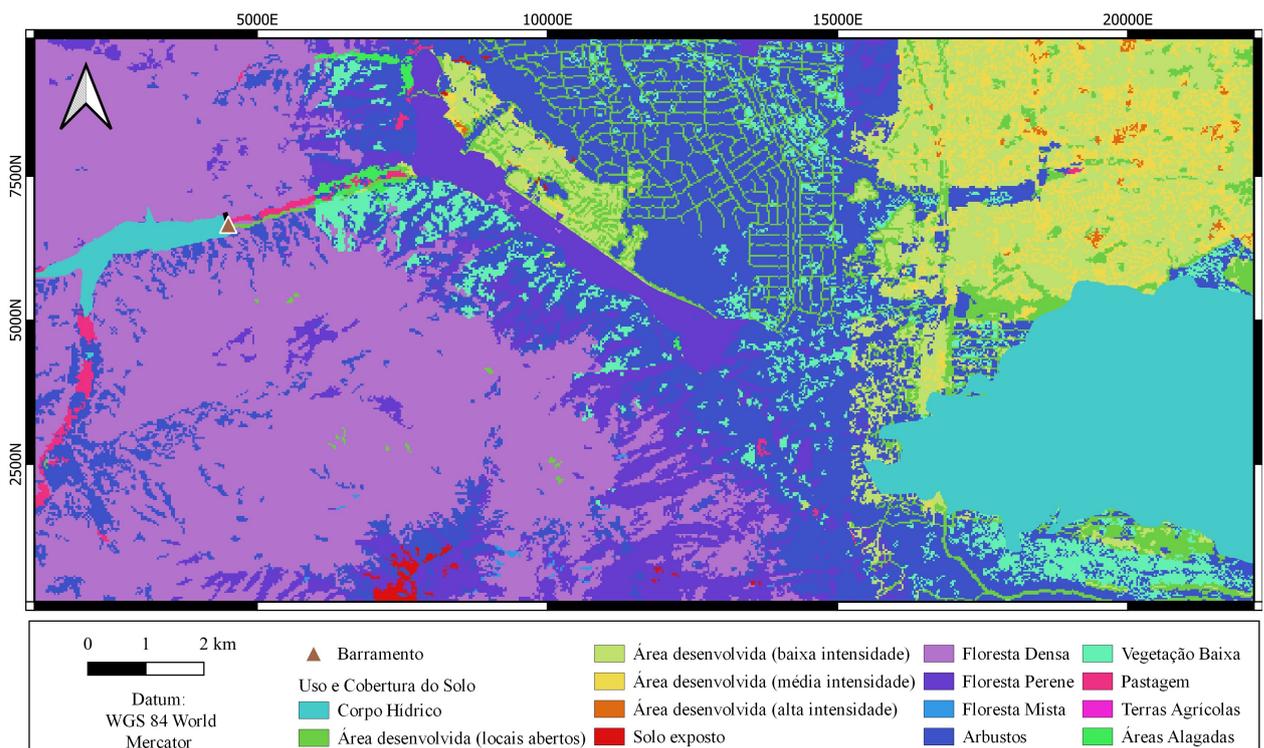


Figura 4.17 - Mapa de uso e cobertura do solo da área de estudo.

e) Zonas Urbanas

Além dos dados acima citados, foi fornecido um arquivo vetorial de zonas urbanas (e.g: residencial, comercial, empresarial etc.). A Figura 4.18 e a Tabela 4.5 apresentam a descrição das diferentes zonas na área de estudo.

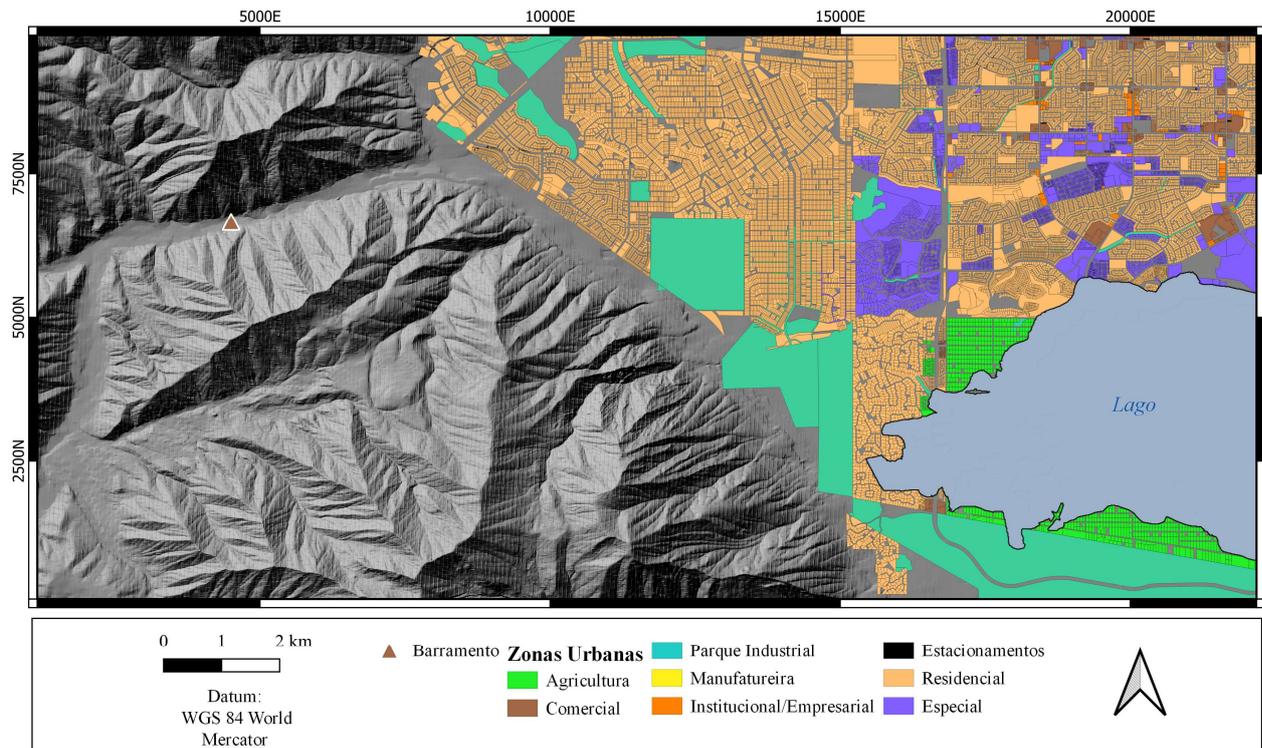


Figura 4.18 – Zonas urbanas da área de estudo.

Tabela 4.5 – Descrição das zonas urbanas da área de estudo.

Código	Descrição de Zonas
A-1 / A-2	Agricultura
AP	Zona de Proteção Aeroportuária
C-1 / C-2 / C-3	Zona Comercial
IP	Zona de Parque Industrial
M-1	Zona Manufatureira
O-1	Zona Institucional e Empresarial
P	Zona de Estacionamentos
P-R	Zona de Reserva
R-1 / R-2 / R-3 / RA-1 / RA-2 / R-D/R-LT / R-T	Zona Residencial
RO-1 / RO - 20	Zona Rural
SD-LC-1	Zona de Limite Comercial
SD-RO	Zona Residencial/Empresarial
SU-1 / SU-2 / SU-3	Zona Especial
UCO	Zona de Conservação Urbana
WO	Zona de Sobreposição

4.3.2 Abordagem adotada

A elaboração do estudo de caso considerou a aplicação conjunta dos algoritmos computacionais desenvolvidos para variação do coeficiente de rugosidade e dos parâmetros de brecha de ruptura (itens 4.1.1 e 4.1.2). A abordagem metodológica utilizada foi de variação intercalada dos parâmetros em análise, ou seja, aplicação do MMC com variação do coeficiente de rugosidade de Manning para um cenário fixo de parâmetros de brecha e aplicação do MMC com variação dos parâmetros de brecha para um cenário fixo de coeficiente de rugosidade. A Figura 4.19 sintetiza a abordagem metodológica utilizada.

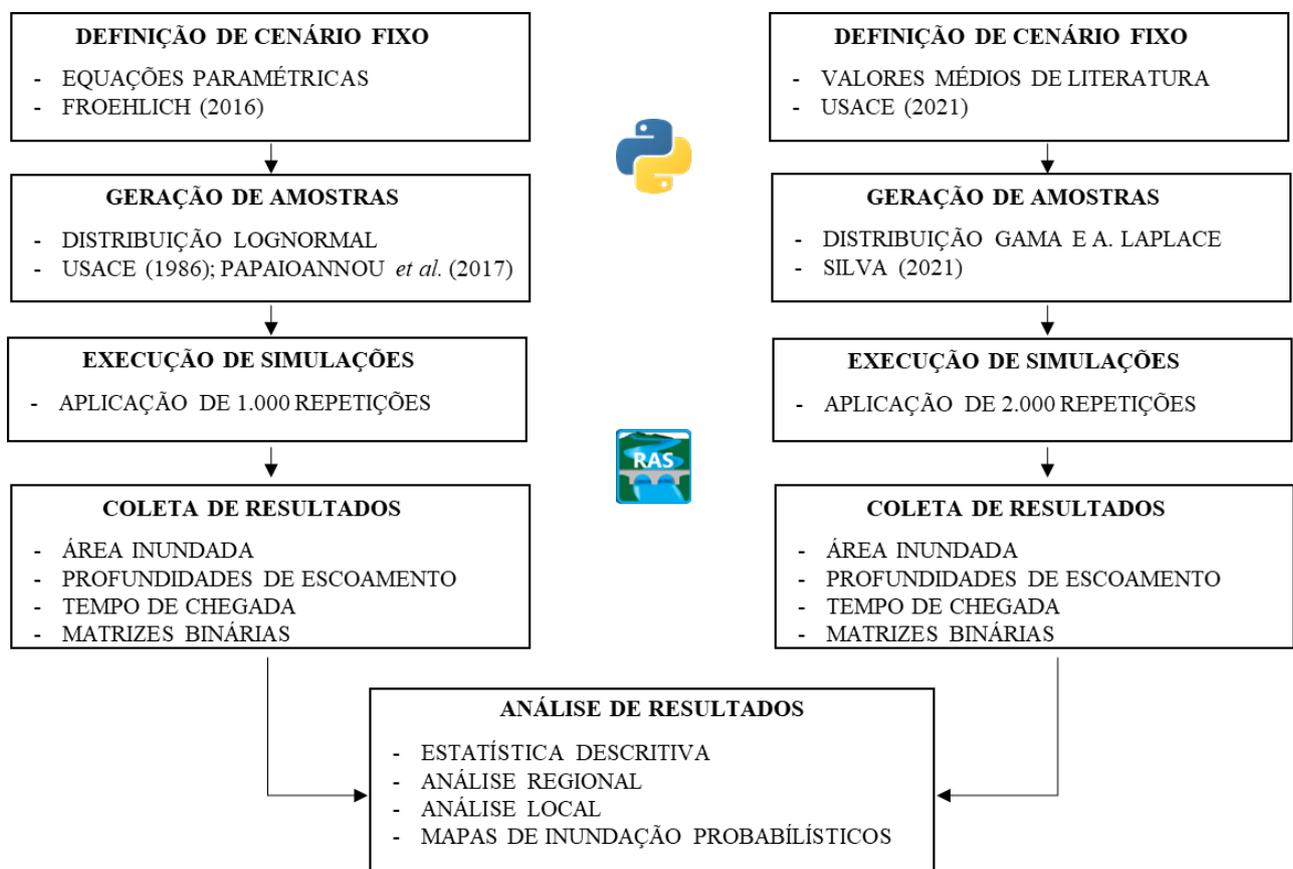


Figura 4.19 - Esquema metodológico adotado no estudo de caso.

Para a variação do coeficiente de rugosidade de Manning, fez-se necessária a definição de um cenário fixo de rompimento da barragem. Para isso, utilizou-se as equações empíricas Eq. 16 e Eq. 17 dispostas em Froehlich (2016):

$$\bar{B} = 0,23 \cdot K_o \cdot Vw^{1/3}$$

Eq. 16

$$T_f = 60 \cdot \sqrt{\frac{V_w}{g \cdot H_b^2}} \quad \text{Eq. 17}$$

Onde: B é a largura média da brecha (m); V_w é o volume do reservatório (m^3); H_b é a altura da brecha (m), adotado como 61 m (altura do maciço); Z é a inclinação lateral (m/m), adotada como 1 (galgamento); K_o é adotado como 1,5 (galgamento).

A escolha do equacionamento empírico de Froehlich (2016) se deu considerando a ampla utilização da metodologia em estudos de rompimento de barragens, além da adoção desse equacionamento em trabalhos desenvolvidos no mesmo estudo de caso em questão (ALTINAKAR *et al.*, 2013; THAMES *et al.*, 2013; SABERI *et al.*, 2013; MCVAN *et al.*, 2013; WILLIAMS *et al.*, 2013). Com base nos parâmetros definidos, o hidrograma de ruptura adotado para o cenário de variação do coeficiente de rugosidade de Manning é apresentado na Figura 4.20.

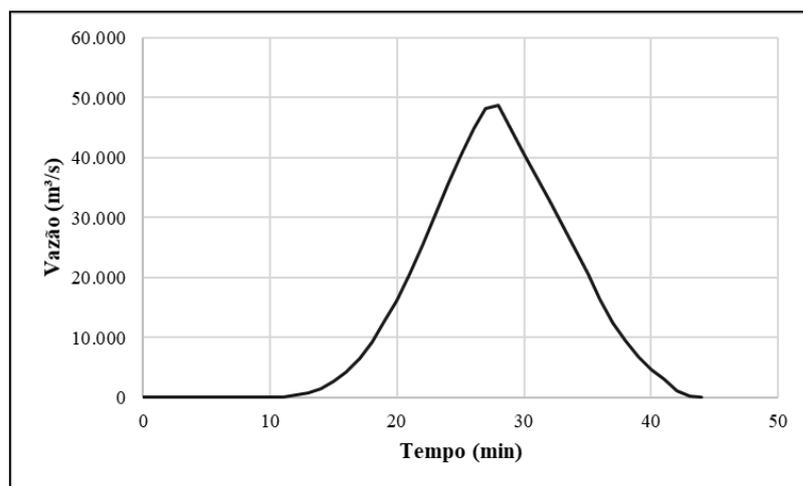


Figura 4.20 - Hidrograma de ruptura gerado para cenário fixo com variação de coeficiente de rugosidade de Manning.

Tomando os valores fixos de parâmetros de brecha, foram realizadas 1000 simulações com variação do coeficiente de rugosidade de Manning das diferentes classes de uso do solo. Conforme apresentado no item 4.2.1, a distribuição Lognormal foi selecionada para sorteio aleatório dos valores de coeficiente de rugosidade. Para definição do parâmetro médio, utilizou-se os valores de referência dispostos em USACE (2021) considerando a classificação NLCD. A Tabela 4.6 apresenta os tipos de uso e cobertura do solo identificados na área de estudo, os

valores médios de referência e os parâmetros da distribuição Lognormal ajustada. Ressalta-se que cinco das doze classes de uso e cobertura do solo foram identificadas em parcelas pequenas da área de estudo (< 1%) de modo que foram representadas com os valores médios de literatura e não tiveram variação probabilística devido à baixa significância.

Tabela 4.6 – Tipos de uso e cobertura do solo identificados na área de estudo e respectivos parâmetros de distribuições probabilísticas.

ID	Descrição	Valor Médio	Valor Médio Ajustado	Desvio Padrão Ajustado
11	Corpo Hídrico	0,0375	-3,28	0,25
21	Área desenvolvida (locais abertos)	0,04	-3,22	0,26
22	Área desenvolvida (baixa intensidade)	0,09	-2,41	0,34
23	Área desenvolvida (média intensidade)	0,12	-2,12	0,37
42	Floresta Perene	0,12	-2,12	0,37
52	Arbustos	0,115	-2,16	0,37
71	Vegetação baixa	0,0375	-3,28	0,25
41*	Floresta Densa	0,15	-	-
90*	Pântanos arborizados	0,0975	-	-
81*	Pastagem	0,0375	-	-
24*	Área desenvolvida (Alta intensidade)	0,16	-	-
31*	Solo (rocha/areia/argila)	0,0265	-	-

* Classes de uso e cobertura do solo referentes a pequenas parcelas da área de estudo (< 1%)

De forma análoga, a aplicação do MMC para a variação dos parâmetros de brecha necessitou da definição de um cenário fixo para o coeficiente de rugosidade de Manning. Para isso, foram adotados os valores médios dispostos na Tabela 4.6 conforme apresentado em USACE (2021). Tomando os valores fixos de coeficiente de rugosidade de Manning, foram realizadas 2000 simulações com variação de inclinação lateral esquerda, inclinação lateral direita, altura, largura e tempo de formação da brecha de ruptura. A variação desses parâmetros se deu conforme ajuste das distribuições Gamma e Assimétrica de Laplace conforme apresentado em Silva (2021). A Tabela 4.7 apresenta os parâmetros das distribuições probabilísticas utilizadas.

Tabela 4.7 – Parâmetros das distribuições probabilísticas utilizadas para amostragem de parâmetros de brecha.

Parâmetro	Sigla	Distribuição Probabilística	Parâmetros
Inclinação Lateral	Z_{ESQ}, Z_{DIR}	Gama	$\eta=0.4974 \theta=0.2281$
Largura de Fundo da Brecha	L_B/L_{CR}	Gama	$\eta=0.2515 \theta=1.6397$
Tempo de Formação da Brecha	T_F	Gama	$\eta=1.5932 \theta=1.5007$
Altura da Brecha	H_B/H_M	Assimétrica de Laplace	$m=1.0 \lambda=0.063 \kappa=0.6933$

Ressalta-se que os parâmetros de largura de fundo da brecha e altura da brecha foram calculados por meio das relações entre largura da brecha e largura da crista da barragem (L_B/L_{CR}) e altura da brecha e altura do maciço da barragem (H_B/H_M) respectivamente. Para aplicação dos parâmetros da distribuição Gama ajustada à largura de fundo da brecha conforme disposto em Silva (2021), considerou-se o ajuste elaborado para Barragens Estreitas susceptíveis à ruptura por degelo tendo em vista as características dispostas em Zenz & Goldgruber (2013).

A partir dos parâmetros apresentados na Tabela 4.7, de forma a respeitar características físicas do fenômeno, o sorteio aleatório dos parâmetros de brecha considerou o atendimento aos seguintes critérios:

- Altura da brecha (H_B) não excedendo o limite inferior definido pelo fundo rochoso (El. 206,03);
- Largura de fundo da brecha (L_B) não excedendo o limite superior definido pela largura da crista do maciço (360 m);
- Inclinações laterais da brecha (Z_{esq}, Z_{dir}) que não gerem uma largura de topo da brecha superior a crista do maciço (360 m);

Salienta-se que não foram estabelecidos demais critérios tais como valores mínimos para a largura ou altura da brecha em virtude da dificuldade de se estabelecer premissas fisicamente embasadas para isso. Todavia, a avaliação de demais critérios de sorteio pode ser feita em estudos posteriores e complementar a ferramenta desenvolvida no presente trabalho.

4.3.3 Modelagem hidrodinâmica

Para a configuração do modelo hidrodinâmico, utilizou-se o módulo bidimensional da ferramenta HEC-RAS v. 5.0.7 e uma malha computacional completa, ou seja, sem fazer uso de modelos truncados conforme discutido no item 3.2.3 O pré-processamento do modelo foi realizado por meio da ferramenta RASMapper na qual definiu-se a área de armazenamento do reservatório (*storage area*) em análise, a estrutura hidráulica do barramento (*inline structure*), malha computacional (*perimeter*) do vale de jusante, regiões de refino (*refinement regions*) localizadas na área urbana e linhas de condição de contorno (*boundary condition lines*) nos limites de jusante. A Figura 4.21 apresenta os elementos adicionados para configuração do modelo hidrodinâmico.

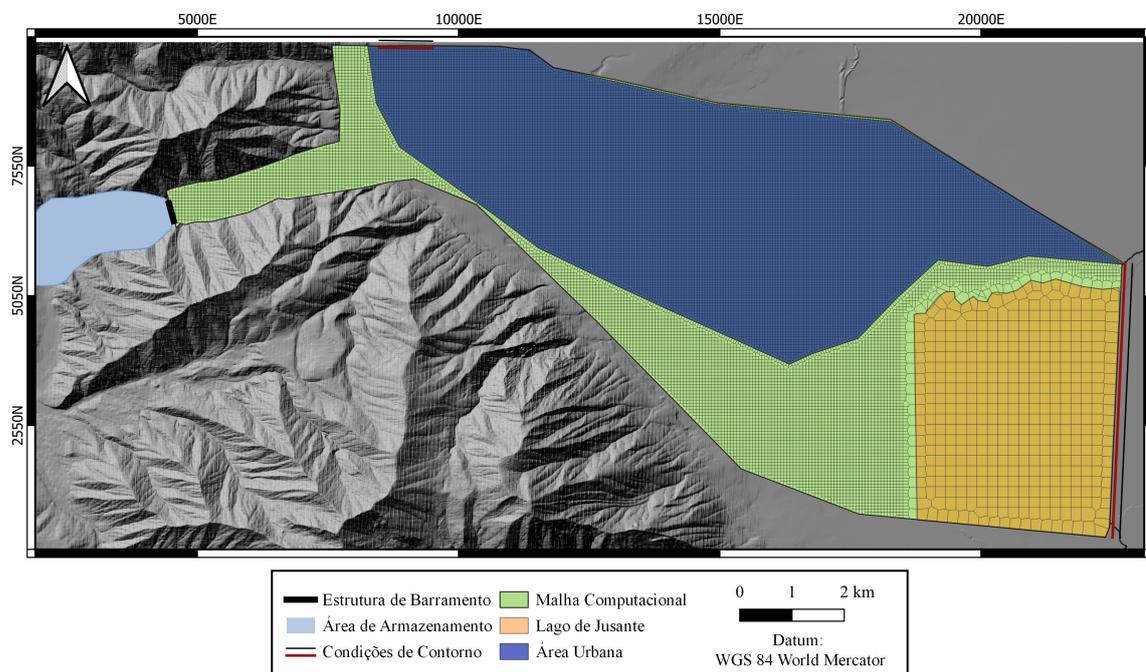


Figura 4.21 - Modelo hidrodinâmico configurado para aplicação de estudo de caso.

A Tabela 4.8 apresenta uma síntese dos parâmetros utilizados na configuração do modelo hidrodinâmico. A condição de contorno de montante foi estabelecida como o hidrograma de ruptura gerado com o rompimento do maciço da barragem. Já para a condição de contorno de jusante, considerou-se a ocorrência da profundidade normal do escoamento no lago adjacente a área urbana impactada. Essa premissa também foi adotada em Silva (2021) e considera a ausência de dados de batimetria e de níveis d'água do lago, além da alocação da condição de contorno em uma região suficientemente distante da área urbana na qual o escoamento se encontra

contido majoritariamente nos limites do lago de modo a reduzir a influência da condição de contorno no escoamento calculado na área urbana de maior interesse.

Como apresentado na Figura 4.21, a malha computacional foi configurada com resolução de 60 m x 60 m (área em verde) e região de refino de 50 m x 50 m na porção mais urbanizada da área de estudo (área em azul escuro). Na região do lago, em que não se dispõe de dados batimétricos, utilizou-se células com resolução de 200 m x 200 m (área em laranja) com o objetivo de reduzir a demanda computacional das simulações realizadas. Ressalta-se que a escolha das dimensões das células computacionais na área de interesse foi realizada partindo da resolução espacial do Modelo Digital de Terreno disponível (9,5 m) para valores superiores de modo que o tempo de processamento gerado por simulação fosse inferior a 30 minutos de modo a viabilizar a aplicação do Método de Monte Carlo conforme metodologia proposta. A escolha realizada se deu pois o aumento das dimensões das células de 40 para 50 metros gerou uma ampla economia de tempo computacional de modo a se observar tempos de processamento inferiores a 10 minutos.

Ressalta-se que a avaliação detalhada do impacto das variações dos dados topográficos ou mesmo das configurações de malhas computacionais não é objetivo da presente pesquisa, tendo sido avaliados com o único objetivo de permitir a aplicação da ferramenta proposta para análise do impacto das incertezas nos parâmetros de brecha de ruptura e coeficiente de rugosidade de Manning nos resultados da modelagem hidrodinâmica do vale de jusante em questão. A Tabela 4.8 apresenta demais parâmetros do modelo hidrodinâmico configurado.

Tabela 4.8 – Síntese dos parâmetros do modelo hidrodinâmico configurado.

Parâmetro	Valor
Número de células	24219
Área do modelo (km ²)	84,36
Resolução de malha computacional	60 m (malha geral), 50 m (área urbana) e 200 m (lago)
Equacionamento	Equação de Águas Rasas (<i>Shallow Water Equations</i>)
Condição de contorno - Montante	Hidrograma de Ruptura
Condição de contorno - Jusante	Profundidade normal (Sn= 0,01 m/m)
Tempo de simulação (hrs)	5,0
Estimativa dos hidrogramas defluentes	Método de Puls modificado
Método de progressão da brecha	Senoidal
Coefficiente de descarga da brecha	1,71
Número máximo de iterações computacionais	40
Passo de cálculo	Ajuste automático baseado no número de Courant com limites entre 0,5 e 1,0
Intervalo computacional (s)	1,0
Intervalo computacional inferior (s)	1,0
Intervalo computacional superior (s)	64,0

Seguindo as diretrizes apresentadas em Silva (2021), foram considerados método de progressão da brecha senoidal, nível de água inicial igual à cota de crista da barragem, ponto central da formação da brecha coincidente ao ponto central da seção transversal da barragem e coeficiente de descarga da brecha de ruptura de 1,705, considerando valores típicos de soleiras vertentes espessas (USACE, 2016).

Para a execução das simulações hidrodinâmicas, utilizou-se uma máquina com processador AMD Ryzen 5 5600G, 6-Core, velocidade processamento de 3,9 GHz (4,4GHz Turbo), memória RAM 8 GB DDR4 e SSD Sata 6 GB/s.

4.3.4 Análise dos resultados

Após a execução do MMC e coleta dos resultados para as variações do coeficiente de rugosidade e dos parâmetros de brecha, a análise de resultados foi realizada em seis etapas:

- i. Avaliação de variáveis aleatoriamente geradas

Na primeira etapa de análise dos resultados, as variáveis aleatoriamente geradas são avaliadas quanto ao ajuste as respectivas distribuições probabilísticas consideradas por meio de análise gráfica.

ii. Análise geral de parâmetros hidrodinâmicos

A segunda etapa propõe a análise dos parâmetros mais gerais da modelagem. Os resultados de áreas inundadas para a variação do coeficiente de Manning e dos parâmetros de brecha de ruptura são analisadas de forma comparativa por meio de diagramas de caixa e estatística descritiva. Especificamente para a variação dos parâmetros de brecha, os hidrogramas de ruptura são avaliados por meio do cálculo de quantis de referência das variáveis de vazão e tempo de pico.

iii. Análise regional de parâmetros hidrodinâmicos

Tomando os resultados de profundidade de escoamento e tempo de chegada da onda de ruptura obtidos para cada uma das iterações conforme descrito nos itens 4.1.1 e 4.1.2, a análise regional foi realizada considerando dez seções (ST – 01 a ST -10) definidas a partir do maciço da barragem com espaçamento de 1 km e traçado radial. A

Figura 4.22 apresenta as seções definidas na área de estudo. Para cada uma das seções foram calculadas as profundidades de escoamento e tempo de chegada da onda de ruptura para probabilidades de excedências de referência.

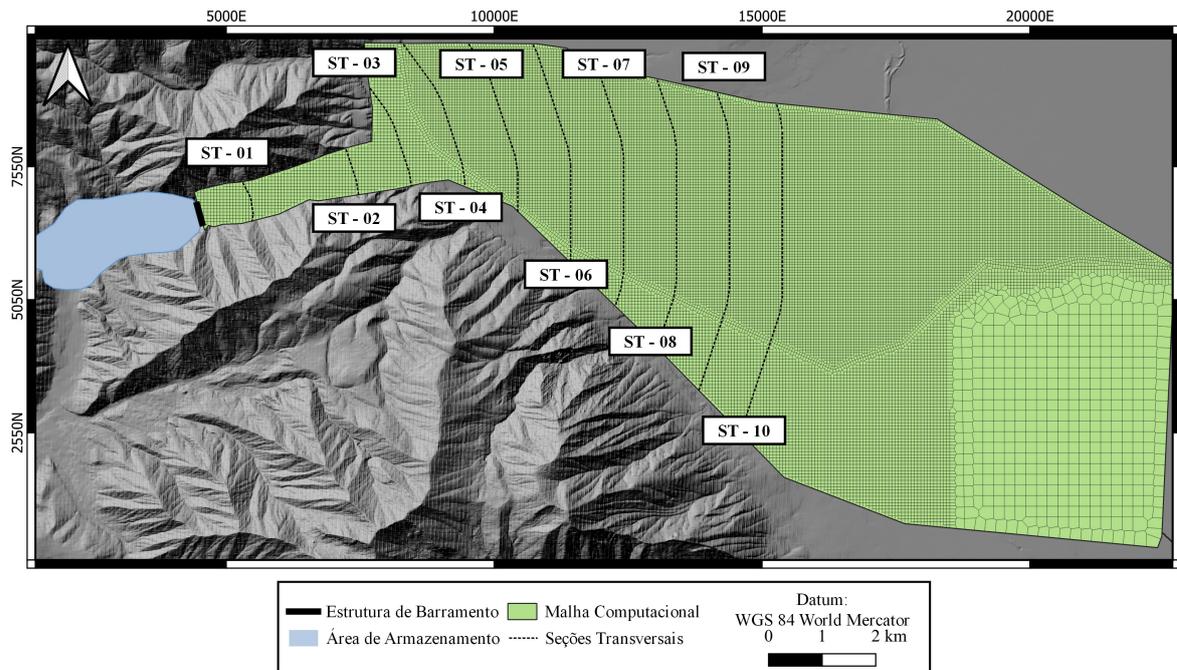


Figura 4.22 - Seções definidas na área de estudo.

Ressalta-se que a definição das seções ao longo dos dez quilômetros iniciais em relação ao maciço da barragem foi realizada com base na consideração da Zona de Autossalvamento (ZAS) da área afetada pelo rompimento hipotético da barragem em análise considerando que a estrutura é objeto de uma classificação nacional.

iv. Análise local de parâmetros hidrodinâmicos

Ainda com base nos resultados de profundidade de escoamento e tempo de chegada da onda de ruptura, foi realizada uma análise específica da variação desses parâmetros em três pontos de referência específicos (Figura 4.23) sendo um estabelecimento comercial (Código C1), um centro empresarial (Código O1) e uma área residencial (Código R1) com base na caracterização de zonas urbanas da área de estudo apresentada na Tabela 4.5. Em cada um dos pontos de referência, determinou-se a estatística descritiva dos valores obtidos e gráficos de dispersão.

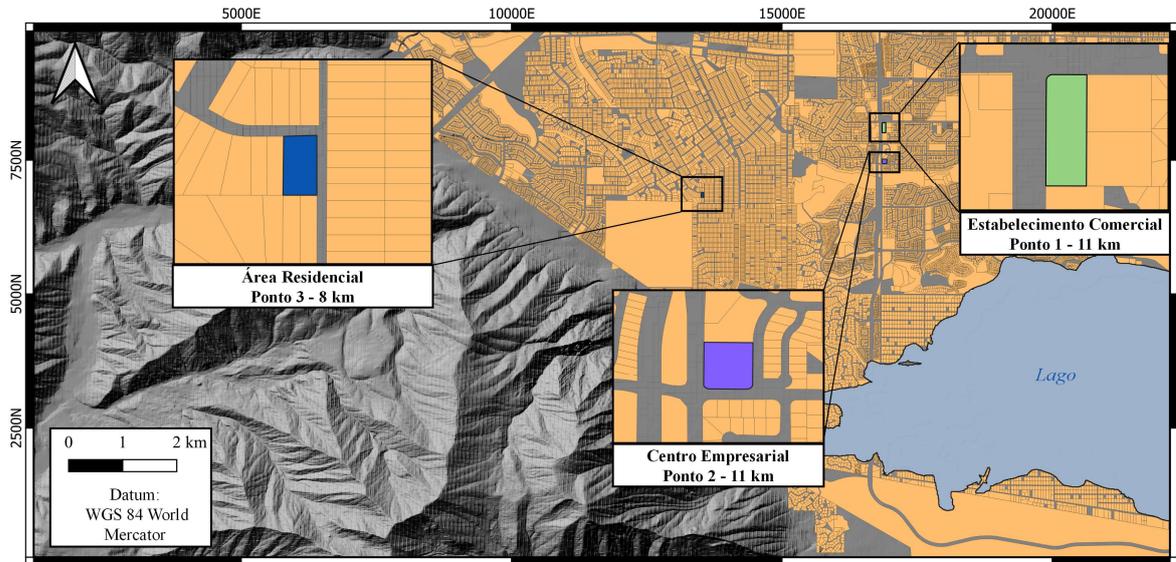


Figura 4.23 – Pontos de referências adotados em análise local.

A análise da variação das profundidades e tempos de chegada da onda de ruptura teve como principal objetivo avaliar o quão sensível o modelo pode ser à variação dos parâmetros em análise bem como avaliar o impacto que essa sensibilidade pode ter em outros estudos tais como análises de danos (ALMEIDA & ELEUTÉRIO, 2019) e de perdas de vidas (SILVA & ELEUTÉRIO, 2019).

v. Mapas de inundação probabilísticos

Conforme descrito nos itens 4.1.1 e 4.1.2, as matrizes binárias resultantes foram manipuladas para elaboração de mapas de inundação probabilísticos com base na Eq. 14, que apresenta o cálculo das probabilidades de inundação em função da série de simulações realizadas. Os mapas gerados permitem a análise espacial das probabilidades de inundação em cada uma das regiões da área de estudo considerando alternadamente as variações do coeficiente de rugosidade de Manning e dos parâmetros de brecha de ruptura.

vi. Avaliação de demanda computacional

Por fim, avaliou-se a demanda computacional requerida para a execução das simulações tanto nos cenários com variação do coeficiente de rugosidade de Manning quanto nos cenários com variação dos parâmetros de brecha de ruptura.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro resultado obtido no trabalho foi o desenvolvimento de ferramenta computacional que possibilita o mapeamento probabilístico de inundações decorrentes do rompimento de barragens considerando as incertezas associadas aos parâmetros de brecha de ruptura e ao coeficiente de rugosidade de Manning. Os algoritmos desenvolvidos considerando as incertezas associadas ao coeficiente de rugosidade de Manning e aos parâmetros de brecha de ruptura estão apresentados no Apêndice A e no Apêndice B respectivamente. No capítulo 6 desse trabalho, são apresentadas possibilidades de melhorias na ferramenta proposta seja em função da otimização do método de variação utilizado (MCC) ou em função da incorporação de incertezas associados a outros parâmetros utilizados na modelagem hidrodinâmica de rompimento de barragens.

O segundo resultado do presente trabalho envolve a análise de sensibilidade da modelagem hidrodinâmica considerando o coeficiente de rugosidade de Manning e os parâmetros de brecha feita com a aplicação da ferramenta computacional desenvolvida no estudo de caso proposto pelo ICOLD e apresentado por Zenz & Goldgruber (2013). Conforme disposto no item 4.3.4, os resultados dessa análise são apresentados a seguir em seis etapas envolvendo a avaliação das variáveis aleatoriamente amostradas, a análises geral, regional e local dos parâmetros hidrodinâmicos, o desenvolvimento dos mapas de inundação probabilísticos e finalizando com a avaliação da demanda computacional requerida.

A seguir, os resultados obtidos com a variação do coeficiente de rugosidade de Manning e com a variação dos parâmetros de brecha de ruptura são apresentados paralelamente em cada uma dessas etapas de análise.

5.1 Análise geral de parâmetros hidrodinâmicos

A segunda etapa de análise de sensibilidade considerou uma avaliação geral do comportamento dos parâmetros hidrodinâmicos em função da variação dos parâmetros com incertezas avaliadas. Para o coeficiente de rugosidade de Manning, avaliou-se a variação das áreas máximas inundadas por meio de estatística descritiva e traçado de diagramas de caixa. Para os parâmetros de brecha de

ruptura, além das áreas inundadas, analisou-se a variação das características dos hidrogramas de ruptura simulados.

A Figura 5.1 apresenta a estatística descritiva e o diagrama de caixas das áreas inundadas nas simulações que consideraram unicamente a variação do coeficiente de rugosidade de Manning. Os resultados apresentam valores em torno da média de 6480,8 hm² com coeficiente de variação de 2,9 %.

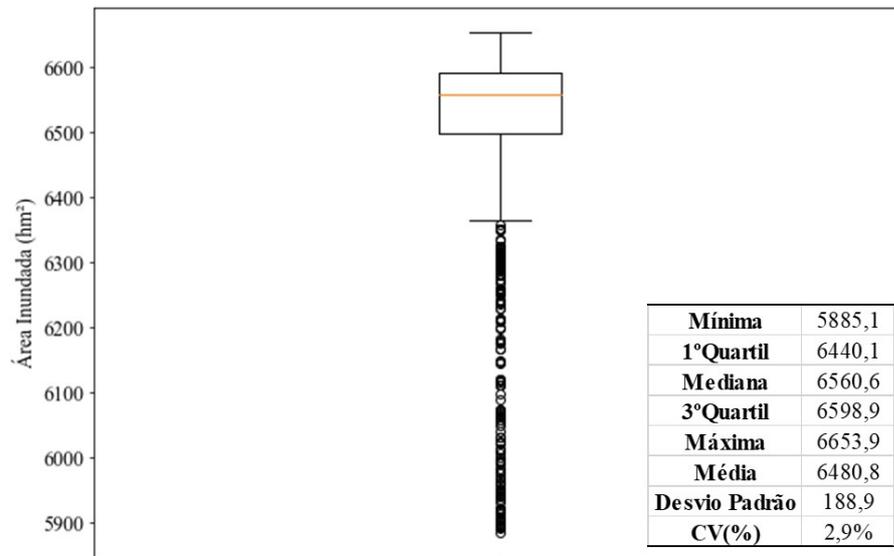


Figura 5.1 – Diagrama de caixa de áreas inundadas: Coef. rugosidade de Manning.

De forma análoga, a Figura 5.2 apresenta a estatística descritiva e o diagrama de caixa das áreas inundadas nas simulações que consideraram unicamente a variação dos parâmetros de brecha de ruptura. Os resultados apresentam valores em torno da média de 5795,2 hm² com coeficiente de variação de 10,5 %.

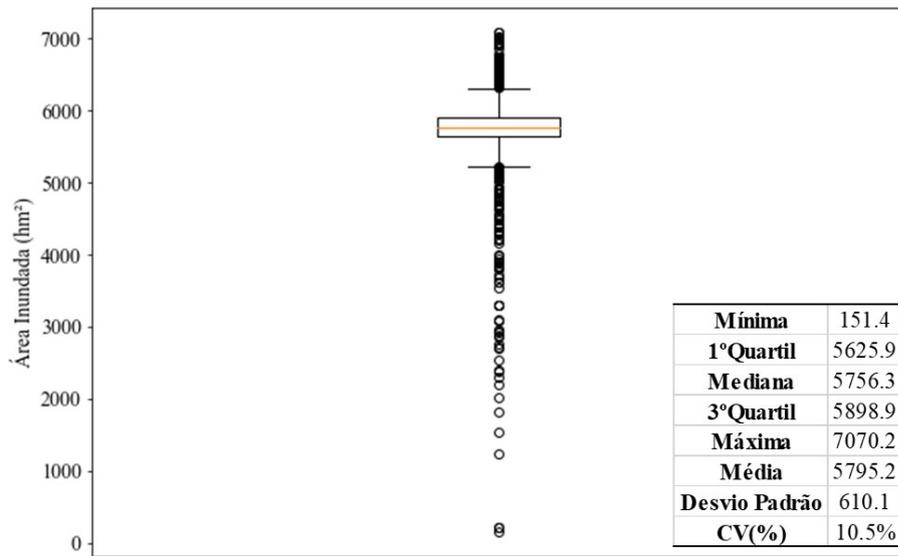


Figura 5.2 - Diagrama de caixa de áreas inundadas: Parâmetros de brecha de ruptura.

De modo complementar, nas simulações com variação dos parâmetros de brecha, analisou-se os parâmetros característicos de vazão e tempo de pico dos hidrogramas de ruptura. A Tabela 5.1 apresenta os valores referentes às probabilidades de excedência de 90, 50, 25, 10 e 1%. Como pode ser visto, as vazões de pico para as probabilidades de excedência analisadas apresentam variação de cerca de 11,8 vezes ao passo que o tempo de pico indica variação de 11,9 vezes. Ressalta-se que os percentis dos parâmetros foram analisados separadamente, ou seja, os valores de vazão e tempo de pico apresentados em uma mesma linha da Tabela 5.1 não ocorreram em um mesmo evento simulado.

Tabela 5.1 – Quantis de vazão e tempo de pico dos hidrogramas de ruptura simulados considerando os cenários em que cada parâmetro foi mais crítico.

Pexc	Qp (m³/s)	Tp (min)
90%	7948,0	95
50%	21022,4	43
25%	35563,9	26
10%	53635,6	16
1%	93813,8	8

5.2 Análise regional de parâmetros hidrodinâmicos

A análise regional dos parâmetros hidrodinâmicos foi realizada com base nas dez seções apresentadas na Figura 4.22 alocadas com espaçamento de um quilômetro uma das outras a partir do maciço da barragem em estudo. A partir das seções

definidas, foram traçados os perfis do nível d'água referente às probabilidades de excedência de 25%, 50%, 75% e 100%.

A Figura 5.3 apresenta os perfis de nível d'água associados às probabilidades de excedência adotadas para as dez seções.

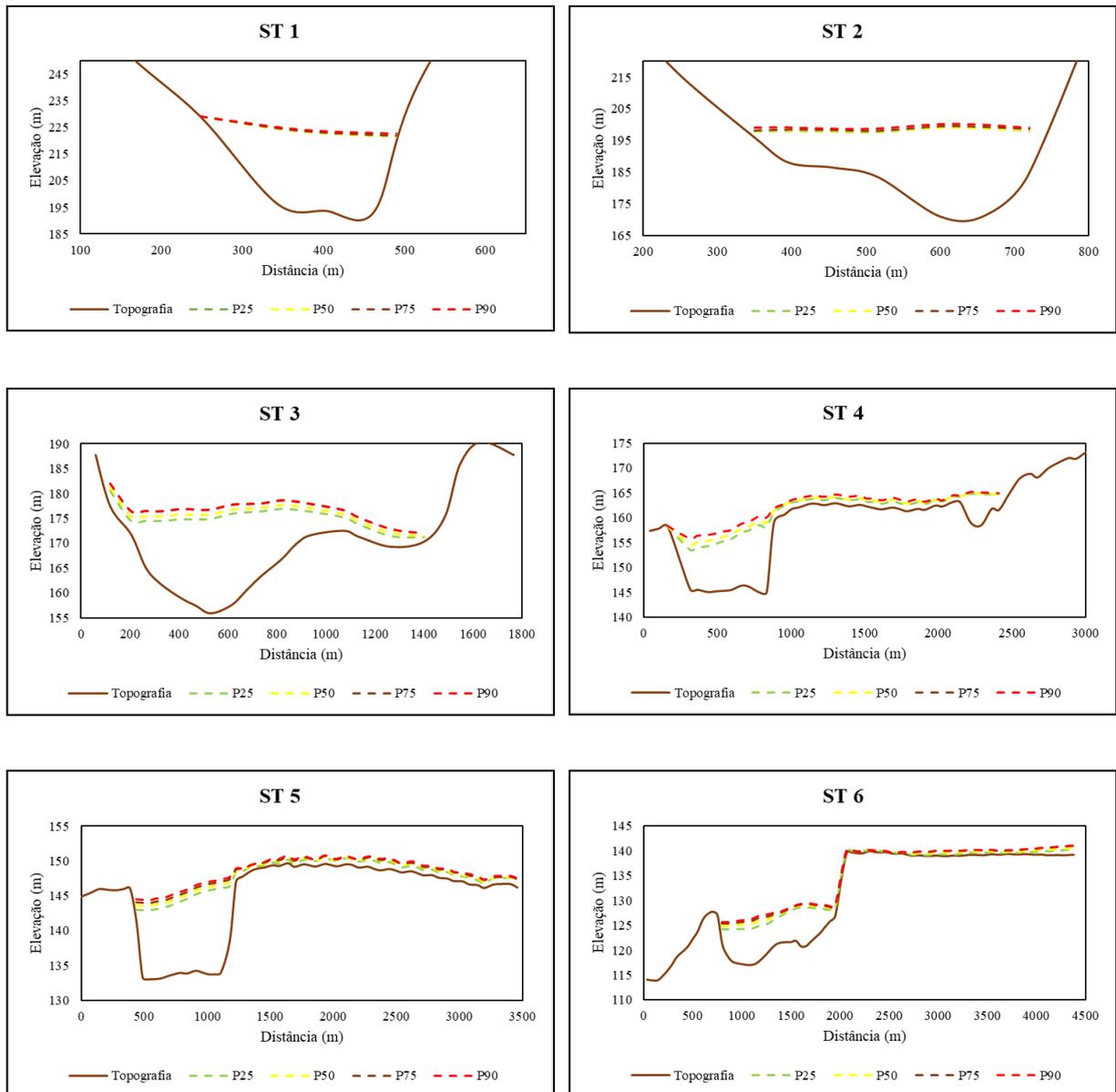


Figura 5.3 – Perfis com quantis de níveis d'água simulados: variação de coeficiente de rugosidade de Manning.

(continua)

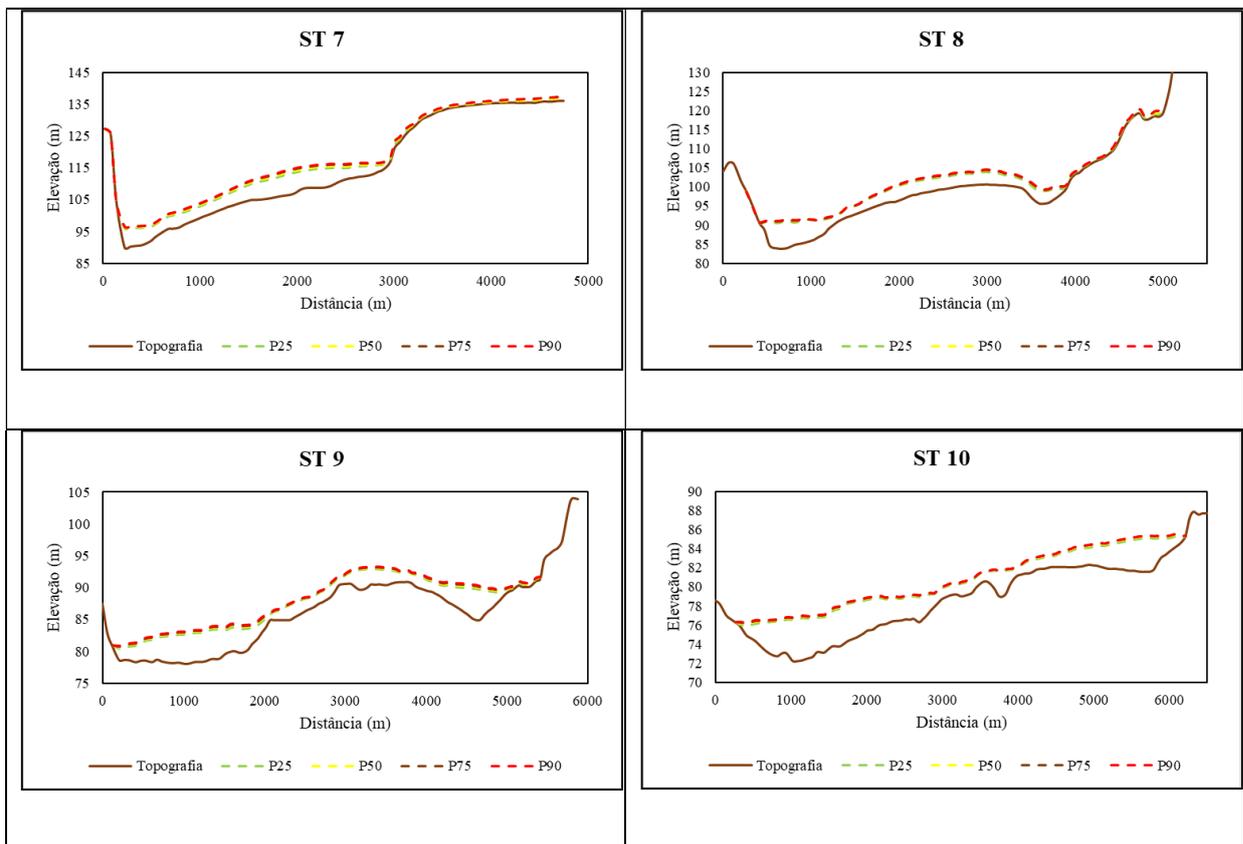


Figura 5.3 – Perfis com quantis de níveis d'água simulados: variação de coeficiente de rugosidade de Manning.

(conclusão)

Analisando o coeficiente de variação das profundidades de escoamento simuladas, identificou-se que as maiores variações ocorreram nas seções ST 3, ST 4 e ST 5 localizadas na transição do vale encaixado para a região de vale aberto, atingindo valores de 33, 23 e 22% respectivamente.

De forma análoga, a Figura 5.4 apresenta os perfis de nível d'água associados às probabilidades de excedência adotadas para as dez seções considerando as variações nos parâmetros de brecha de ruptura.

Especificamente nas seções ST 4, ST 5 e ST 7, a variação das profundidades de escoamento em função das probabilidades de excedência consideradas gerou ou não o transbordamento da calha principal do talvegue, ampliando significativamente a área inundada na região.

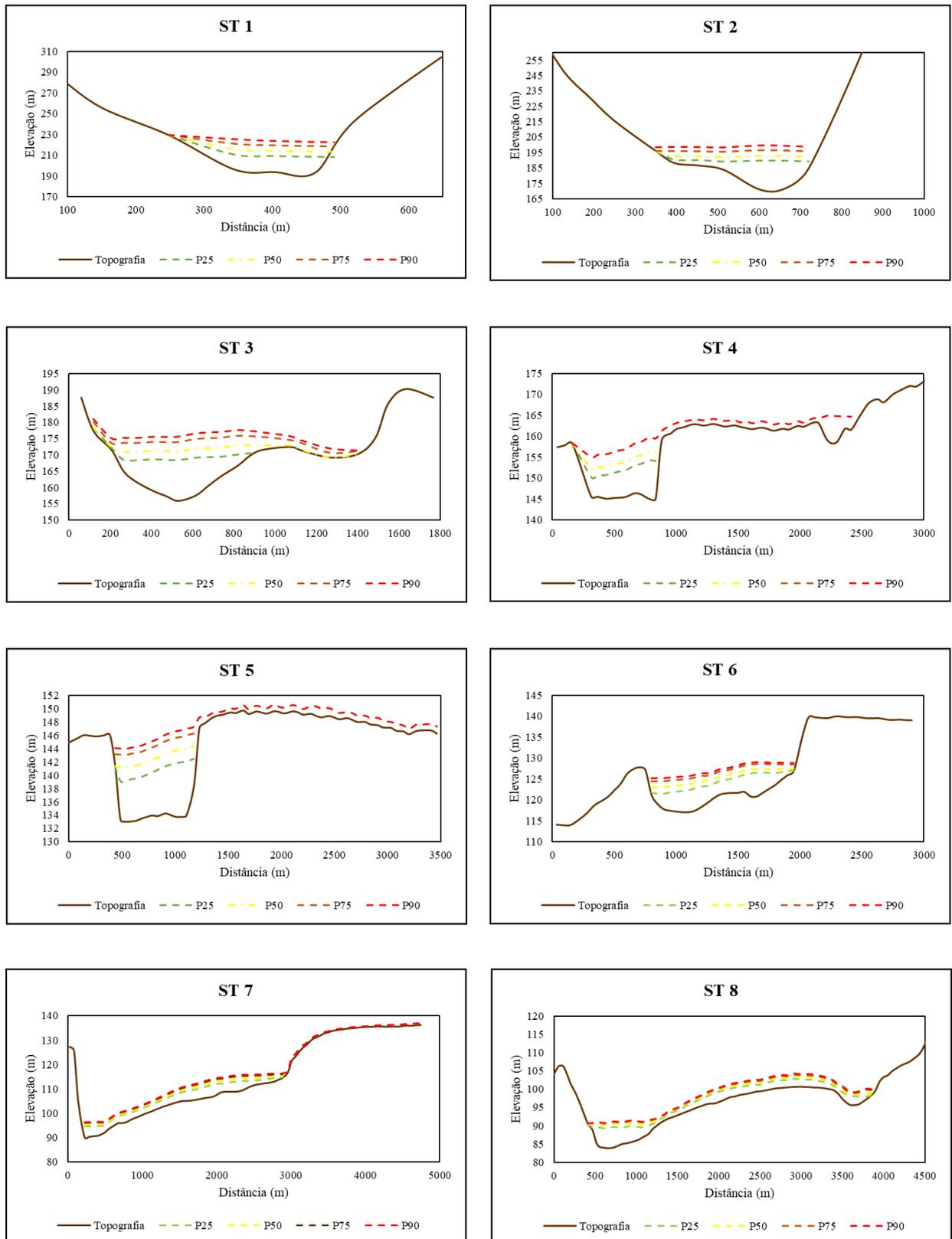


Figura 5.4 – Perfis com quantis de níveis d'água simulados: variação de parâmetros de brecha de ruptura.

(continua)

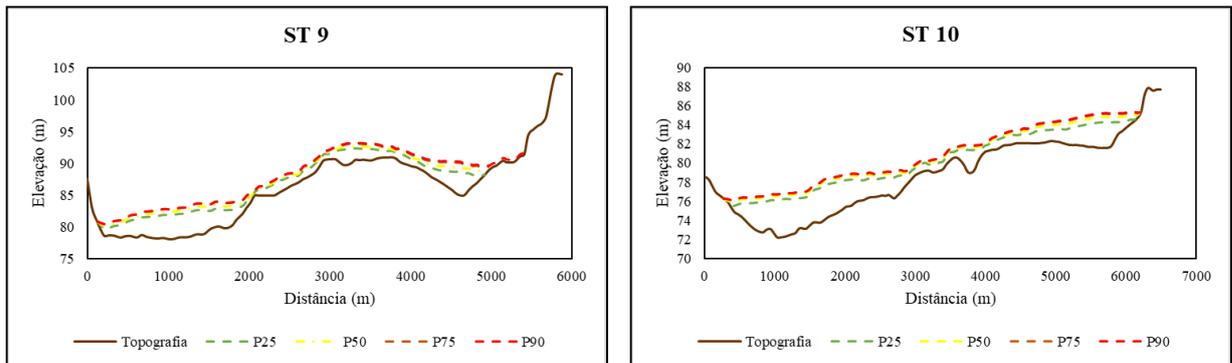


Figura 5.4 – Perfis com quantis de níveis d’água simulados: variação de parâmetros de brecha de ruptura.

(conclusão)

Analisando o coeficiente de variação das profundidades de escoamento simuladas, identificou-se que novamente as maiores variações ocorreram nas seções ST 3 e ST 4, localizadas na transição do vale encaixado para a região de vale aberto, todavia, atingiram valores amplamente mais elevados do que os apresentados para a variação do coeficiente de rugosidade de Manning atingindo coeficientes de variação de 150% e 177% respectivamente.

Os resultados obtidos apontam indicadores semelhantes aos obtidos por Altinakar *et al.* (2013) em aplicação realizada na mesma área de estudo. Os autores avaliaram os resultados obtidos em 120 cenários considerando 40 pares aleatórios de largura e tempo de formação de brecha, além de três diferentes combinações de coeficientes de rugosidade de Manning e obtiveram resultados de maior variação de profundidade de escoamento na região na região de vale estreito localizada a jusante do barramento. Análises semelhantes também foram realizadas por Davison *et al.* (2013) e Silva (2021) em aplicações realizadas na mesma área de estudo.

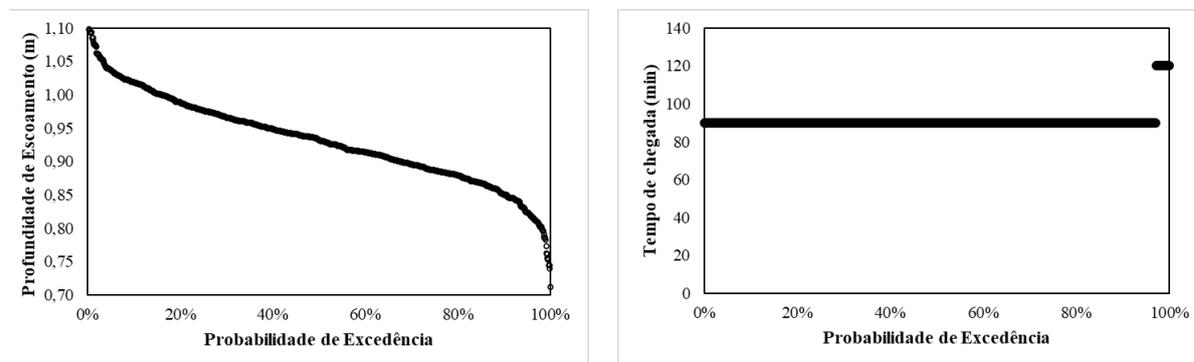
Davison *et al.* (2013) aplicou o MMC considerando as incertezas associadas a erodibilidade do material, ao modo de falha e aos processos erosivos de formação da brecha de ruptura e identificou baixa variabilidade das áreas inundadas simuladas para as probabilidades de excedência de 25, 50 e 75% associadas ao hidrograma de ruptura da barragem. Já Silva (2021) analisou a sensibilidade do modelo as variações nos cinco parâmetros de brecha variados no presente trabalho. Todavia, o autor realizou a análise por meio da caracterização de hidrogramas de ruptura de referência associados a diferentes probabilidades de excedência e obteve

resultados que indicam variações amplamente mais expressivas nas seções iniciais da área de estudo abrangendo a área localizada a até 5 km do maciço do barramento que são correspondentes as seções de ST 1 a ST 5 do presente trabalho.

5.3 Análise local de parâmetros hidrodinâmicos

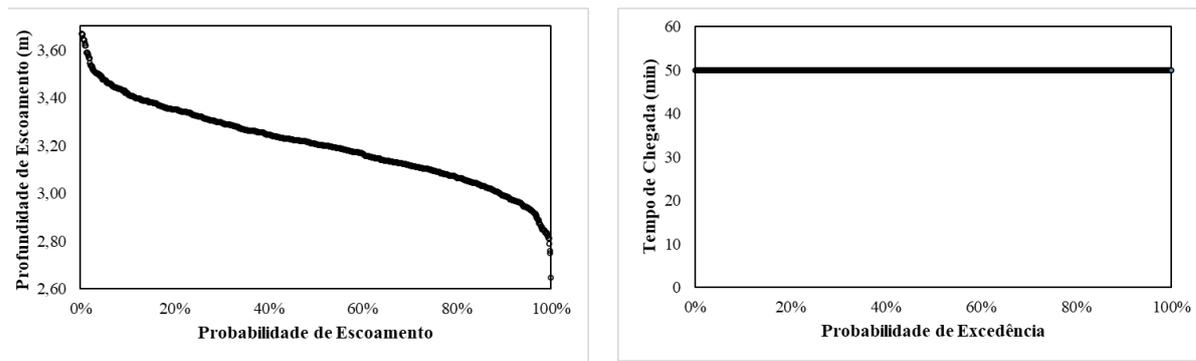
Para a análise local dos parâmetros hidrodinâmicos, foram analisadas as variações dos parâmetros de profundidade de escoamento e tempo de chegada da onda de ruptura especificamente nos três pontos de referência específicos apresentados na Figura 4.23. A partir desses três pontos de referência, a análise foi realizada por meio de estatística descritiva e dos gráficos de profundidades de escoamento e tempo de chegada da onda em função das respectivas probabilidades de excedência.

A Figura 5.5, a Figura 5.6 e a Figura 5.7 apresentam os gráficos de dispersão dos parâmetros hidrodinâmicos em função das probabilidades de excedência e a estatística descritiva dos resultados obtidos.



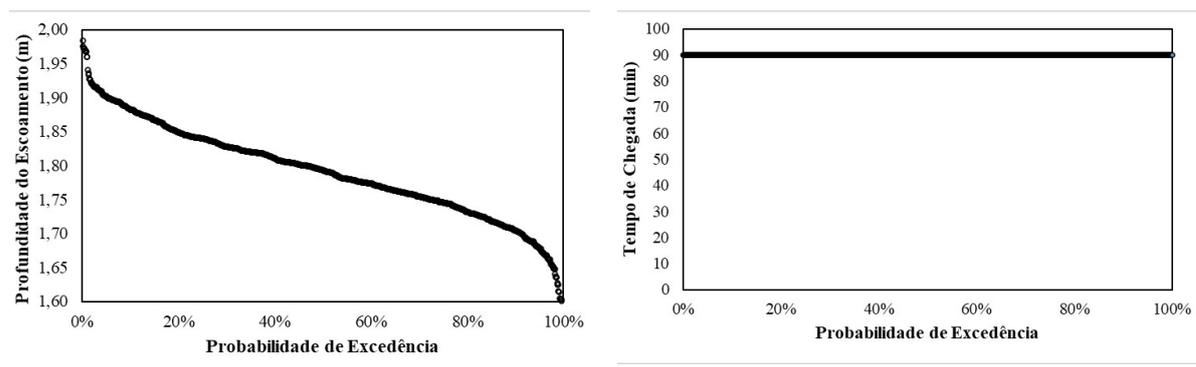
Estadística	Prof. (m)	Tempo de chegada (min)
Mínima	0,71	90,0
1ºQuartil	0,89	90,0
Mediana	0,93	90,0
3ºQuartil	0,98	90,0
Máxima	1,11	120,0
Média	0,93	90,9
Desvio Padrão	0,07	5,0
CV	7%	6%

Figura 5.5 – Resultados de análise local: Manning (Estabelecimento Comercial).



Estatística	Prof. (m)	Tempo de chegada (min)
Mínima	2,65	50,0
1ºQuartil	3,09	50,0
Mediana	3,21	50,0
3ºQuartil	3,32	50,0
Máxima	3,72	50,0
Média	3,21	50,0
Desvio Padrão	0,17	0,0
CV	5%	0%

Figura 5.6 – Resultados de análise local: Manning (Centro Empresarial).



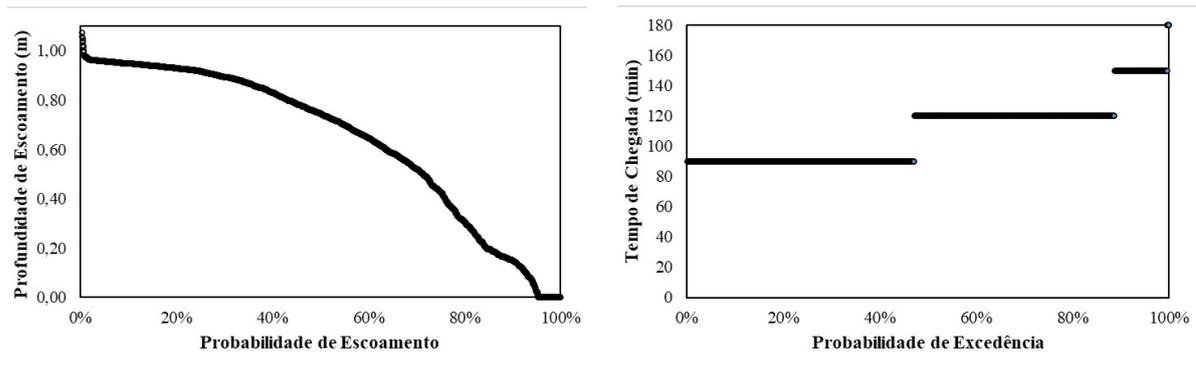
Estatística	Prof. (m)	Tempo de chegada (min)
Mínima	1,58	90,0
1ºQuartil	1,75	90,0
Mediana	1,79	90,0
3ºQuartil	1,84	90,0
Máxima	1,98	90,0
Média	1,79	90,0
Desvio Padrão	0,07	0,0
CV	4%	0%

Figura 5.7 – Resultados de análise local: Manning (Área Residencial).

Como pode ser visto, o impacto das variações do coeficiente de rugosidade de Manning nas profundidades de escoamento simuladas nos três pontos de referência

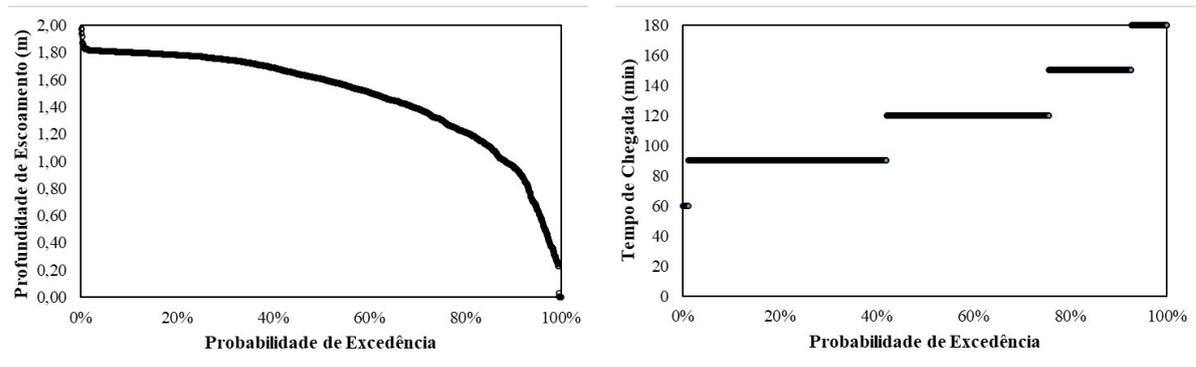
foi significativo apresentando amplitudes de variação de 0,40 m a 1,1 m. Por outro lado, os resultados de tempo de chegada da onda de cheia no centro empresarial e área residencial apresentaram variações nulas considerando a discretização de 10 minutos enquanto no estabelecimento comercial houve menor variação dos resultados. A amplitude de variação de 30 minutos indicada para os tempos de chegada do estabelecimento comercial aponta para uma limitação da metodologia proposta que possui intervalo de discretização mais espaçado para valores a partir de 60 minutos de modo que indica a possibilidade de refino do cômputo dos tempos de chegada da onda de ruptura na ferramenta proposta para melhor avaliar a variabilidade desse parâmetro em edificações mais afastadas do barramento.

De forma análoga para os parâmetros de brecha, a Figura 5.8, a Figura 5.9 e a Figura 5.10 apresentam os gráficos de dispersão dos parâmetros hidrodinâmicos em função das probabilidades de excedência e a estatística descritiva dos resultados obtidos.



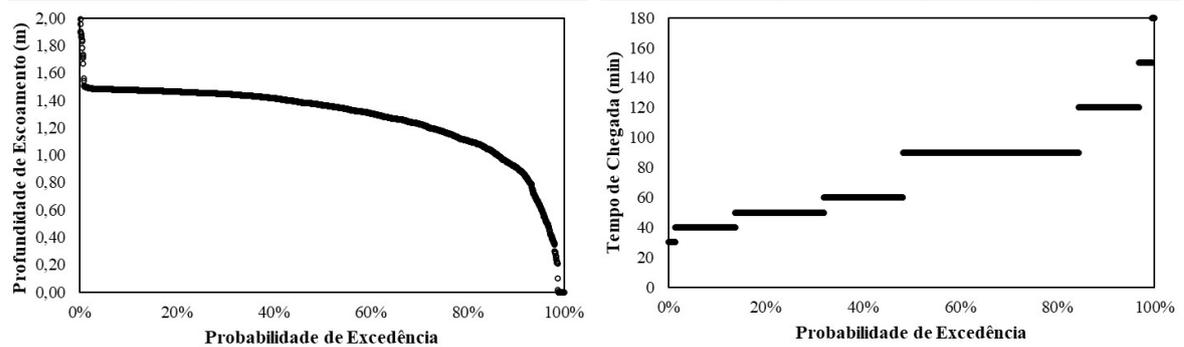
Estatística	Prof. (m)	Tempo de chegada (min)
Mínima	0,00	90
1º Quartil	0,43	90
Mediana	0,75	120
3º Quartil	0,92	120
Máxima	1,24	180
Média	0,64	109,4
Desvio Padrão	0,31	20,64
CV	48%	19%

Figura 5.8 – Resultados de análise local: Brecha (Estabelecimento Comercial).



Estatística	Prof. (m)	Tempo de chegada (min)
Mínima	0	60
1º Quartil	1,31	90
Mediana	1,61	120
3º Quartil	1,77	120
Máxima	2,05	180
Média	1,48	116,6
Desvio Padrão	0,37	28,55
CV	25%	24%

Figura 5.9 – Resultados de análise local: Brecha (Centro Empresarial).



Estatística	Prof. (m)	Tempo de chegada (min)
Mínima	0	30
1º Quartil	1,17	50
Mediana	1,37	90
3º Quartil	1,45	90
Máxima	2,05	180
Média	1,26	76,6
Desvio Padrão	0,29	29,43
CV	23%	38%

Figura 5.10 – Resultados de análise local: Brecha (Área Residencial).

Diferentemente dos resultados obtidos para a variação do coeficiente de rugosidade de Manning, o impacto das variações dos parâmetros de brecha foi amplamente significativo tanto nos resultados de profundidades de escoamento quanto nos tempos de chegada da onda de ruptura. Para o primeiro, destaca-se a amplitude de

variação de 1,2 m a 2,0 m ao passo que para o tempo de chegada da onda de ruptura observou-se amplitude de variação de 90 min a 150 min.

Esse aumento significativo na magnitude das variações dos resultados hidrodinâmicos se dá principalmente pelo fato de que, enquanto o MMC para variação do coeficiente de rugosidade de Manning foi executado com um hidrograma de ruptura padronizado definido por meio do equacionamento de Froehlich (2015), a aplicação do MMC com variação dos parâmetros de brecha apresentou uma ampla variabilidade dos hidrogramas de ruptura simulados conforme pôde ser observado nos valores de referência para a vazão e tempo de pico apresentados na Tabela 5.1. Análises complementares podem avaliar os impactos gerados pela variação do coeficiente de rugosidade de Manning considerando hidrogramas de ruptura advindos de diferentes formulações empíricas e com características mais ou menos conservadoras.

5.4 Mapas de Inundação Probabilísticos

Conforme disposto no item 0, os mapas de inundação probabilísticos foram gerados considerando a frequência relativa das células inundadas ao longo das aplicações do MMC para a variação do coeficiente de rugosidade de Manning e para a variação dos parâmetros de brecha de ruptura. A Figura 5.12 apresenta o mapa de inundação probabilístico elaborado para a variação do coeficiente de rugosidade de Manning. A ampla área de inundação com probabilidades elevadas de inundação (80 – 100 %) indica que a área urbana situada na margem esquerda do vale de jusante foi inundada na maior parte das simulações executadas e dá indícios de que o hidrograma de ruptura de referência para a aplicação do MMC com variação do coeficiente de rugosidade de Manning adotado por meio das formulações empíricas de Froehlich (2015) tende a gerar o transbordamento da calha fluvial do vale de jusante da área de estudo.

Áreas de inundação com probabilidades inferiores (0 – 50 %) são identificadas na margem direita da calha fluvial no trecho de quatro a sete quilômetros em relação ao barramento ao passo que áreas de inundação com probabilidades intermediárias (60 – 80 %) são identificadas na área urbana situada a margem esquerda do vale de jusante principalmente no trecho de seis a dez quilômetros em relação ao

barramento. A Tabela 5.2 e a Figura 5.11 apresentam as áreas de inundação referentes as diferentes probabilidades de excedência de modo a identificar as variações obtidas. Como pode ser visto, as áreas inundadas referentes as probabilidades de excedência de 10 e 95% variaram em 439 hm² representando 6,1% da área de inundação mais abrangente.

Tabela 5.2 – Áreas de inundação associadas a diferentes probabilidades de excedência: MMC Coeficiente de Rugosidade de Manning.

Probabilidade de Excedência (%)	Área Inundada (hm ²)
10	7212
20	7193
50	7164
90	6987
95	6773

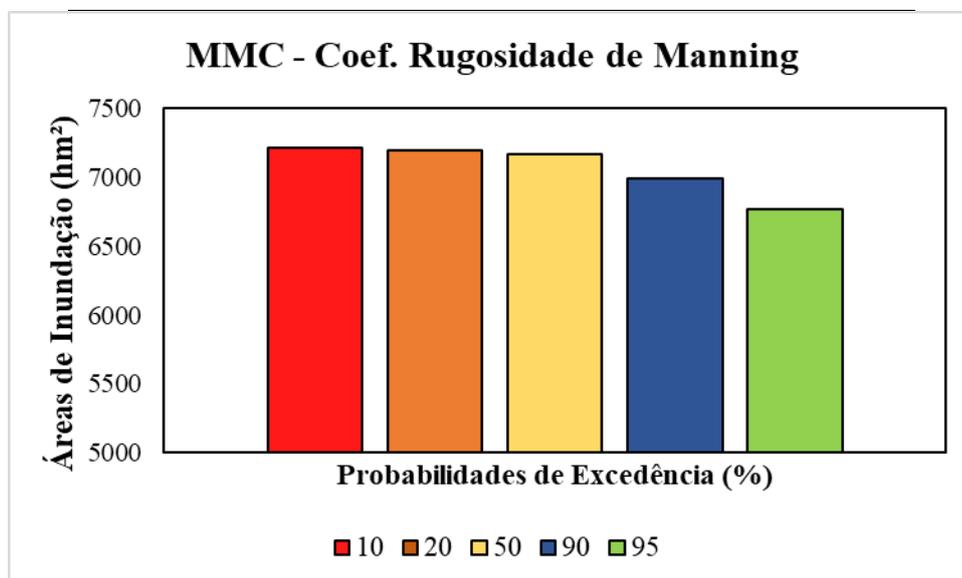


Figura 5.11 – Áreas de inundação para diferentes probabilidades de excedência: Manning.

Uma maior variabilidade de probabilidades de inundação é identificada no mapa de inundação referente à variação dos parâmetros de brecha apresentado na Figura 5.14. A envoltória de inundação associada a faixa de maiores probabilidades de inundação (80 – 100 %) passa a ser menos abrangente e não engloba significativamente a área urbana situada na margem esquerda do vale de jusante indicando que, a depender do hidrograma de ruptura simulado, ocorreu ou não o transbordamento do escoamento para essa região. Áreas de inundação com probabilidades baixas (10 – 30 %) são identificadas na margem esquerda da calha fluvial no trecho de três a nove quilômetros em relação ao barramento ao passo que

áreas de inundação com probabilidades ainda inferiores ($< 1\%$) são identificadas nos limites esquerdo e direito da área de estudo no trecho de dez a quinze quilômetros em relação ao barramento.

A Tabela 5.3 e a Figura 5.13 apresentam as áreas de inundação referentes as diferentes probabilidades de excedência de modo a identificar as variações obtidas. Como pode ser visto, as áreas inundadas referentes as probabilidades de excedência de 10 e 95% variaram em 1.469 hm² representando 20,8% da área de inundação mais abrangente.

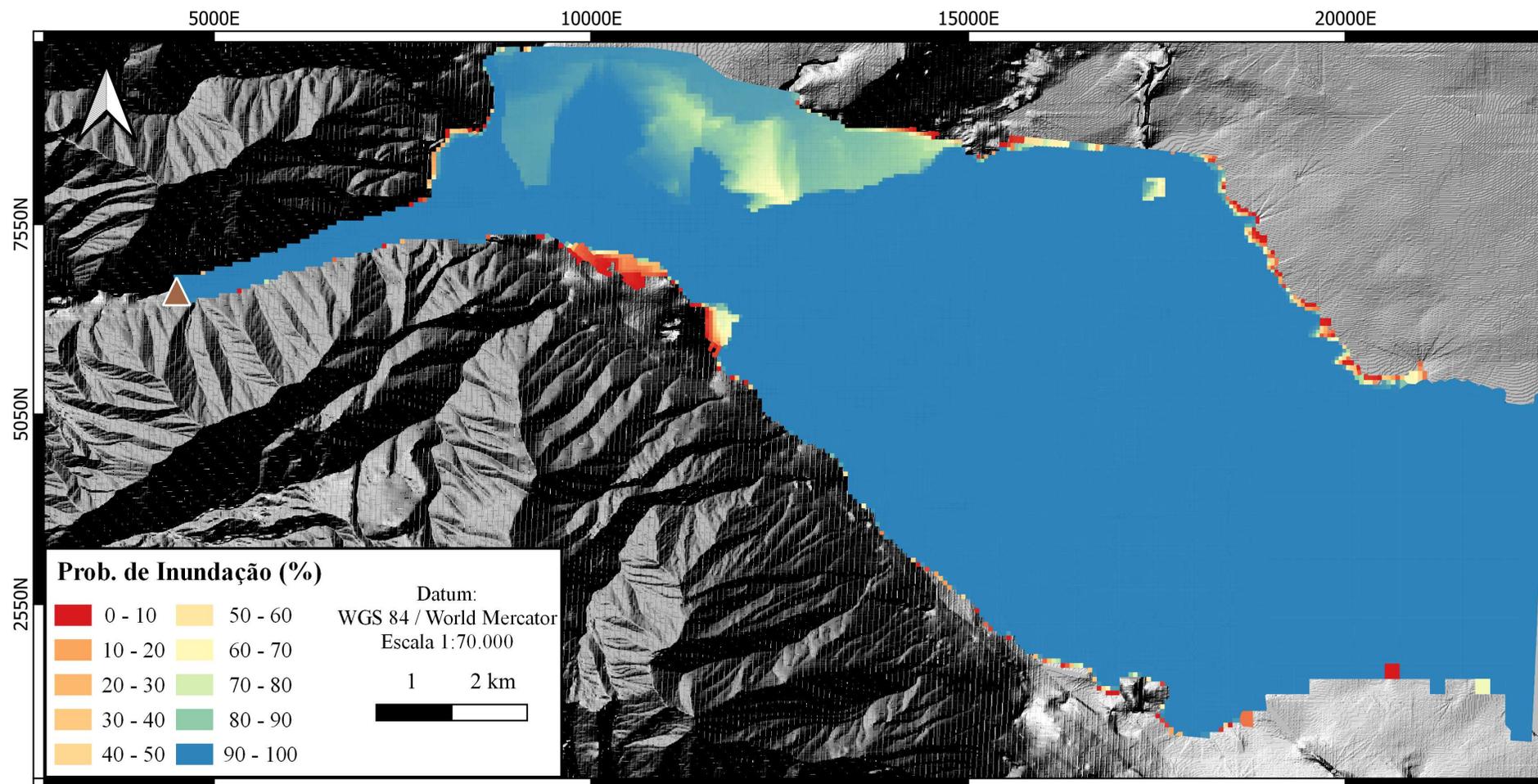


Figura 5.12 – Mapa de Inundação Probabilístico com incertezas no coeficiente de rugosidade de Manning.

**Tabela 5.3 – Áreas de inundação associadas a diferentes probabilidades de excedência: MMC
Parâmetros de Brecha.**

Probabilidade de Excedência (%)	Áreas inundada (hm ²)
10	7057
20	6887
50	6034
90	5749
95	5588

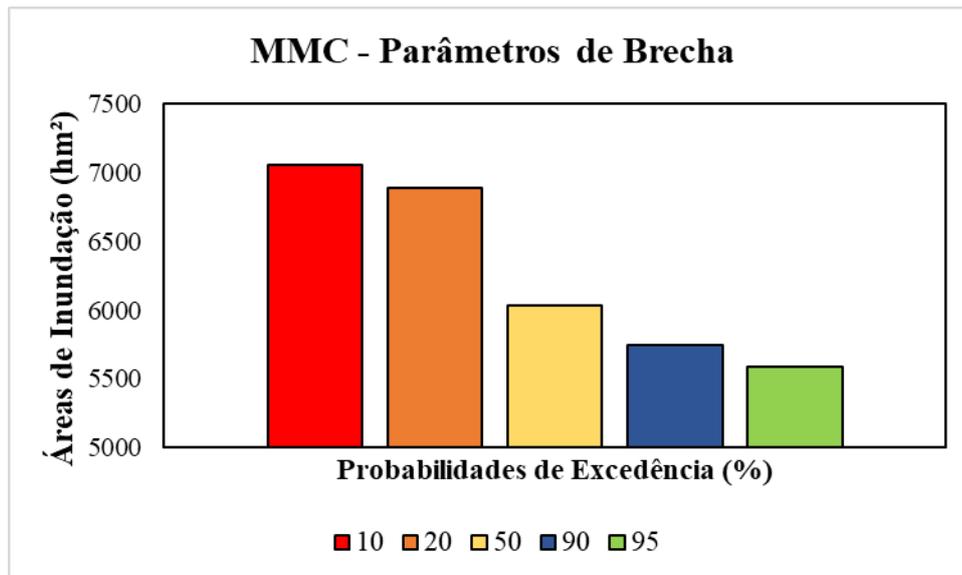


Figura 5.13 - Áreas de inundação para diferentes probabilidades de excedência: Brecha.

As envoltórias de inundação associadas as probabilidades de excedência de 10, 20, 50, 90 e 95% são apresentadas no Apêndice C do presente trabalho de forma comparativa para as variações do coeficiente de rugosidade de Manning e dos parâmetros de brecha.

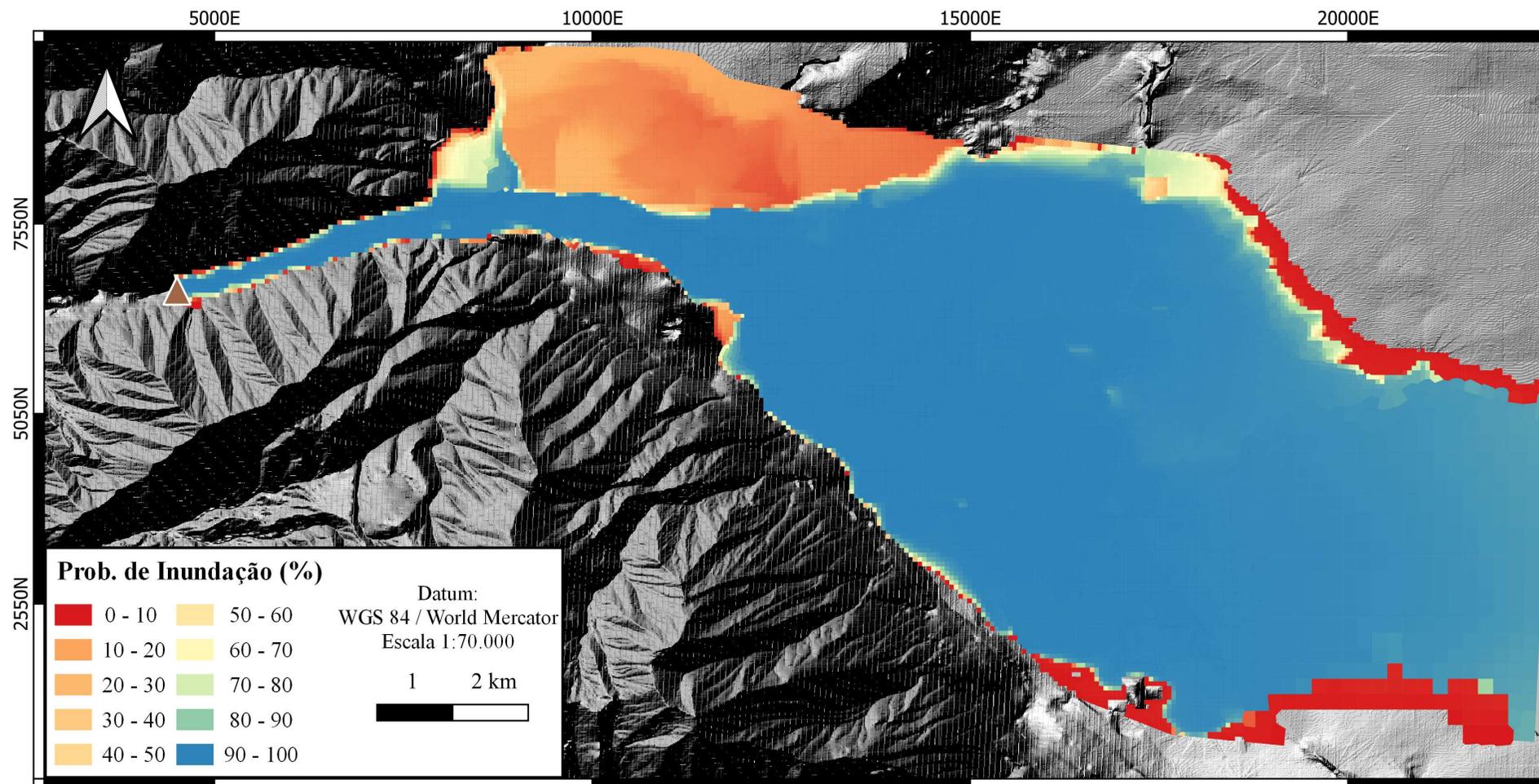


Figura 5.14 - Mapa de Inundação Probabilístico com incertezas nos parâmetros de brecha de ruptura.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo geral desse trabalho foi desenvolver uma ferramenta com foco no mapeamento probabilístico de inundações decorrentes de rompimentos de barragens considerando incertezas relacionadas aos parâmetros de brecha e ao coeficiente de rugosidade de Manning. Para cumprir com o proposto, foram desenvolvidos dois algoritmos computacionais que permitem a execução de simulações automatizadas com variação do coeficiente de rugosidade de Manning e de parâmetros de brecha de ruptura. Os algoritmos desenvolvidos foram aplicados em um estudo de caso teórico de modo a validar as ferramentas quanto a sua aplicabilidade.

A ferramenta desenvolvida objetivou uma abordagem eficiente para a modelagem hidrodinâmica de modo a ampliar os subsídios a tomadas de decisão em estudos desenvolvidos a partir da modelagem hipotética do rompimento de barragens.

Essa aplicação seguiu as recomendações descritas em Goodell (2014) para ampliar o potencial do programa HEC-RAS e de sua API HEC-RASController por meio do uso de linguagens de programação para manipulação direta dos dados associados aos projetos de simulação e apresenta avanços. Dentre as inovações trazidas na ferramenta, pode-se citar as metodologias de análise de sensibilidade do modelo hidrodinâmico bidimensional do HEC-RAS ao coeficiente de rugosidade de Manning e aos parâmetros de brecha de ruptura visto que a ampla maioria dos estudos recentes desenvolvidos utiliza o módulo unidimensional do programa.

Além disso, ao definir como estratégia a execução de simulações hidrodinâmicas completas, o presente estudo tem como vantagem a obtenção direta dos resultados hidrodinâmicos do vale de jusante em cada uma das iterações permitindo uma representação dos resultados probabilísticos de forma mais rigorosa, ou seja, sem necessitar correlacionar os resultados probabilísticos do vale jusante a nenhum parâmetro de referência tal como quantis de vazão de pico associados a probabilidades de excedência como é o caso das aplicações que envolvem a aplicação do programa McBreach, por exemplo (LARA, 2016; MCCAN, 2016, GOODELL *et al.*, 2018; SILVA, 2021). Essa constatação é relevante com base nas

conclusões dispostas por Silva (2021) que apontam para a dificuldade de se caracterizar um hidrograma de ruptura probabilístico a partir de uma série de hidrogramas modelados visto que para um mesmo quantil de vazão de pico são identificados hidrogramas com diversos tempos de pico, recessão e volume propagado.

Outra vantagem associada a ferramenta desenvolvida está relacionada a adaptabilidade do algoritmo para incorporação de novos critérios, cenários, fontes de incerteza e metodologias de variação de parâmetros tendo em vista a utilização de linguagem integralmente aberta para uso e aprimoramento por parte da comunidade acadêmica.

Ao adotar a estratégia de execução de simulações completas, contudo, a metodologia apresenta como principal desvantagem o aumento da demanda computacional que foi superior a cinco dias mesmo utilizando de malha computacional com menor resolução para facilitar a aplicabilidade da metodologia. Em relação a essa desvantagem, novas abordagens podem ser propostas com a utilização de metodologias de variação de parâmetros alternativas ao tradicional MMC (e.g: PEM, LHS) de modo a otimizar os estudos de análise de sensibilidade e mapeamento probabilístico de inundações. Além disso, ressalta-se a possibilidade de desenvolvimento de algoritmo análogo ao apresentado para programas que permitem a execução de simulações em unidades de processamento gráfico (GPU) e apresentam menores tempos de processamento computacional como o programa *River Flow 2D* (HYDRONIA, 2021).

Além disso, outra lacuna da metodologia proposta se dá por ainda não ser capaz de avaliar o impacto das variações de cada um dos parâmetros de brecha isoladamente. Essa melhoria permitiria que a ferramenta quantificasse qual dos parâmetros variados foi responsável por maior ou menor impacto nos resultados do modelo hidrodinâmico assim como realizado por Tsai *et al.* (2019).

O estudo de caso desenvolvido possibilitou quantificar as incertezas referentes aos parâmetros de brecha e ao coeficiente de rugosidade de Manning. De maneira geral, os parâmetros de brecha apresentaram impacto amplamente mais significativo nos resultados do modelo hidrodinâmico o que também foi identificado por outros

autores em aplicações que avaliaram o impacto dos parâmetros de brecha e do coeficiente de rugosidade de Manning conjuntamente (TSAI *et al.*, 2019).

Tratando dos resultados hidrodinâmicos obtidos, a metodologia propôs a análise em três âmbitos principais: geral, regional e local. Na escala geral, a análise demonstrou que as áreas das envoltórias de inundação apresentaram variação bastante superior para os parâmetros de brecha ($C_v=10,5\%$) quando comparado com os resultados obtidos para o coeficiente de rugosidade de Manning ($C_v=2,9\%$). Na escala regional, pôde-se identificar as maiores variações das profundidades de escoamento no trecho entre o terceiro e o quinto quilômetro em relação ao eixo da barragem, local em que há a passagem de um vale mais encaixado para um vale mais aberto com topografia mais plana.

A análise local permitiu a identificação do impacto dessas incertezas em pontos de edificações específicas com finalidade comercial (Ponto 1), empresarial (Ponto 2) e residencial (Ponto 3). Nessa análise, as profundidades de escoamento apresentaram variações de 1,2; 2,1 e 2,1 metros considerando as variações dos parâmetros de brecha e de 0,4; 0,6 e 0,4 para a variação do coeficiente de rugosidade de Manning.

Para os tempos de chegada da onda de ruptura, essa avaliação apontou para uma baixa sensibilidade em função das variações do coeficiente de rugosidade de Manning ($C_v=0 - 6\%$). Essa constatação é bastante relevante quando se considera a análise do impacto que a variação proposta pode ter em estudos tais como planos de evacuação elaborados em Plano de Ação Emergencial (PAE) e Plano de Ação de Emergência para Barragem de Mineração (PAEBM).

O mesmo comportamento não foi identificado para as variações dos parâmetros de brecha de ruptura considerando que os tempos de chegada apresentaram variações amplamente significativas ($C_v=19 - 38\%$), tendendo a impactar significativamente na dinâmica de evacuação dos estudos de segurança de barragens.

Apesar dos resultados obtidos, ressalta-se as limitações do estudo de caso principalmente em função da utilização de resolução espacial reduzida para redução de tempo de processamento, das especificidades do cenário de ruptura de barragem

de água pela ocorrência de galgamento e da consideração de um hidrograma de ruptura de referência obtido por meio de formulação empírica (FROEHLICH, 2016) para a aplicação do MMC com variação do coeficiente de rugosidade de Manning de modo que os resultados obtidos não podem ser generalizados para situações distintas das apresentadas.

Assim, as principais conclusões desse estudo são:

- A ferramenta computacional desenvolvida traz grandes benefícios para a elaboração de análises de sensibilidade e mapeamentos probabilísticos de inundações decorrentes do rompimento de obras hidráulicas ou mesmo de eventos de cheia natural considerando a variação do coeficiente de rugosidade de Manning unicamente (Apêndice A);
- O algoritmo é capaz de aplicar o MMC para variação dos parâmetros de brecha de ruptura e do coeficiente de rugosidade de Manning considerando qualquer distribuição de probabilidades selecionada permitindo a extração de resultados de área inundada, profundidade de escoamento, tempo de chegada da onda de cheia além de resultados adicionais que podem ser extraídos dos mesmos arquivos acessados tais como velocidade do escoamento e risco hidrodinâmico;
- A ferramenta tem amplo potencial para ser aprimorada considerando outros cenários de ruptura, critérios de amostragem e fontes de incerteza que podem seguir a mesma lógica de automatização com variação direta dos parâmetros do modelo por meio da edição dos arquivos de entrada e uso da API HECRASController para acionamento das funções principais do programa;
- Os resultados do estudo de caso demonstraram que os parâmetros de brecha de ruptura foram responsáveis por impacto amplamente mais significativo nos resultados do modelo hidrodinâmico;
- O estudo de caso demonstrou a aplicabilidade de abordagens probabilísticas para mapeamentos de inundação considerando diferentes fontes de incertezas de modo a ampliar os subsídios fornecidos para tomada de decisão em estudos de segurança de barragens;

- O estudo possibilitou a quantificação do impacto das imprecisões dos parâmetros de incertezas nos resultados de área inundada, profundidade de escoamento e tempo de chegada da onda de ruptura ao longo de seções definidas na área de estudo e em pontos específicos de referência adotados em edificações com diferentes ocupações.

A elaboração de trabalhos complementares é essencial para complementar esse estudo de forma mais ampla. Nesse sentido, são apresentadas as seguintes recomendações para trabalhos futuros:

- Recomenda-se que em trabalhos futuros sejam variados os parâmetros de brecha de ruptura e o coeficiente de rugosidade simultaneamente o que pode ser feito por meio da sincronização dos algoritmos desenvolvidos no presente trabalho. Além disso, sugere-se que sejam analisados os erros de convergência numérica obtidos em cada repetição do Método de Monte Carlo de modo a se descartar simulações com erros elevados;
- Sugere-se que a análise de sensibilidade realizada seja ampliada para consideração de imprecisões em outros parâmetros tais como dados topográficos, resolução de geometrias computacionais e coeficiente de descarga do hidrograma de ruptura;
- Sugere-se que sejam estudados limites criteriosos para as variáveis aleatoriamente sorteadas de modo a reduzir a possibilidade de combinações de parâmetros com pouca representatividade física;
- Recomenda-se fortemente a avaliação de metodologias de variação de parâmetros alternativas ao tradicional MMC conforme apresentado na revisão de literatura desse trabalho. Nesse sentido, os métodos de amostragem por hipercubo latino (LHS) e perturbação (PEM) vem sendo utilizado em diversos estudos recentes e apontam para um elevado potencial de enriquecimento dos resultados da modelagem hidrodinâmica com menor aumento de demanda computacional requerida;

- Sugere-se ainda que os resultados hidrodinâmicos obtidos por meio da abordagem probabilística sejam propagados para análises de perdas de vida e de danos de modo a se mensurar o real impacto das incertezas presentes no coeficiente de rugosidade de Manning e nos parâmetros de brecha de ruptura nos estudos de segurança de barragens.

REFERÊNCIAS

- Altinakar, M. S. (2013, outubro) Uncertainty in Two-Dimensional Dam-Break Flood Modeling and Consequence Analysis. *Graz, Austria: Austrian National Committee on Large Dams*. p. 255–270. 12ª ed.
- Bellos, V.; Tsakiris, V. K.; Kopsiaftis, G.; Tsakiris, G. (2020). Propagating Dam Breach Parametric Uncertainty in a River Reach Using the HEC-RAS Software. *Hydrology*, v. 7, n. 4, p. 72.
- Bernard-Garcia, M.; Mahdi, T.-F. (2020). A Worldwide Historical Dam Failure's Database. Montreal, Canadá.
- Beven, K.; Lamb, R.; Leedal, D.; Hunter, N. (2014) Communicating uncertainty in flood inundation mapping: a case study. *International Journal of River Basin Management*.
- Bezerra, R. P. G.; Eleutério, J. C. (2021, novembro) Aplicação de técnicas computacionais para automatização de simulações com o modelo HEC-RAS. *XXIX Congresso Latinoamericano De Hidráulica*. México.
- Bezerra, R. P. G.; Eleutério, J. C. (2020, dezembro). Breve Revisão Sobre Aplicações e Desafios Relacionados ao Mapeamento Probabilístico de Inundações. *II Encontro Nacional De Desastres*.
- Bezerra, R. P. G.; Eleuterio, J. C.; MELO, M. L. S. F. (2021, novembro). Automatização de simulações probabilísticas de inundações com o Python e HEC-RAS 2D: incertezas no coeficiente de Manning. *XXIV Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos*, Belo Horizonte, Brasil.
- Bowles, D. S.; Xu, Y.; Ehasz, J.L.; Briadu, J. L.; Ey, J. C. (2014). Obtaining Reasonable Breach Hydrographs Base on Breach Parameter Estimates from Regression Methods. *Proceedings of the Association of State Dam Safety Officials Conference*. San Diego, CA.
- Brunner, G. L. (2002). *HECRAS - River analysis system user's manual, version 3.1*.
- Candela, A.; Aronica, G. T. Probabilistic Flood Hazard Mapping Using Bivariate Analysis Based on Copulas. (2016). *Journal of Risk Uncertainty Engineering System*.
- Davison, M.; Hassan, M.; Gimeno, O.; Damme, M.; Goff. C. (2013, outubro). A Benchmark study on dam breach and consequence estimation using EMBREA and Life Safety Model. *Graz, Austria: Austrian National Committee on Large Dams*. 12ª ed.
- Desrochers, N. M.; Trudel, M.; Peters, D. L.; Siles, G.; Leconte, R. (2020). Hydraulic

Model Calibration Using Water Levels Derived from Time Series High-Resolution SAR Images. *Journal of Hydraulic Engineering*.

Dysarz, T. (2018). Application of Python Scripting Techniques for Control and Automation of HEC-RAS Simulations. *Water*.

Fundação Estadual De Meio Ambiente De Minas Gerais (FEAM). (2021). *Termo de Referência Para a Entrega de Estudos de Ruptura Hipotética de Barragens: Requisitos, Premissas e Conteúdo Mínimo*.

Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2013). *Federal Guidelines for Inundation Mapping of Flood Risks Associated with Dam Incidents and Failures*.

Federal Energy Regulatory Commission (FERC). (2015). *Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects, Chapter 2 -Selecting and Accommodating Inflow Design Floods for Dams*. Washington, D.C.

Fread, D. L.; Lewis, J. M. (1998). NWS FLDWAV Model: Theoretical Description and User Documentation. *National Weather Service – NWS – NOAA, Office of Hydrology, Hydrologic Research Laboratory*, p. 335.

Froehlich, D. C. (1995). Peak Outflow from Breached Embankment Dam. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 121, n. 1, p. 90–97.

Froehlich, D. C. (2008). Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 134, n. 12, p. 1708–1721.

Froehlich, D. (2016). Empirical model of embankment dam breaching. 24 jun. 2016, Taylor & Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton, FL 33487-2742: CRC Press. p. 1821–1826.

Goodell, C. (2014) *Breaking the HEC-RAS Code: A user's guide to automating HEC-RAS*. Portland, Oregon: h2ls.

Goodell, C. (2018, abril). Probabilistic dam breach modeling using HEC-RAS and McBreach. *Miami: United States Society On Dams*. p. 11.

Hamouda, T. (2018). *Impact of micro-topography and bathymetry modification on inundation modelling with different magnitudes based on SRTM data* (Dissertação de Mestrado). IHE - Delft. Delft, Holanda.

Jung, Y.; Merwade, V. (2012). Uncertainty Quantification in Flood Inundation Mapping Using Generalized Likelihood Uncertainty Estimate and Sensitivity Analysis. *Journal of Hydrologic Engineering*.

Kheradmand, S.; Seidou, O.; Konte, D.; Batoure, M. B. B. (2018). Evaluation of adaptation options to flood risk in a probabilistic framework. *Journal of Hydrology*.

Kim, B.; Sanders, B. F. (2016). Dam-Break Flood Model Uncertainty Assessment:

Case Study of Extreme Flooding with Multiple Dam Failures in Gangneung, South Korea. *Journal of Hydraulic Engineering*.

Lara, P. G. DE. (2016). *Metodologia Probabilística de Previsão de Brecha de Ruptura de Barragens* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. 177 p. Santa Catarina. Brasil.

Leon, A. S.; Goodell, C. (2016). Controlling HEC-RAS using MATLAB. *Environmental Modelling & Software*.

Liu, Z.; Merwade, V. (2018). Accounting for model structure, parameter and input forcing uncertainty in flood inundation modeling using Bayesian model averaging. *Journal of Hydrology*.

Mccann, M. W.; Paxson, G. (2016, outubro). Uncertainty in Dam Failure Consequence Estimates. *3rd European Conference on Flood Risk Management*.

Oubennaceur, K.; Chokmani, K.; Nastev, M.; Tanguy, M.; Raymond, S. (2018). Uncertainty Analysis of a Two-Dimensional Hydraulic Model. *Water*.

Papaioannou, G.; Vasiliades, L.; Loukas, A.; Aronica, G. T. (2017). Probabilistic flood inundation mapping at ungauged streams due to roughness coefficient uncertainty in hydraulic modelling. *Advances in Geosciences*.

Pappenberger, F.; Beven, K.; Horritt, M.; Blazkova, S. (2005). Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations. *Journal of hydrology*.

Silva, A. A. C. L. (2021). *Análise de Incertezas dos Parâmetros de Brecha Aplicada à Modelagem Probabilística do Hidrograma de Ruptura em Barragens de Terra* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. Brasil.

Silva, A. F. R.; Bezerra, R. P. G.; Eleuterio, J. C. (2021, novembro). Automatização do HEC-RAS para geração probabilística de hidrogramas de ruptura de barragens por galgamento. *Xxiv Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos*. Belo Horizonte, Brasil.

Stephens, T. A.; Bledsoe, B. P. (2019). Probabilistic mapping of flood hazards: depicting uncertainty in streamflow, land use, and geomorphic adjustment. *Anthropocene*.

Tsai, C. W.; Yeh, J. J.; Huang, C. H. (2019). Development of probabilistic inundation mapping for dam failure induced floods. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*.

Tschiedel, A. F.; Paiva, R. C. D. (2018). Uncertainty assessment in hydrodynamic modeling of floods generated by dam break. *Brazilian Journal of Water Resources*.

Us Army Corps of Engineers. (2021). *HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. Davis, CA.

Us Army Corps of Engineers. (2021). *Modeler Application Guidance for Steady vs Unsteady, and 1D vs 2D vs 3D Hydraulic Modeling*. Davis, CA.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS. (1986). *Natural Hazards Review*. Davis, CA.

Von Thun, L.; Gillette, D. R. (1990). Guidance on breach parameters. Denver, Colorado.

Wahl, T. L. (2004). Uncertainty of Predictions of Embankment Dam Breach Parameters. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 130, n. 5, p. 389–397.

Xu, Y.; Zhang, L. M. (2009). Breaching Parameters for Earth and Rockfill Dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 135, n. 12, p. 1957–1970.

Yu, J. K.; QIN, X. S.; Larsen, O. (2015). Uncertainty analysis of flood inundation modelling using GLUE with surrogate models in stochastic sampling. *Hydrological Processes*.

Zenz, G.; Goldgruber, M. (2013, outubro). ICOLD Proceeding, *12th International Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams*. 12^a ed.

APÊNDICE A – Algoritmo MMC variação de Manning

```

1 # -*- coding: utf-8 -*-
2 """
3 @author: Rodrigo Perdigão
4 """
5
6 #IMPORTANDO BIBLIOTECAS
7
8 import win32com.client
9 import numpy as np
10 import h5py
11 import pandas as pd
12 import geopandas
13 import time
14 import gdal
15
16
17 # Criação de listas para armazenamento de resultados
18 area_max_list=[] #Área Máxima de Inundação
19 tproces_list=[] #Tempo de Processamento
20 df_depth_max=pd.DataFrame(columns=list(range(24219))) #Profundidade Máxima
21
22 #Dataframes para Tempo de Chegada
23 df_depth_10=pd.DataFrame(columns=list(range(24219)))
24 df_depth_20=pd.DataFrame(columns=list(range(24219)))
25 df_depth_30=pd.DataFrame(columns=list(range(24219)))
26 df_depth_40=pd.DataFrame(columns=list(range(24219)))
27 df_depth_50=pd.DataFrame(columns=list(range(24219)))
28 df_depth_60=pd.DataFrame(columns=list(range(24219)))
29 df_depth_90=pd.DataFrame(columns=list(range(24219)))
30 df_depth_120=pd.DataFrame(columns=list(range(24219)))
31 df_depth_150=pd.DataFrame(columns=list(range(24219)))
32 df_depth_180=pd.DataFrame(columns=list(range(24219)))
33
34 #Listas com Índices de Coeficiente de Rugosidade de Manning
35 mann_1=list(range(1,36))
36 mann_2=list(range(36,71))
37 mann_3=list(range(71,106))
38 mann_4=list(range(106,141))
39 mann_5=list(range(141,176))
40 mann_6=list(range(176,211))
41 mann_7=list(range(211,246))
42
43 n=34 #Aplicação de Monte Carlo Parcial
44
45 for k in range(n):
46     start = time.time()
47
48     raster_input = r'C:\Mannings_n.tif'
49     raster_output=r'C:\Mannings_n.tif'
50     in_data = gdal.Open(raster_input)
51     band1 = in_data.GetRasterBand(1)
52     rows = in_data.RasterYSize
53     cols = in_data.RasterXSize

```

```

54     vals = band1.ReadAsArray(0, 0, cols, rows)
55     driver = in_data.GetDriver()
56     out_data = driver.Create(raster_output, cols, rows,
1,gdal.GDT_Byte,options = ['COMPRESS=Deflate' , 'TILED=YES'])
57     out_data.SetGeoTransform(in_data.GetGeoTransform())
58     out_data.SetProjection(in_data.GetProjection())
59     i=0
60     while i<rows:
61         j=0
62         while j<cols:
63             if vals[i][j]==mann_1[k]:
64                 vals[i][j]=mann_1[k+1]
65             elif vals[i][j]==mann_2[k]:
66                 vals[i][j]=mann_2[k+1]
67             elif vals[i][j]==mann_3[k]:
68                 vals[i][j]=mann_3[k+1]
69             elif vals[i][j]==mann_4[k]:
70                 vals[i][j]=mann_4[k+1]
71             elif vals[i][j]==mann_5[k]:
72                 vals[i][j]=mann_5[k+1]
73             elif vals[i][j]==mann_6[k]:
74                 vals[i][j]=mann_6[k+1]
75             elif vals[i][j]==mann_7[k]:
76                 vals[i][j]=mann_7[k+1]
77             else:
78                 pass
79             j=j+1
80         i=i+1
81     out_data.GetRasterBand(1).WriteArray(vals)
82     out_data.FlushCache()
83     del in_data
84     del out_data
85
86     #Atribuindo funções do HECRASController ao Objeto RC
87     RC=win32com.client.Dispatch("RAS507.HECRASCONTROLLER")
88
89     #Abrindo Interface Gráfica
90     RC.ShowRAS()
91
92     #Abrindo Projeto
93     RC.Project_Open(r"C:\bench_icold_artigo.prj")
94
95     #Executando Simulação do Plano Atual
96     Simulacao=RC.Compute_CurrentPlan(None, None, True)
97
98     #Salvando Projeto
99     RC.Project_Save()
100
101     #Fechando Interface Gráfica
102     RC.QuitRAS()
103
104     end = time.time()
105     tproces_list.append((end-start)/60)
106
107     #Armazenando Resultados da Simulação
108     #Área Máxima Inundada

```

```
109     area_max_list.append(float(geopandas.read_file(r"C:\Inundation Boundary
(Max Value_0).shp") ["Area"]))
110     #Profundidades de Escoamento
111     with h5py.File(r'C:\bench_icold_artigo.p02.hdf','r') as hdf:
112         data=np.array(hdf.get('Results/Unsteady/Output/Output Blocks/Base
Output/Unsteady Time Series/2D Flow Areas/jusante/Depth'))
113
114         #Profundidade Máxima
115         depth_max=(np.max(np.array(data),axis=0))
116         df_depth_max.loc[len(df_depth_max)]=depth_max
117
118         #Profundidades Intermediárias para Cômputo de Tempo de Chegada
119         depth_10=np.where(data[9] > 0.61, 1, 0)
120         depth_20=np.where(data[19] > 0.61, 1, 0)
121         depth_30=np.where(data[29] > 0.61, 1, 0)
122         depth_40=np.where(data[39] > 0.61, 1, 0)
123         depth_50=np.where(data[49] > 0.61, 1, 0)
124         depth_60=np.where(data[59] > 0.61, 1, 0)
125         depth_90=np.where(data[89] > 0.61, 1, 0)
126         depth_120=np.where(data[119] > 0.61, 1, 0)
127         depth_150=np.where(data[149] > 0.61, 1, 0)
128         depth_180=np.where(data[179] > 0.61, 1, 0)
129         df_depth_10.loc[len(df_depth_10)]=depth_10
130         df_depth_20.loc[len(df_depth_20)]=depth_20
131         df_depth_30.loc[len(df_depth_30)]=depth_30
132         df_depth_40.loc[len(df_depth_40)]=depth_40
133         df_depth_50.loc[len(df_depth_50)]=depth_50
134         df_depth_60.loc[len(df_depth_60)]=depth_60
135         df_depth_90.loc[len(df_depth_90)]=depth_90
136         df_depth_120.loc[len(df_depth_120)]=depth_120
137         df_depth_150.loc[len(df_depth_150)]=depth_150
138         df_depth_180.loc[len(df_depth_180)]=depth_180
```

APÊNDICE B – Algoritmo MMC variação de parâmetros de brecha

```

1 # -*- coding: utf-8 -*-
2 """
3 @author: Rodrigo Perdigão
4 """
5 #IMPORTANDO BIBLIOTECAS
6
7 import win32com.client
8 import numpy as np
9 import h5py
10 import pandas as pd
11 from scipy.stats import laplace_asymmetric
12 import geopandas
13 import time
14
15 # Criação de listas para armazenamento de resultados
16 tp_list=[] #Tempo de Pico
17 qp_list=[] #Vazao de Pico
18 area_max_list=[] #Area Máxima de Inundação
19 tproces_list=[] #Tempo de Processamento
20 df_depth_max=pd.DataFrame(columns=list(range(24219))) #Profundidade Maxima
21
22
23 #Dataframes para Tempo de Chegada
24 df_depth_10=pd.DataFrame(columns=list(range(24219)))
25 df_depth_20=pd.DataFrame(columns=list(range(24219)))
26 df_depth_30=pd.DataFrame(columns=list(range(24219)))
27 df_depth_40=pd.DataFrame(columns=list(range(24219)))
28 df_depth_50=pd.DataFrame(columns=list(range(24219)))
29 df_depth_60=pd.DataFrame(columns=list(range(24219)))
30 df_depth_90=pd.DataFrame(columns=list(range(24219)))
31 df_depth_120=pd.DataFrame(columns=list(range(24219)))
32 df_depth_150=pd.DataFrame(columns=list(range(24219)))
33 df_depth_180=pd.DataFrame(columns=list(range(24219)))
34
35 #Parametros de Brecha Amostrados
36 LF_list=[] #Largura Final
37 EL_FUN_list=[] #Elevacao de Fundo
38 Zesq_list=[] #Inclinacao Lateral Esquerda
39 Zdir_list=[] #Inclinacao Lateral Direita
40 TF_list=[] #Tempo de Formacao
41
42 #Dados Iniciais
43 HB = 61 #Altura do Macico
44 Lcrista = 360 # Largura da Crista
45 El_crista = 272 # Elevacao da Crista
46 El_rocha = 206.03 #Elevacao do Fundo Rochoso
47
48 n=2000 #Aplicação de Monte Carlo Total
49
50 for i in range(n):

```

```

51 start = time.time()
52 #Estimativa de Parâmetros
53 #Elevacao de Fundo
54 X = El_crista - laplace_asymmetric.rvs(loc=1, scale=0.06301609,
kappa=0.69327604)*HB
55 while X < El_rocha:
56     X = El_crista - laplace_asymmetric.rvs(loc=1, scale=0.06301609,
kappa=0.69327604)*HB
57 else:
58     EL_FUN = X
59
60 #Largura de Fundo
61 Y = np.random.gamma(shape=0.2515,scale=1/1.6397)*Lcrista
62 while Y > Lcrista:
63     Y = np.random.gamma(shape=0.2515,scale=1/1.6397)*Lcrista
64 else:
65     LF = Y
66 #Inclinacoes Laterais
67 ZE=np.random.gamma(shape=0.4974,scale=1/0.2281)
68 ZD=np.random.gamma(shape=0.4974,scale=1/0.2281)
69 EL_topo = LF+ZE*(El_crista-EL_FUN)+ZD*(El_crista-EL_FUN)
70
71 while EL_topo > 1.1*Lcrista:
72     ZE=np.random.gamma(shape=0.4974,scale=1/0.2281)
73     ZD=np.random.gamma(shape=0.4974,scale=1/0.2281)
74     EL_topo = LF+ZE*(El_crista-EL_FUN)+ZD*(El_crista-EL_FUN)
75 else:
76     Z_esq = ZE
77     Z_dir = ZD
78
79 #Tempo de Formacao
80 TF=np.random.gamma(shape=1.5932,scale=1/1.5007)
81
82 #Edicao de Arquivo de Plano
83 my_file = open(r"C:\bench_icold_artigo.p02")
84 string_list = my_file.readlines()
85 my_file.close()
86 string_list[119]='Breach
87 Geom=180,%.2f,%.2f,%.2f,%.2f,False,,%,.2f,1.7\n'%(LF,EL_FUN,Z_esq,Z_dir,TF)
88 my_file = open(r"C:\bench_icold_artigo.p02", "w")
89 new_file_contents = ''.join(string_list)
90 my_file.write(new_file_contents)
91 my_file.close()
92
93 #Atribuindo funções do HECRASController ao Objeto RC
94 RC=win32com.client.Dispatch("RAS507.HECRASCONTROLLER")
95
96 #Abrindo Interface Gráfica
97 RC.ShowRAS()
98
99 #Abrindo Projeto
100 RC.Project_Open(r"C:\bench_icold_artigo.prj")
101
102 #Executando Simulação do Plano Atual
103 Simulacao=RC.Compute_CurrentPlan(None, None, True)
104 #Salvando Projeto

```

```

104 RC.Project_Save()
105
106 #Fechando Interface Gráfica
107 RC.QuitRAS()
108
109 end = time.time()
110 tproces_list.append((end-start)/60)
111
112 #Armazenando Resultados da Simulação
113 #Área Máxima Inundada
114 area_max_list.append(float(geopandas.read_file(r"C:\Inundation Boundary
115 (Max Value_0).shp")["Area"]))
116 #Profundidades de Escoamento
117 with h5py.File(r'C:\bench_icold_artigo.p02.hdf','r') as hdf:
118     data=np.array(hdf.get('Results/Unsteady/Output/Output Blocks/Base
119 Output/Unsteady Time Series/2D Flow Areas/jusante/Depth'))
120
121 #Profundidade Máxima
122 depth_max=(np.max(np.array(data),axis=0))
123 df_depth_max.loc[len(df_depth_max)]=depth_max
124
125 #Profundidades Intermediárias para Cômputo de Tempo de Chegada
126 depth_10=np.where(data[9] > 0.61, 1, 0)
127 depth_20=np.where(data[19] > 0.61, 1, 0)
128 depth_30=np.where(data[29] > 0.61, 1, 0)
129 depth_40=np.where(data[39] > 0.61, 1, 0)
130 depth_50=np.where(data[49] > 0.61, 1, 0)
131 depth_60=np.where(data[59] > 0.61, 1, 0)
132 depth_90=np.where(data[89] > 0.61, 1, 0)
133 depth_120=np.where(data[119] > 0.61, 1, 0)
134 depth_150=np.where(data[149] > 0.61, 1, 0)
135 depth_180=np.where(data[179] > 0.61, 1, 0)
136 df_depth_10.loc[len(df_depth_10)]=depth_10
137 df_depth_20.loc[len(df_depth_20)]=depth_20
138 df_depth_30.loc[len(df_depth_30)]=depth_30
139 df_depth_40.loc[len(df_depth_40)]=depth_40
140 df_depth_50.loc[len(df_depth_50)]=depth_50
141 df_depth_60.loc[len(df_depth_60)]=depth_60
142 df_depth_90.loc[len(df_depth_90)]=depth_90
143 df_depth_120.loc[len(df_depth_120)]=depth_120
144 df_depth_150.loc[len(df_depth_150)]=depth_150
145 df_depth_180.loc[len(df_depth_180)]=depth_180
146
147 #Extraindo Parametros do Hidrograma de Ruptura
148 qp=max(data)
149 qp_list.append(qp)
150 tp=data.index(qp)
151 tp_list.append(tp)
152 #Salvando Parametros de Brecha Amostrados na Iteracao i
153 LF_list.append(LF)
154 EL_FUN_list.append(EL_FUN)
155 Zesq_list.append(Z_esq)
156 Zdir_list.append(Z_dir)
157 TF_list.append(TF)

```

APÊNDICE C – Envoltórias probabilísticas de inundação

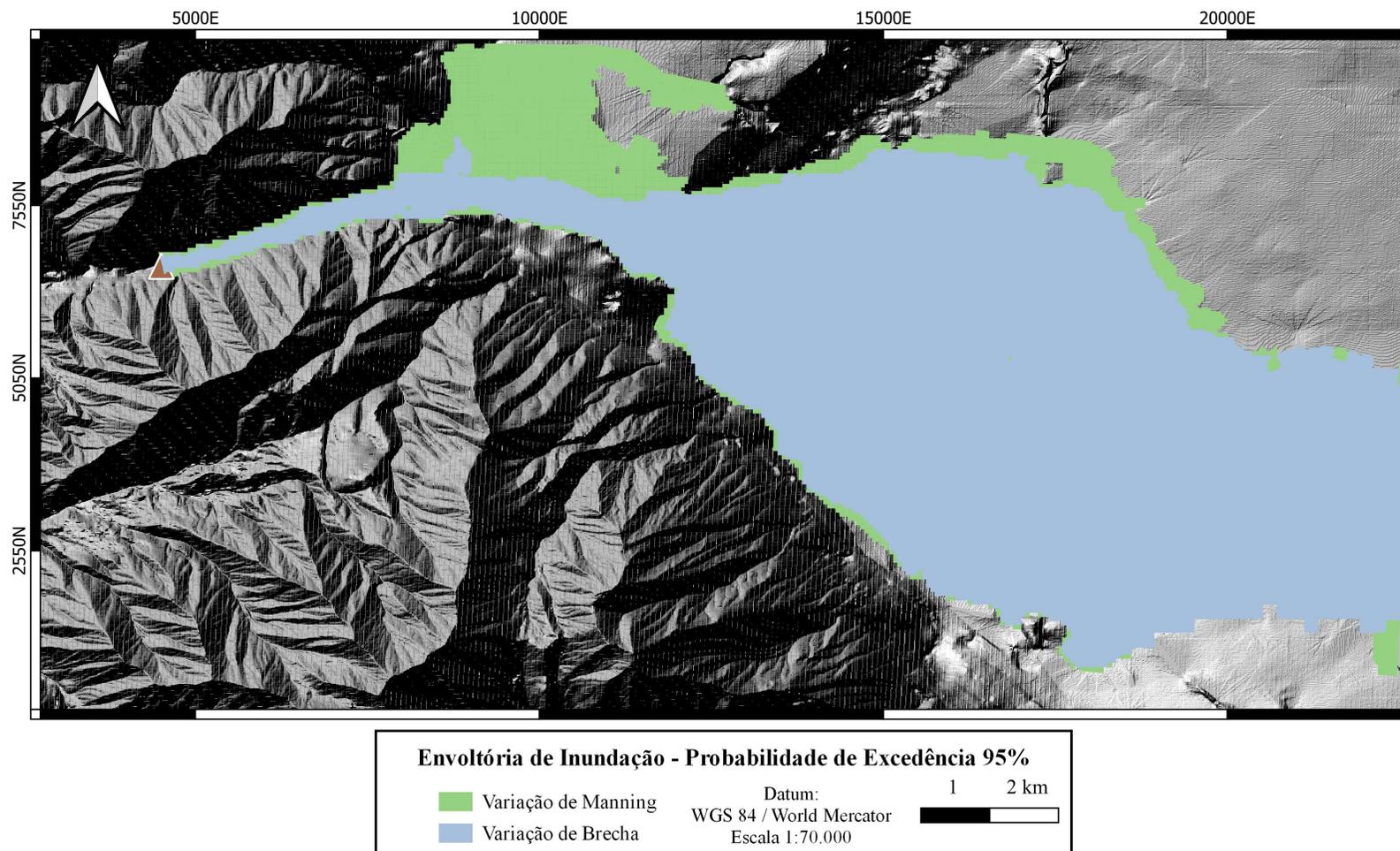


Figura C.1 – Envolvória de Inundação – Probabilidade de Excedência 95%.

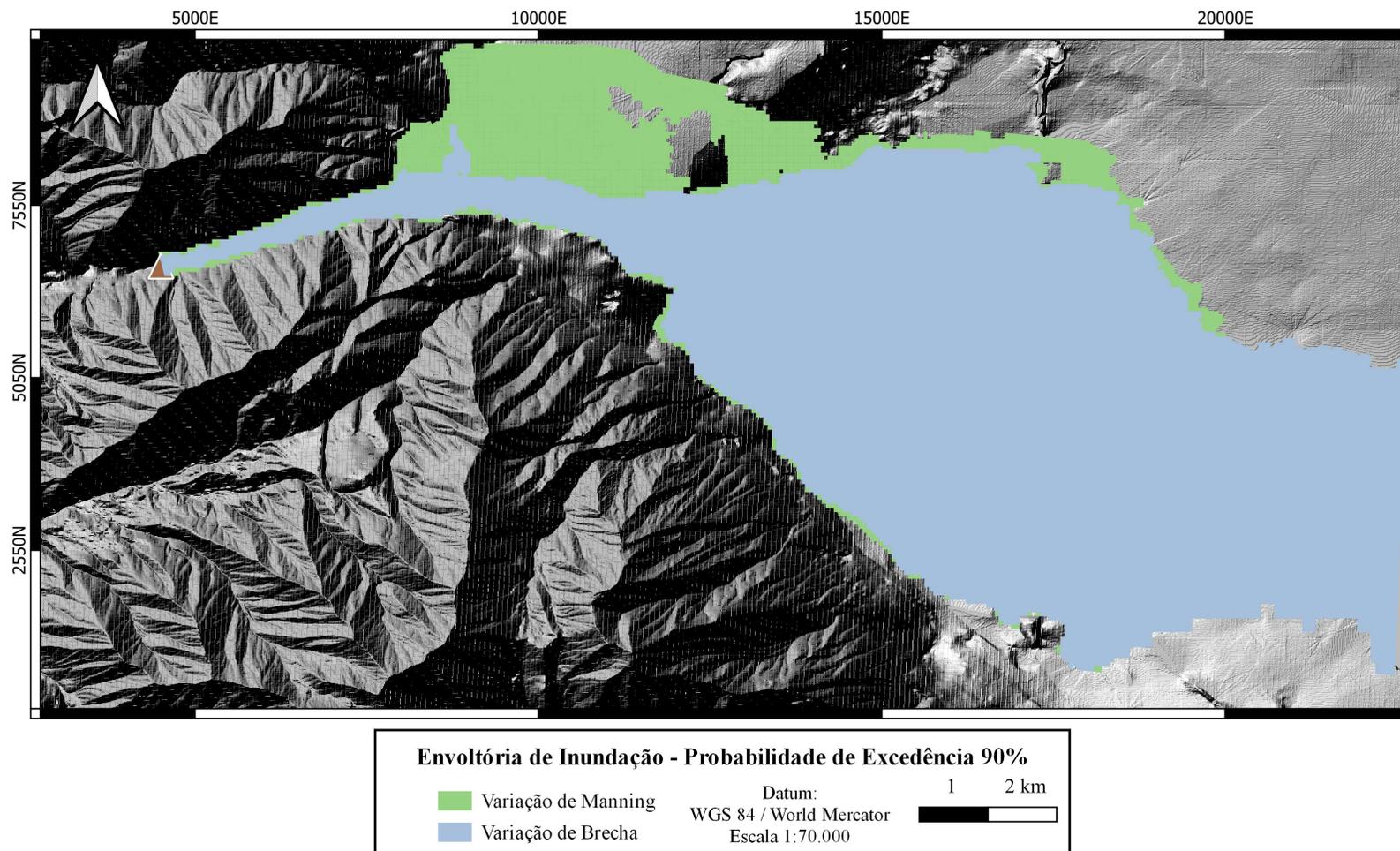


Figura C.2 – Envolvória de Inundação – Probabilidade de Excedência 90%.

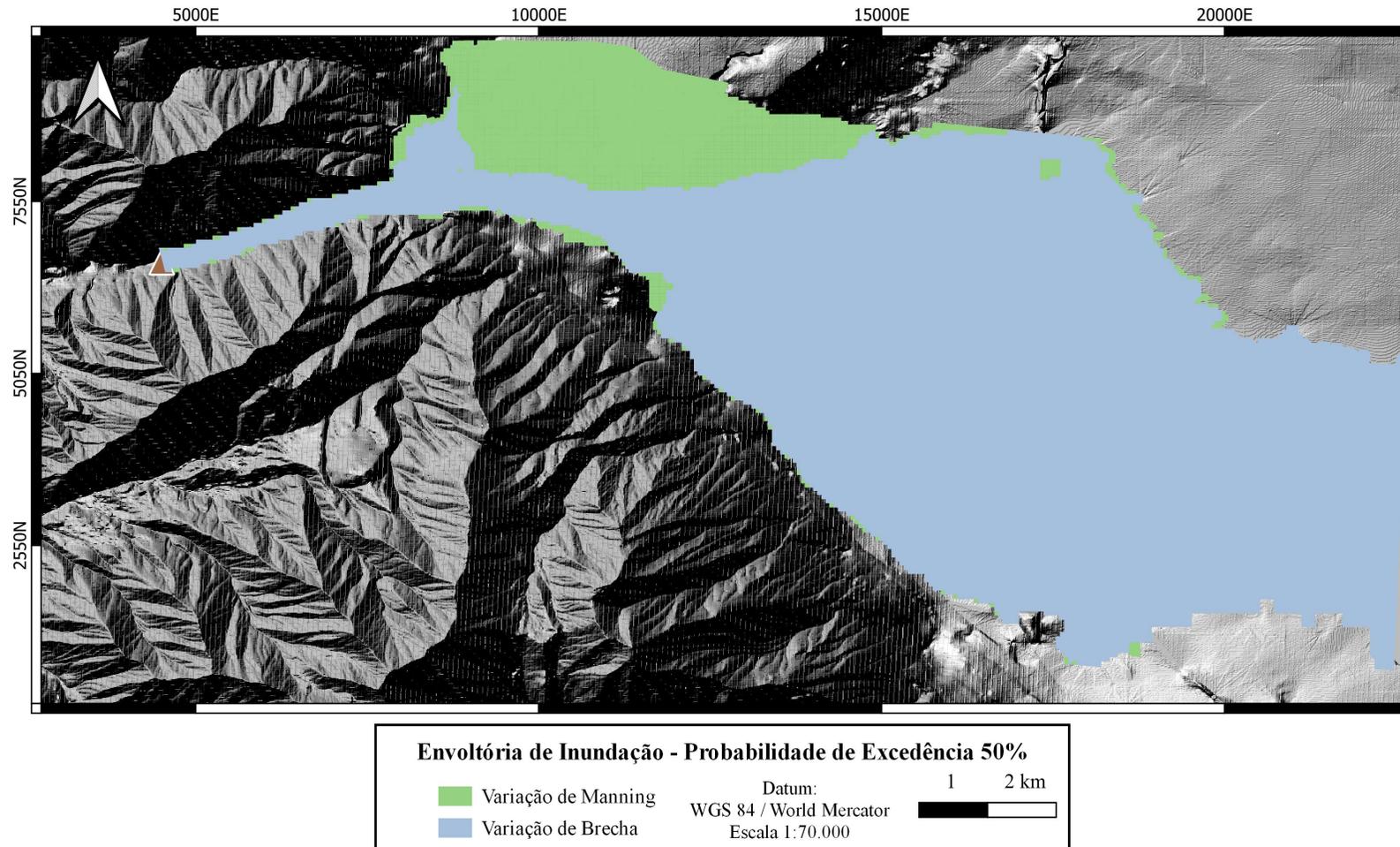


Figura C.3 – Envolvória de Inundação – Probabilidade de Excedência 50%.

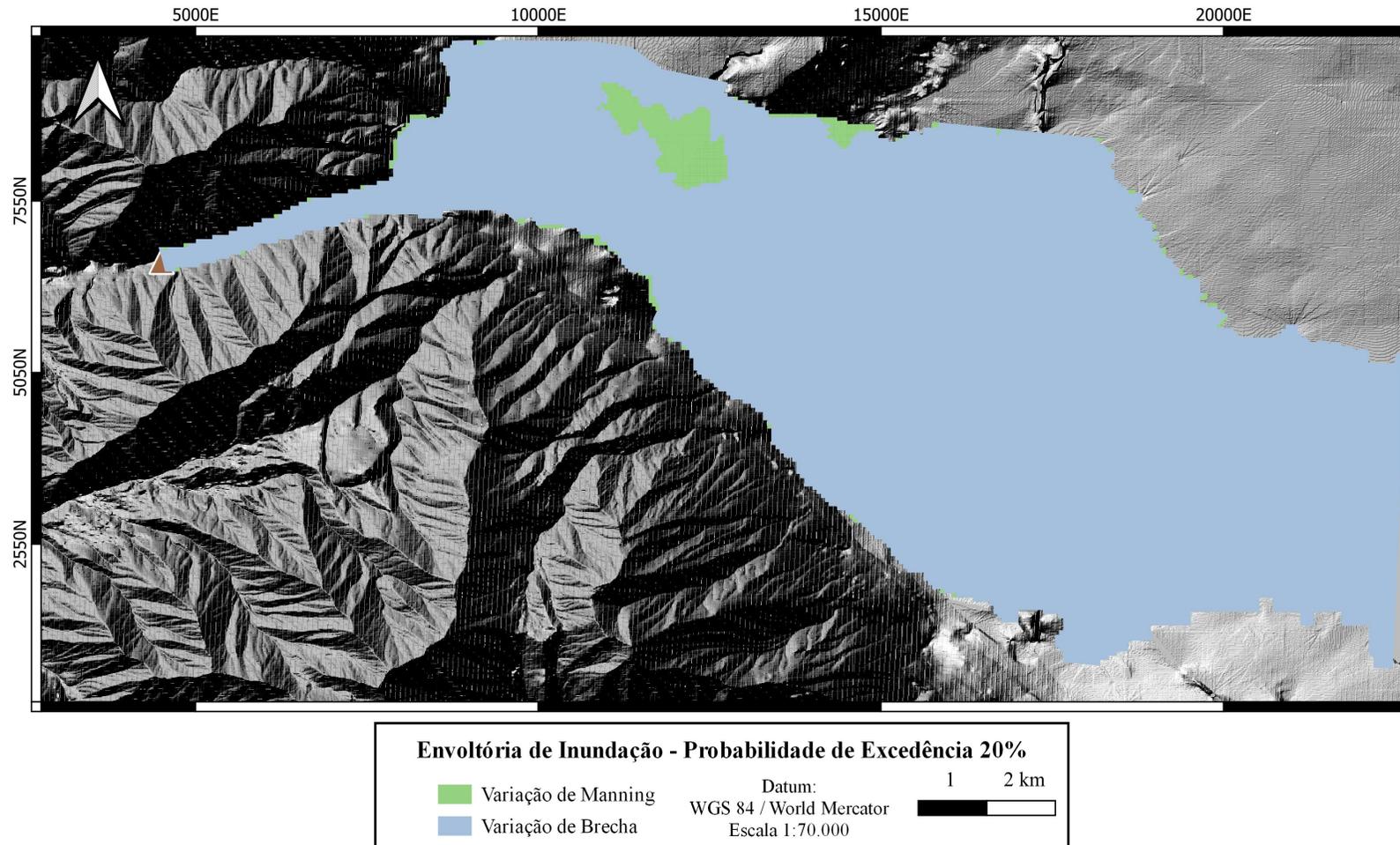


Figura C.4 – Envoltória de Inundação – Probabilidade de Excedência 20%.

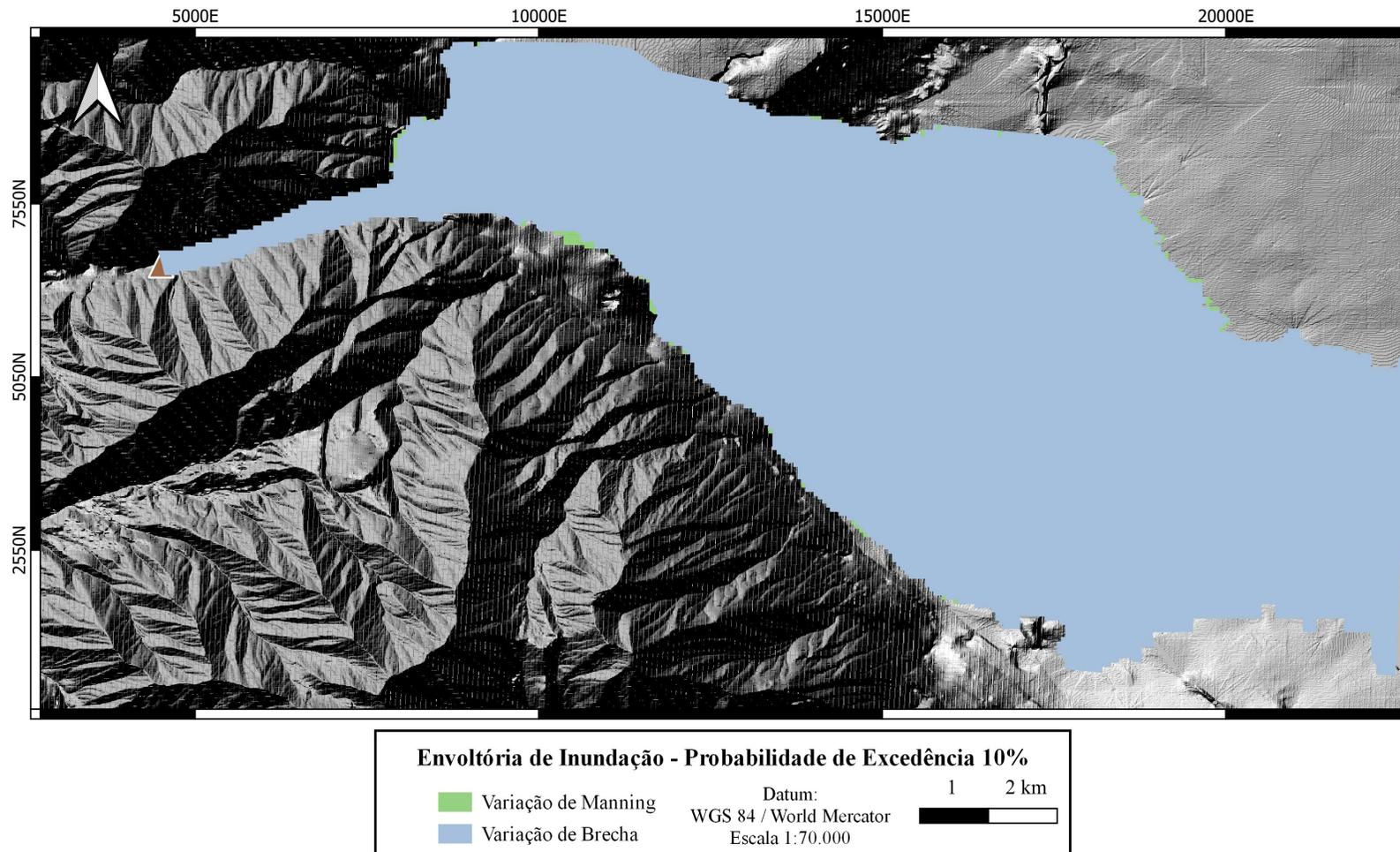


Figura C.5 – Envolvória de Inundação – Probabilidade de Excedência 10%.

APÊNDICE D - Avaliação de demanda computacional

Para avaliar os resultados obtidos na etapa de amostragem do coeficiente de rugosidade de Manning, analisou-se a aderência dos valores gerados por meio da comparação de histogramas com as funções de densidade de probabilidades referente aos ajustes apresentados na Tabela 4.7 para a distribuição Lognormal. A Figura D.1 apresenta os gráficos obtidos. Como pode ser observado, todos os parâmetros gerados possuíram distribuição semelhante às distribuições lognormais.

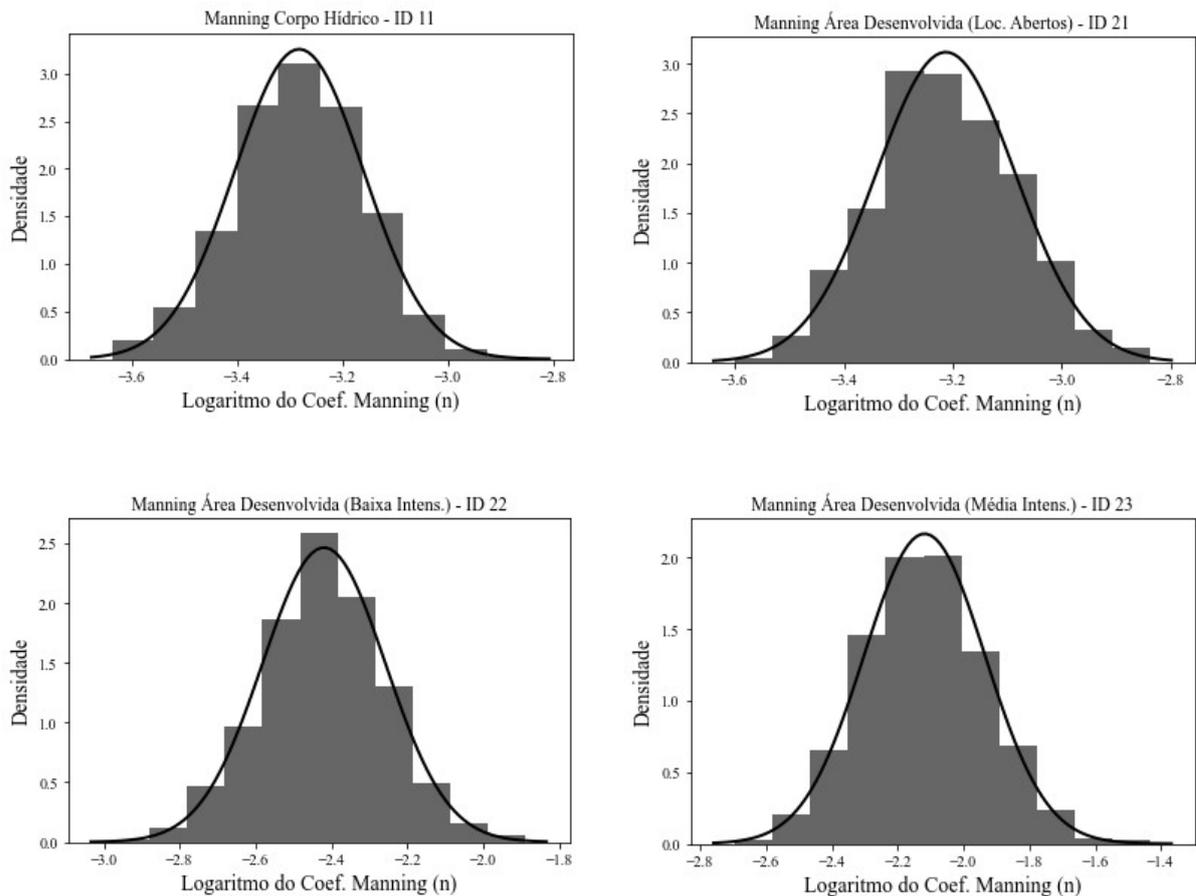


Figura D.1 – Ajuste de coeficientes de rugosidade de Manning as distribuições probabilísticas adotadas para cada um dos tipos de uso e cobertura do solo.

(continua)

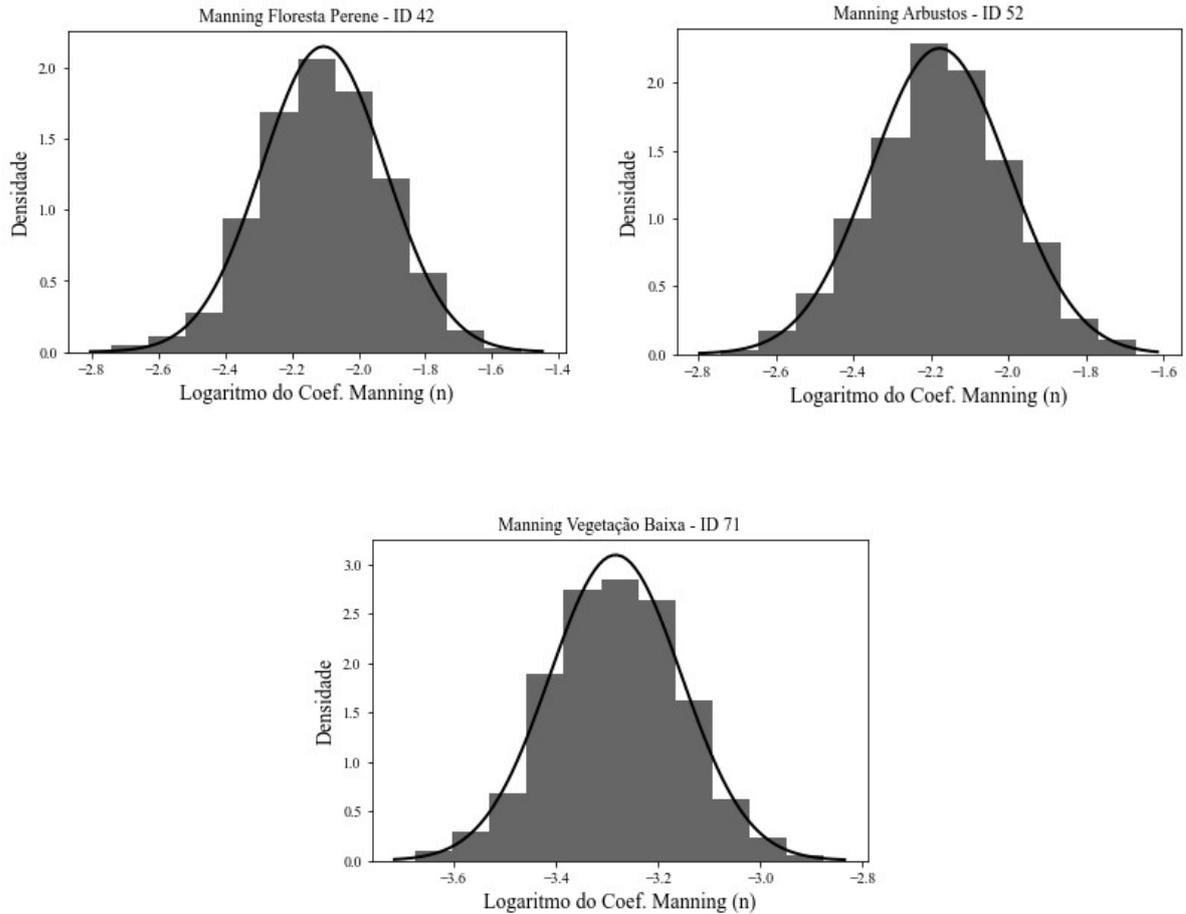


Figura D.1 – Ajuste de coeficientes de rugosidade de Manning a distribuições probabilísticas adotadas para cada um dos tipos de uso e cobertura do solo.
(conclusão)

De modo análogo, o mesmo procedimento foi realizado para os cinco parâmetros de brecha de ruptura analisados considerando as distribuições Gama e Assimétrica de Laplace e os ajustes apresentados na Tabela 4.2. A Figura D.2 apresenta a sobreposição de histogramas e funções de densidade de probabilidades.

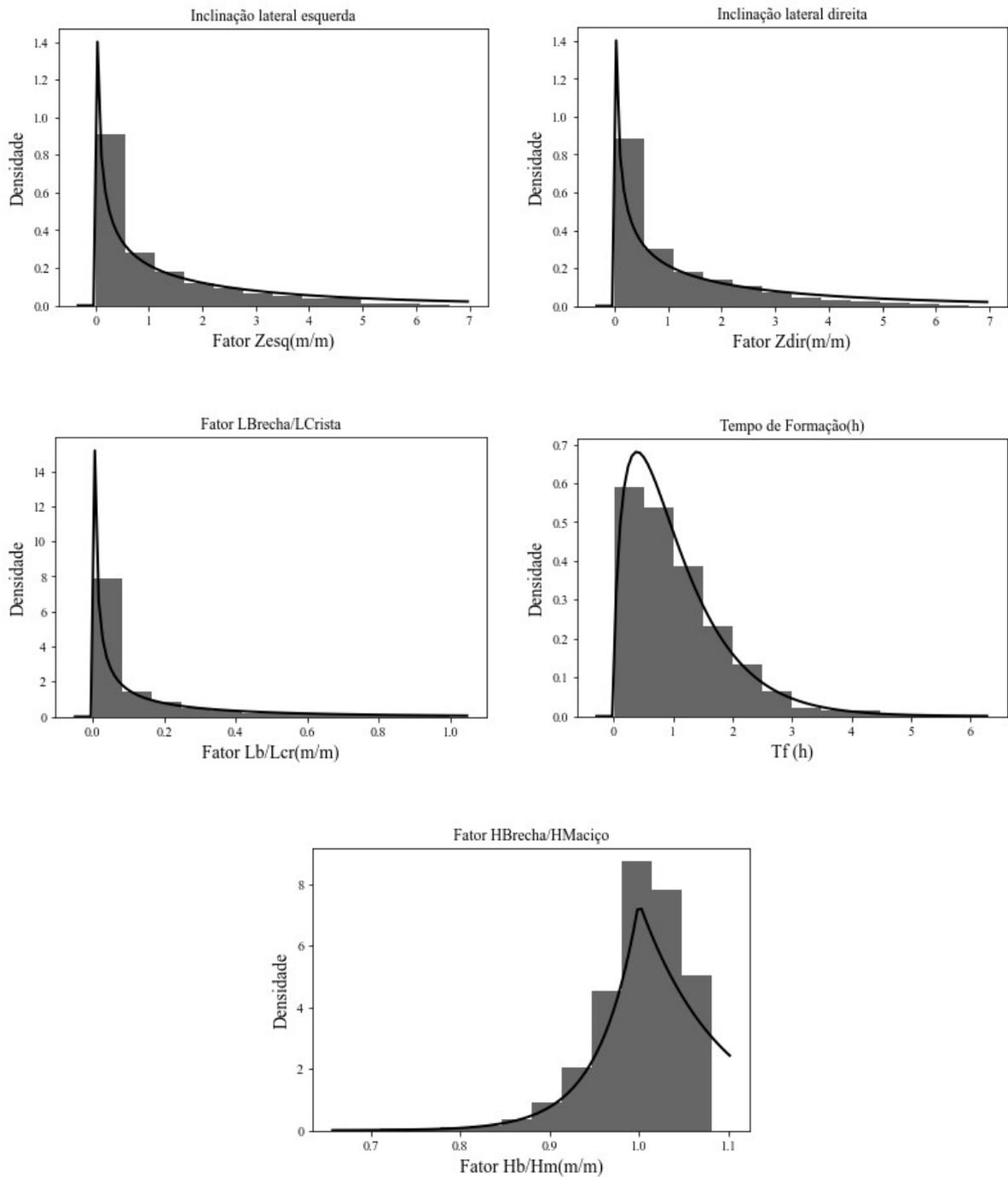


Figura D.2 - Ajuste de parâmetros de brecha das distribuições probabilísticas adotadas.

Os parâmetros gerados possuíram distribuição semelhante às distribuições Gama e Assimétrica de Laplace ajustadas. Os resultados encontrados foram similares aos obtidos por Silva (2021). Especificamente para o ajuste do fator de altura da brecha, ressalta-se o impacto da restrição de fundo rochoso, indicando um limite superior de 1,08 para os valores sorteados e gerando valores um pouco mais elevados do que os indicados pela distribuição de probabilidades selecionada.

APÊNDICE E - Avaliação de demanda computacional

De modo a avaliar a demanda computacional gerada, a Figura E.1 apresenta o diagrama de caixa elaborado considerando os tempos de processamento das duas aplicações do MMC.

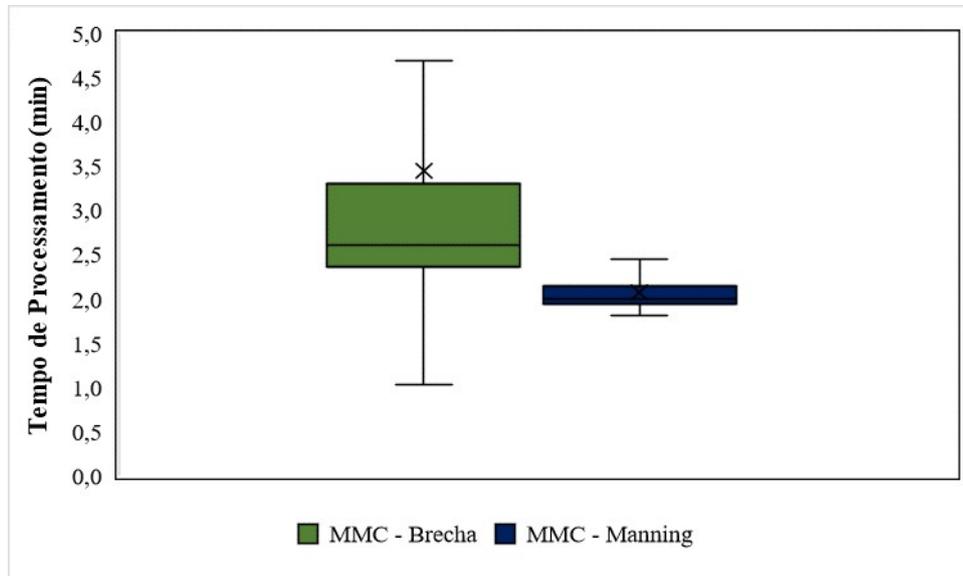


Figura E.1 – Diagramas de Caixa de Tempo Computacional: MMC Manning x MMC Brecha.

Como pode ser visto, o tempo de processamento referente a execução do MMC para a variação do coeficiente de rugosidade de Manning foi consideravelmente inferior ao tempo de processamento requerido para as simulações com variação dos parâmetros de brecha de ruptura. Para o primeiro, foi identificado um processamento médio de 2,01 minutos/simulação ao passo que para o segundo identificou-se tempo de processamento médio de 3,36 min. Essa variação se explica pela ampla variabilidade dos hidrogramas de ruptura utilizados como condição de contorno para o modelo hidrodinâmico na aplicação do MMC com variação dos parâmetros de brecha gerando maior necessidade de ajuste dos tempos computacionais (*time step*) do modelo.

O tempo total de processamento de processamento para a execução do algoritmo com variação do coeficiente de rugosidade de Manning foi de 33,52 horas (1,39 dias) e de 112,17 horas (4,47 dias) para a variação dos parâmetros de brecha de ruptura.