

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

Marco Aurélio Gomes Nascimento

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE MODELOS DE PERDAS DE VIDA BASEADOS EM
AGENTES NO APRIMORAMENTO DE SISTEMAS DE ALERTA E EVACUAÇÃO EM
INUNDAÇÕES NATURAIS E RUPTURA DE BARRAGENS**

Belo Horizonte
2024

Marco Aurélio Gomes Nascimento

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE MODELOS DE PERDAS DE VIDA BASEADOS EM AGENTES NO APRIMORAMENTO DE SISTEMAS DE ALERTA E EVACUAÇÃO EM INUNDAÇÕES NATURAIS E RUPTURA DE BARRAGENS

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: Avaliação e Gerenciamento de Riscos e de Impactos Ambientais

Orientador: Julian Cardoso Eleutério

Belo Horizonte
2024

N244a

Nascimento, Marco Aurélio Gomes.

Avaliação do potencial de modelos de perdas de vida baseados em agentes no aprimoramento de sistemas de alerta e evacuação em inundações naturais e ruptura de barragens [recurso eletrônico] / Marco Aurélio Gomes Nascimento. - 2024.

Cunha. - 2024.

1 recurso online (176 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Julian Cardoso Eleutério.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 170-176.

Bibliografia: f. 160-169.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Recursos hídricos - Desenvolvimento - Teses. 3. Desastres ambientais - Brumadinho (MG) - Teses. 4. Controle de inundações - Teses. 5. Gestão de riscos - Teses. 6. Evacuação emergencial - Teses. 7. Mortalidade - Teses. I. Eleutério, Julian Cardoso. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

[ESCOLA DE ENGENHARIA]

COLEGIADO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM [SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E
RECURSOS HÍDRICOS]

FOLHA DE APROVAÇÃO

"Avaliação do Potencial dos Modelos de Perda de Vida Baseados Em Agentes No
Aprimoramento de Sistemas de Alerta e Evacuação Relacionados A Inundações Naturais e
Decorrentes do Rompimento de Barragens"

MARCO AURÉLIO GOMES NASCIMENTO

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof. JULIAN CARDOSO ELEUTÉRIO

Profa PRISCILLA MACEDO MOURA

Prof. NILO DE OLIVEIRA NASCIMENTO

Prof. LUIZ RAFAEL PALMIER

Profa MARIA CLARA FAVA

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH Versão Final aprovada por

Profa. Priscilla Macedo Moura
Cardoso Eleutério
Coordenadora

Prof. Julian
Orientador

Belo Horizonte, 05 de julho de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Maria Clara Fava, Usuária Externa**, em 08/07/2024, às 09:20, 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, Professor do Magistério Superior**, em 08/07/2024, às 12:00, 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, Professora do Magistério Superior**, em 08/09/2024, às 07:09, 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 **Nilo de Oliveira Nascimento, Presidente de comissão**, em 06/12/2024, às 12:02, 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 **Luiz Rafael Palmier, Membro**, em 08/01/2025, às 09:47, 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 **Eduardo Coutinho de Paula, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 23/05/2025, às 08:39, 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 **3349366** e o código CRC **447CA6ED**.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todas as pessoas que foram fundamentais para a concretização deste percurso acadêmico, em especial:

À minha amada família, à minha mãe, Vera Lúcia, ao meu pai, Jorge Nascimento, ao meu irmão Jorge H. Nascimento, à minha sobrinha Cecília e aos demais familiares. Vocês foram incrivelmente compreensivos e solidários durante todo o tempo em que estive distante, dedicando-me ao mestrado. Sua compreensão e apoio foram pilares essenciais para que essa jornada acadêmica fosse possível. À minha noiva, Patrícia de Deus, meu eterno agradecimento pelo companheirismo e apoio incansável ao longo de toda a trajetória. Sua presença foi a luz que iluminou os dias mais desafiadores e sua compreensão foi um alicerce fundamental para o sucesso dessa empreitada acadêmica.

À equipe de recursos hídricos da Tetra Tech, expresso minha sincera gratidão. Vocês foram verdadeiros companheiros, suportando-me nos momentos difíceis e oferecendo apoio sempre que necessário. A solidariedade e a colaboração dessa equipe foram inestimáveis. À empresa Tetra Tech, ao grupo ITG e às minhas lideranças, agradeço a compreensão e apoio ao permitirem a conciliação da vida acadêmica com a profissional. Essa flexibilidade foi crucial para o sucesso dessa jornada dupla.

Ao meu orientador Julian Eleutério, minha profunda gratidão por todos os ensinamentos, orientações e pela dedicação ao meu desenvolvimento acadêmico. Sua orientação foi essencial para a realização deste trabalho. Aos colegas do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, agradeço a valiosa troca de ideias e sugestões. A colaboração e o compartilhamento de conhecimento foram peças-chave na construção do meu trabalho.

A todos, meu mais sincero agradecimento por contribuírem de maneiras únicas para o sucesso desta jornada. Cada um de vocês desempenhou um papel significativo, e estou profundamente grato por ter contado com o apoio e compreensão de uma rede tão incrível de pessoas.

RESUMO

O presente estudo investiga a eficácia de modelos baseados em agentes na previsão de perdas de vida em eventos de inundação utilizando estudos de caso do rompimento da Barragem B-I de Brumadinho, Brasil, e das inundações no vale do rio Ahr, Alemanha. O objetivo principal foi comparar e validar a precisão desses modelos analisando sua capacidade de simulação em cenários de desastre e a influência das medidas de alerta e evacuação na redução de fatalidades. No estudo empreendido para a ruptura da Barragem B-I, evento marcado pela ausência de planejamento de emergência eficaz, as modelagens revelaram uma representação satisfatória na simulação hidrodinâmica com o HEC-RAS e, com relação à estimativa de perdas de vida, o LifeSim apresentou ótima aderência ao evento real, enquanto o LSM exibiu resultados superestimados e questionáveis. Já no estudo de caso da inundação ocorrida em julho de 2021, em que chuvas extremas causaram 184 mortes na Alemanha, sendo 135 no vale do rio Ahr, os estudos empreendidos, assim como no caso anterior, apontaram que HEC-RAS foi útil na simulação detalhada do comportamento das águas, enquanto o LifeSim, além de apresentar resultados compatíveis com a realidade, identificou possíveis fatores que contribuíram para as fatalidades. Foi identificado que um alerta com antecedência poderia reduzir significativamente as fatalidades em ambos os casos, ressaltando a importância de alertas eficazes e preparação da população. De forma geral, os estudos de caso demonstram a importância de modelos de previsão e sistemas de alerta eficientes para a redução de fatalidades em desastres, além da necessidade de estudos adicionais para compreender as incertezas das modelagens preditivas. O LifeSim mostrou-se mais eficaz na representação de eventos reais e na simulação de cenários de evacuação, destacando-se como uma ferramenta valiosa para a gestão de riscos em inundações naturais e tecnológicas.

Palavras-chave: Perdas de vida; Gestão de risco; Sistemas de alerta e evacuação; Fatalidades; LifeSim; LSM.

ABSTRACT

The present study investigates the effectiveness of the LifeSim and LSM models in predicting loss of life in flood events, using case studies of the Brumadinho dam failure, Brazil, and floods in the Ahr River valley, Germany. The main objective was to compare and validate the accuracy of these models, analyzing their simulation capacity in disaster scenarios and the influence of warning and evacuation measures on reducing fatalities. In the study undertaken for the rupture of the B-I Dam, an event marked by the absence of effective emergency planning, the modeling revealed a satisfactory representation in the hydrodynamic simulation with HEC-RAS and, in relation to the estimation of loss of life, LifeSim showed excellent adherence to the real event, while LSM displayed overestimated and questionable results. In the case study of the flood that occurred in July 2021, in which extreme rains caused 184 deaths in Germany, 135 in the Ahr River valley, the studies undertaken, as in the previous case, showed that HEC-RAS was useful in the simulation detailed analysis of water behavior, while LifeSim, in addition to presenting results compatible with reality, identified possible factors that contributed to fatalities. It was identified that an early warning could significantly reduce fatalities in both cases, highlighting the importance of effective warnings and population preparation. In general, the case studies demonstrate the importance of accurate models and efficient warning systems for reducing fatalities in disasters, in addition to the need for additional studies to understand the uncertainties of predictive modeling. LifeSim proved to be more effective in representing real events and simulating evacuation scenarios, standing out as a valuable tool for risk management in natural and technological floods.

Keywords: Loss of Life; Risk Management; Alert and Evacuation Systems; Fatalities; LifeSim; LSM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Número de desastres ocorridos no mundo em 2022 em comparação com a média do período de 2002 a 2021.....	19
Figura 1.2: Metodologia abordada de cada etapa e sua relação com as demais.....	28
Figura 2.1: Entradas e resultados gerais para um modelo LifeSim	38
Figura 2.2: Ilustração dos critérios de submersão no LifeSim	42
Figura 2.3: Critério de estabilidade em humanos padrão no LifeSim	45
Figura 2.4: Linha do tempo dos componentes do estudo no LifeSim	46
Figura 2.5: Funções de distribuição de probabilidade para tempos para a emissão de alertas usadas no LifeSim (MILETI e SORENSEN, 2017a).	47
Figura 2.6: Curvas simuladas para quatro sistemas de disseminação durante o dia e a noite (MILETI E SORENSEN, 2017b).	48
Figura 2.7: Funções de intervalo PAI simuladas correspondentes a diferentes níveis de preparação e percepção (MILETI E SORENSEN, 2017c).....	49
Figura 2.8: O modelo de Greenshields modificado de regime duplo empregado no LifeSim.	50
Figura 2.9: Função de alta taxa de mortalidade de risco usada no LifeSim.	52
Figura 2.10: Conceito do LSM.....	54
Figura 2.11: Modelo de evacuação com o LSM.	56
Figura 2.12: ODLF para edifícios	59
Figura 2.13: Fluxograma para atualização do <i>status</i> de edifícios com base nos dados de entrada da modelagem hidrodinâmica	59
Figura 2.14: ODLF para pessoas	62
Figura 2.15: Fluxograma para atualização do <i>status</i> de pessoas com base nos dados de entrada da modelagem hidrodinâmica	63
Figura 2.16: ODLF para veículos	64
Figura 2.17: Fluxograma para atualização do <i>status</i> de veículos com base nos dados de entrada da modelagem hidrodinâmica	65
Figura 2.18: Exibição do funcionamento e interação de centros de alerta	68
Figura 3.1: Evolução da ruptura da Barragem B-I.....	73
Figura 3.2: Vista aérea da B I; à esquerda, barragem B VI.....	75
Figura 3.3: Seção transversal da Barragem B1 indicando suas etapas de construção	75

Figura 3.4: Localização da bacia do rio Paraopeba e detalhe do córrego do Feijão .	76
Figura 3.5: Detalhamento da malha 2D do HEC-RAS.....	77
Figura 3.6: Tipos de uso e ocupação do solo no vale a jusante da Barragem B-I. ...	78
Figura 3.7: Hidrograma de ruptura utilizado na modelagem hidrodinâmica	79
Figura 3.8: Inventário de estruturas a jusante da Barragem B-I.....	81
Figura 3.9: Dados dos testes de estabilidade em humanos	90
Figura 3.10: Centros de aviso considerados no LSM.....	92
Figura 3.11: Comparação entre as envoltórias e dados de entrada para o LifeSim e LSM para o estudo de caso da Barragem B-I	96
Figura 3.12: Mapa de profundidades proveniente da simulação hidrodinâmica para a Barragem B-I.....	97
Figura 3.13: Mapa de velocidades proveniente da simulação hidrodinâmica para a Barragem B-I.....	98
Figura 3.14: Análise de sensibilidade quanto ao modo de evacuação e mobilidade no LifeSim para o estudo de caso da Barragem B-I.....	99
Figura 3.15: Box-plot do cenário de reconstituição no LifeSim para o estudo de caso da Barragem B-I	100
Figura 3.16: Box-plots dos cenários com a emissão do alerta em diferentes tempos no LifeSim para o estudo de caso da Barragem B-I. Evacuação feita 100% a pé e população com menos de 65 anos.....	102
Figura 3.17: Cenário adicional variando o tempo de emissão do alerta no LifeSim para o estudo de caso da Barragem B-I	103
Figura 3.18: Curva de mobilização adotada que considera a baixa percepção de risco e a preparação inadequada da população para emergências.	104
Figura 4.1: Reconstrução das ocorrências e ações tomadas durante as inundações no rio Ahr – 12/07/21 a 17h40 do dia 14/07/21	114
Figura 4.2: Reconstrução das ocorrências e ações tomadas durante as inundações no rio Ahr – 18h25 do dia 14/07/21 a 00h22 do dia 15/07/21.....	115
Figura 4.3: Reconstrução das ocorrências e ações tomadas durante as inundações no Rio Ahr – 06h39 a 10h27 do dia 15/07/21	116
Figura 4.4: Mapa geral da bacia hidrográfica do rio Ahr indicando a localização das cidades inseridas na área de estudo, estações de medição, afluentes e recorte da região objeto de estudo.....	119
Figura 4.5: Detalhamento da malha 2D do HEC-RAS.....	120

Figura 4.6: Modelo Digital de Elevação (MDE) utilizado	121
Figura 4.7: Uso e Ocupação do Solo	122
Figura 4.8: Curva-chave na seção de montante do domínio do modelo	124
Figura 4.9: Níveis de água resultantes da reconstrução realizada pela Secretaria de Meio Ambiente do Estado Federal Renânia-Palatinado	124
Figura 4.10: Cotagrama resultante da reconstrução realizada pela Secretaria de Meio Ambiente do Estado Federal Renânia-Palatinado.....	125
Figura 4.11: Hidrograma resultante da reconstrução realizada pela Secretaria de Meio Ambiente do Estado Federal Renânia-Palatinado.....	125
Figura 4.12: Distribuição populacional do HANZE	127
Figura 4.13: Edificações cadastradas no OSM	128
Figura 4.14: Processo para definição do inventário de construções	129
Figura 4.15: Distribuição do número de pessoas por faixa etária e sexo na Renânia-Palatinado	131
Figura 4.16: Sistema viário considerado	132
Figura 4.17: Locais seguros	133
Figura 4.18: Zona de Planejamento de Emergência (ZPE).....	133
Figura 4.19: Dia em que 740 respondentes da Renânia do Norte-Vestfália e da Renânia-Palatinado receberam um primeiro alerta.	135
Figura 4.20: Envoltória máxima da inundação proveniente da simulação hidrodinâmica do cenário derivado da previsão de Altenahr.	141
Figura 4.21: Mapa de profundidades proveniente da simulação hidrodinâmica do cenário derivado da previsão de Altenahr.	142
Figura 4.22: Mapa de velocidades proveniente da simulação hidrodinâmica do cenário derivado da previsão de Altenahr.....	143
Figura 4.23: Box-plots resultantes das estimativas de fatalidades dos cenários simulados	145
Figura 4.24: Box-plots dos cenários do Grupo A, de restituição do evento ocorrido	146
Figura 4.25: Cenários do Grupo B, de estimativa máxima de fatalidades, em comparação ao “GA_C3”, que melhor representa o evento real.....	147
Figura 4.26: Cenário adicional de difusão lenta do primeiro alerta e um tempo elevado para a mobilização variando o tempo de identificação do perigo iminente	149

Figura 4.27: Cenários do Grupo C, de avaliação do aprimoramento da gestão de risco, em comparação ao “GA_C3”, que melhor representa o evento real	150
Figura 4.28: Cenários dos Grupo D e E, de avaliação do aprimoramento da gestão de risco, em comparação ao “GA_C3”, que melhor representa o evento real	151
Figura 4.29: Registros da modelagem de uma das 1.000 do cenário “GA_C3” em tempos distintos	153

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Eventos de rupturas de barragens de rejeitos de mineração no Brasil desde 1960 até 2023.....	21
Tabela 2.1: Parâmetros de evacuação e impacto no resultado do modelo	40
Tabela 2.2: Critérios de submersão no LifeSim.....	41
Tabela 2.3: Parâmetros populacionais definidos para uma alternativa no LifeSim ...	44
Tabela 2.4: Parâmetros de evacuação do LifeSim.....	51
Tabela 2.5: Critérios padrão de estabilidade de veículos no LifeSim para veículos de baixa e alta altura.	52
Tabela 2.6: Descrição da lógica do modelo LSM	57
Tabela 2.7: Siglas utilizadas pelo LSM no contexto das funções ODLF para edifícios	58
Tabela 2.8: Siglas utilizadas pelo LSM no contexto das funções ODLF para pessoas	61
Tabela 2.9: Siglas utilizadas pelo LSM no contexto das funções ODLF para veículos	64
Tabela 2.10: Distância percorrida em um segmento de estrada com base na velocidade de viagem e intervalo de tempo	67
Tabela 3.1: Parâmetros para a evacuação	85
Tabela 3.2: Alturas típicas dos norte-americanos, com base em estatísticas do Centro de Controle e Prevenção de Doenças do Departamento de Saúde e Serviços Humanos dos EUA.....	89
Tabela 3.3: Comparação entre os tempos de chegada observados de estudos anteriores e da mancha simulada para o estudo de caso da Barragem B-I.....	94
Tabela 3.4: Estimativa de localidades e pessoas em risco para o estudo de caso da Barragem B-I.....	95
Tabela 3.5: Análise de sensibilidade quanto ao modo de evacuação e mobilidade no LifeSim para o estudo de caso da Barragem B-I.....	99
Tabela 3.6: Resultados obtidos para o cenário de reconstituição no LifeSim para o estudo de caso da Barragem B-I.....	100
Tabela 3.7: Resultados obtidos nos cenários com a emissão do alerta em diferentes tempos no LifeSim para o estudo de caso da Barragem B-I. Evacuação feita 100% a pé e população com menos de 65 anos.....	101

Tabela 3.8: Resultados obtidos no cenário de restituição do evento real e dos cenários com a emissão do alerta em diferentes tempos no LSM para o estudo de caso da Barragem B-I.....	104
Tabela 3.9: Resultados obtidos por Lumbroso <i>et al.</i> (2021) para o cenário que considera uma evacuação 100% a pé em um estudo de caso da Barragem B-I	105
Tabela 4.1: Características das construções.....	130
Tabela 4.2: Parâmetros para a evacuação para as simulações do rio Ahr	132
Tabela 4.3: Cenários simulados	137
Tabela 4.4: Resultados tabelados da estimativa de fatalidades nos cenários simulados	144

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA - Agência Nacional de Águas
ANM - Agência Nacional de Mineração
BC Hydro - *British Columbia Hydro*
BCDVM - Capacidade de resistir a danos contínuos
BDVCA - DV crítico inicial para destruir o edifício
BDVC - DV crítico atualizado para destruir o edifício
BSS - Estado estrutural inicial
BSSC - Estado estrutural crítico
CEMADEN - Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CRED - *Centre for Research on The Epidemiology of Disaster*
DEFRA - *Department for Environment, Food e Rural Affairs*
DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral
DV - Profundidade × Velocidade
ECAM - *Economic Consequences Assessment Model*
ECP - Estado de Calamidade Pública
EIRD - Estratégia Internacional para a Redução de Desastres
EMA - Agência de Gestão de Emergências
EM-DAT - *Emergency Event Database*
FEMA - *Federal Emergency Management Agency*
GDRC - *Global Disaster Risk Coordination*
HAZUS - *Hazards-United States*
HEC-RAS - *Hydrologic Engineering Center's River Analysis System*
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*
IUETA - Tempo de evacuação do edifício
LSM - *Life Safety Model*
MDT - Modelo Digital de Terreno
NRCS - *Natural Resources Conservation Service*
ODLF - Função Generalizada de Perdas e Danos de Objetos
OSM - *OpenStreetMap*
PADM - Tomada de Decisão de Ações Protetivas
PAE - Plano de Ação Emergencial

PAI - Início de Ação de Proteção

PAEBM - Plano de Ação Emergencial para Barragens de Mineração

PAR - População em Risco

PARU - Unidade de População em Risco

PARG - Grupo de População em Risco

PCDVM - DV cumulativa que resulta em exaustão completa

PDEUA - Tempo de espera antes da evacuação

PDEVA - Tempo de espera antes da evacuação

PDVDCA - DV crítico da pessoa que se está a afogar

PDVTCA - DV crítico para a pessoa tombar

PHSDA - Profundidade máxima de segurança

PLTDA - Profundidade de queda mais baixa

PNSB - Política Nacional de Segurança de Barragens

PNPDEC - Política Nacional de Proteção e Defesa Civil

PPC - Condição física inicial

PPCC - Condição física crítica

PSA - Velocidade de fuga a pé

RCEM - *Reclamation's Consequence Estimating Methodology*

RBCDVM - Fator de redução do multiplicador crítico de DV do edifício

SE - Situação de Emergência

SMAHR - Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

TFAF - Tempo até o primeiro alerta

UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais

UHE - Usina Hidrelétrica

UNDRO - *United Nations Disaster Relief Coordinator*

UNDRR - *United Nations Office for Disaster Risk Reduction*

USACE - *United States Army Corps of Engineers*

VDVFC - DV crítico para veículo flutuante

VDVTC - DV crítico para o veículo tombar

VEVT - Tempo de evacuação do veículo

VSDC - Critérios de Profundidade de Segurança do Veículo

WISE - *World Information Service on Energy*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Justificativa	25
1.2	Objetivos	26
1.3	Resumo metodológico	26
1.4	Organização da dissertação	28
2	ESTADO DA ARTE	30
2.1	Gestão de riscos de inundações	30
2.2	Modelagem hidrodinâmica	32
2.3	Modelo de perdas de vidas	33
2.3.1	LifeSim	36
2.3.2	<i>Life Safety Model</i> (LSM)	53
3	AVALIAÇÃO DOS MODELOS DE PERDAS DE VIDA LIFESIM E LSM EM ESTUDOS DE RUPTURA DE BARRAGENS A PARTIR DO ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM B-I DE BRUMADINHO/MG, BRASIL	69
3.1	Resumo.....	69
3.2	Introdução	70
3.3	Estudo de caso	71
3.4	Materiais e métodos.....	74
3.4.1	Descrição da área de estudo.....	74
3.4.2	Modelagem hidrodinâmica	76
3.4.3	Cenário de vulnerabilidade e exposição	81
3.4.4	Modelagem de perdas de vida	83
3.5	Resultados e discussão	93
3.5.1	Simulação hidrodinâmica do evento.....	93
3.5.2	Simulação e análise de perdas de vida	99
3.6	Conclusões	106
4	ESTUDO DE CASO DA INUNDAÇÃO OCORRIDA EM JULHO DE 2021 NO RIO AHR, NA ALEMANHA: COMO O APRIMORAMENTO DA GESTÃO DE RISCOS DE INUNDAÇÕES PODERIA REDUZIR O NÚMERO DE FATALIDADES	110
4.1	Resumo.....	110
4.2	Introdução	110
4.3	Estudo de caso	112
4.4	Materiais e métodos.....	118
4.4.1	Descrição da área de estudo.....	118
4.4.2	Modelagem hidrodinâmica	119
4.4.3	Cenário de vulnerabilidade e exposição	126

4.4.4	Modelagem de perdas de vida	129
4.5	Resultados e discussões	139
4.5.1	Simulação hidrodinâmica do evento.....	139
4.5.2	Simulação e análise de perdas de vida	144
4.6	Conclusões	153
5	CONCLUSÕES FINAIS.....	155
6	RECOMENDAÇÕES.....	158
	REFERÊNCIAS.....	160
	APÊNDICE A – Classificação das edificações de acordo com o LifeSim	170
	APÊNDICE B – Código para transformação dos arquivos shp. de vias, provenientes do OSM, para o formato do LSM.....	174

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Prandel (2019), um desastre é o resultado de eventos adversos, sejam eles naturais ou provocados pela ação humana, que afetam um ecossistema vulnerável. Esses eventos geram danos à vida humana, à infraestrutura e ao meio ambiente, resultando em prejuízos econômicos e sociais significativos.

O *Emergency Event Database* (EM-DAT) conduziu um levantamento sobre o número de desastres ocorridos no mundo em 2022, comparando-os à média do período de 2002 a 2021 (Figura 1.1). Os dados revelam que, em ambos os períodos analisados, as inundações foram responsáveis pelo maior número de ocorrências de desastres. Além disso, em 2022, o Brasil figurou entre os dez países mais afetados.

As inundações são classificadas como um dos diversos tipos de possíveis desastres, e definidas como o processo em que ocorre submersão de áreas fora dos limites normais de um curso d'água, em zonas que normalmente não se encontram submersas (CEMADEN, 2022).

Essas inundações podem ser divididas em duas categorias principais: naturais e tecnológicas. As inundações naturais ocorrem devido a fenômenos climáticos, como chuvas intensas, derretimento de neve ou tempestades, resultando em danos significativos à infraestrutura e à vida humana. Já as inundações tecnológicas são causadas por falhas em sistemas artificiais, como barragens ou tubulações, e podem resultar de vazamentos ou rupturas.

Alguns fatores têm contribuído para a potencialização do número e da gravidade das inundações no Brasil e no mundo, ao exemplo do dano ao meio ambiente, da ocupação de áreas de risco e do uso desordenado do solo, em conjunto com a maior ocorrência de eventos climáticos extremos, que têm levado ao aumento da vulnerabilidade da sociedade (DIAS *et al.*, 2015).

Em 2022, o mundo foi afetado por numerosas inundações que causaram perdas de vidas e danos econômicos em diferentes países. As inundações no Paquistão de junho a setembro afetaram 33 milhões de pessoas, causando 1.739 mortes e danos econômicos avaliados em US\$15 bilhões. As inundações de monções também

atingiram a Índia (2.035 mortes e US\$4,2 bilhões em prejuízos), Bangladesh (7,2 milhões de pessoas afetadas) e China (US\$5 bilhões em prejuízos). Na Nigéria, inundações causaram 603 mortes e resultaram em um custo econômico de US\$4,2 bilhões, enquanto 544 vidas foram perdidas nas inundações na África do Sul. As cheias no Brasil em fevereiro mataram 272 pessoas, e as inundações no leste da Austrália em fevereiro e março custaram US\$6,6 bilhões (CRED, 2023).

Figura 1.1: Número de desastres ocorridos no mundo em 2022 em comparação com a média do período de 2002 a 2021.



Fonte: Adaptado de CRED (2023).

No contexto nacional, a ocorrência de inundações é igualmente preocupante. De um total de 5.570 municípios brasileiros, cerca de 49,6% (2.765) decretaram Situação de Emergência (SE) ou Estado de Calamidade Pública (ECP) devido a cheias pelo menos uma vez no período de 2003 a 2021. Aproximadamente 88% (2.428) desses

municípios estão localizados nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste. Em 2021, mais de um milhão de pessoas foram impactadas por inundações. O dano econômico mais evidente causado é a perda das residências, deixando um número grande de pessoas desalojadas ou desabrigadas. As mortes, desaparecimentos, doenças e ferimentos afetaram 6% dessas pessoas (ANA, 2022).

Recentemente, o estado do Rio Grande do Sul foi atingido por fortes chuvas entre o final de abril e o início de maio de 2024, evento classificado pelo governo gaúcho como “a maior catástrofe climática da história” (BIERNATH *et al.*, 2024). Entre 27 de abril e 2 de maio, várias cidades registraram precipitações entre 500 e 700 mm, o que representa um terço da média histórica anual, enquanto outras localidades tiveram entre 300 e 400 mm de chuva (SIAS, 2024). Essas chuvas intensas afetaram mais de 60% do território do estado (ZARAMELA, 2024).

Em 27 de maio de 2024, a atualização do balanço do evento ocorrido no Rio Grande do Sul, publicada pela Defesa Civil do Rio Grande do Sul, relatou que, dos 497 municípios do estado, 469 foram afetados. O total de pessoas impactadas foi de 2,35 milhões, com 581.638 desalojados, 55.813 em abrigos, 77.712 resgatados, 12.521 animais resgatados, 806 feridos, 56 desaparecidos e 169 mortos (DEFESA CIVIL DO RIO GRANDE DO SUL, 2024).

Além das inundações naturais, algumas das últimas inundações graves no Brasil tiveram origem em rompimentos de barragens de mineração, como ocorrido nas barragens Fundão, em Mariana, e B-I, em Brumadinho. Entre 1960 e 2023, foram registrados 11 acidentes envolvendo barragens no Brasil, resultando em uma estimativa de 288 mortes e 9 pessoas desaparecidas (WISE, 2023). É importante ressaltar que os dados apresentados por Wise (2023) referentes à Barragem B-I, que apontam 267 mortes e 3 desaparecidos, são datados de dezembro de 2022. No entanto, o governo de Minas Gerais publicou uma atualização desses números em maio de 2024, contabilizando 272 mortes decorrentes da ruptura da estrutura (MINAS GERAIS, 2024). Adicionalmente, é importante observar que na Tabela 1.1 os dados fornecidos por Wise (2023) não incluem números de pessoas mortas ou desaparecidas nos eventos em que essas informações não foram registradas, indicando que não houve vítimas nessas situações.

Tabela 1.1: Eventos de rupturas de barragens de rejeitos de mineração no Brasil desde 1960 até 2023

Data	Nome da Estrutura	Empresa	Localização	Mortes	Desaparecidos
08/01/2022	Dique Lisa	Vallourec	Mina de Pau Branco, Nova Lima, Minas Gerais	-	-
01/10/2019	Barragem TB01	VM Mineração	Nossa Senhora do Livramento, Mato Grosso	-	-
29/03/2019	-	Metalmig	Machadinho d'Oeste, Oriente Novo, Rondônia	-	-
25/01/2019	Barragem I (B-I)	Vale S.A.	Mina do Córrego de Feijão, Brumadinho, Região Metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais	267	3
17/02/2018	-	Hydro Alunorte / Norsk Hydro ASA	Barcarena, Pará	-	-
05/11/2015	Barragem do Fundão	Samarco	Mina de Germano, Bento Rodrigues, distrito de Mariana, Região Central, Minas Gerais	17	2
10/09/2014	-	Herculano Mineração	Mina de Herculano, Itabirito, Região Central, Minas Gerais	2	1
27/04/2009	-	Hydro Alunorte / Norsk Hydro ASA	Barcarena, Pará	-	-
10/01/2007	-	Mineração Rio Pomba Cataguases	Miraí, Minas Gerais	-	-
22/06/2001	-	Mineração Rio Verde	Sebastião das Águas Claras, distrito de Nova Lima, Minas Gerais	2	3
mai/86	-	Itaminos Comércio de Minerios	Mina de Fernandinho, Itabirito, Minas Gerais	-	-

Fonte: Adaptado de Wise (2023).

Objetivando a redução dos impactos negativos das inundações sobre a saúde humana, o meio ambiente, o patrimônio cultural e a atividade econômica, o Marco de Ação de Hyogo 2005-2015 (EIRD, 2019) representa o principal dispositivo da estratégia internacional para a redução dos desastres das Nações Unidas. Este marco foi sucedido pelo Marco de Sendai para a Redução do Risco de Desastres 2015-2030, que dá continuidade e aprimora as diretrizes estabelecidas anteriormente.

O Marco de Sendai enfatiza a importância de uma abordagem mais integrada e inclusiva, promovendo a resiliência das comunidades e a redução dos riscos de desastres de forma mais abrangente. Ele estabelece quatro prioridades de ação: entender o risco de desastres, fortalecer a governança para a redução do risco, investir na resiliência e melhorar a preparação para desastres.

Juntamente com a Diretiva 2007/60/CE da União Europeia, esses marcos fornecem um *framework* robusto para a avaliação e gestão dos riscos de inundação, promovendo uma resposta mais eficaz e sustentável a esses eventos.

No Brasil, a gestão de risco de inundação evoluiu significativamente, impulsionada pelos desastres catastróficos decorrentes de eventos climáticos extremos observados nos últimos anos. Essas ocorrências destacaram a necessidade de inovar a legislação, estabelecendo ações, diretrizes e competências de cada esfera governamental para uma gestão eficaz.

Destaca-se nesse âmbito a criação do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN, em 2011, cuja função é desenvolver, testar e implementar um sistema integrado de previsão e monitoramento de desastres naturais em regiões de risco. Esse sistema contribui para a prevenção, identificação de vulnerabilidades no uso e ocupação do solo, além do planejamento urbano e de infraestrutura adequado (DIAS *et al.*, 2015).

No campo legal nacional, a Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012, estabelece a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC) e abrange uma ampla gama de medidas destinadas a prevenir, mitigar, preparar, responder e recuperar áreas afetadas por desastres, tanto naturais quanto induzidos pela ação humana, ao exemplo de inundações e rupturas de barragens (BRASIL, 2012).

Algumas das diretrizes do PNPDEC são: adoção da bacia hidrográfica como unidade de análise das ações de prevenção de desastres relacionados a corpos de água; planejamento com base em pesquisas e estudos sobre áreas de risco e incidência de desastres no território nacional; e participação da sociedade civil.

No que diz respeito aos objetivos, o PNPDEC busca reduzir os riscos de desastres; estimular o desenvolvimento de cidades resilientes e os processos sustentáveis da urbanização; monitorar os eventos meteorológicos, hidrológicos, e outros potencialmente causadores de desastres; produzir alertas antecipados em razão de possibilidade de ocorrência de desastres; desenvolver consciência nacional acerca dos riscos de desastre; e orientar as comunidades a adotar comportamentos

adequados de prevenção e de resposta em situação de desastre e promover a autoproteção.

A Lei mais recente, nº 14.750, foi estabelecida em 12 de dezembro de 2023 (BRASIL, 2023) e alterou as Leis nºs 12.608, de 10 de abril de 2012 (BRASIL, 2012), e 12.340, de 1º de dezembro de 2010 (BRASIL, 2010a), para aprimorar os instrumentos de prevenção de acidentes ou desastres e de recuperação de áreas por eles atingidas, as ações de monitoramento de riscos de acidentes ou desastres e a produção de alertas antecipados.

Em 2010, foi promulgada no Brasil a Lei nº 12.334 (BRASIL, 2010b) que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais. Com isso, o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) assumiu a atribuição de fiscalizar a implementação dos Planos de Segurança das barragens de mineração a serem elaborados pelos empreendedores, conforme previsto na referida Lei, e de classificar as estruturas, além de fiscalizar a pesquisa e a lavra para o aproveitamento mineral, bem como as estruturas decorrentes dessas atividades.

Posteriormente, foram promulgadas as Portarias DNPM nº 416/2012 (ANM, 2012a), nº 526/2012 (ANM, 2012b) e nº 14/2016 (ANM, 2016), que regulam e determinam as responsabilidades dos empreendedores que possuem barragens de rejeitos e, muito em função da ruptura da barragem de Fundão, em Mariana, foi promulgada, em 17 de maio de 2017, a Portaria nº 70.389 (ANM, 2017), que une em uma só portaria os princípios dos antigos regulamentos, além de reforçar quesitos mínimos necessários para garantia de segurança.

Em 26 de dezembro de 2017, pela Lei nº 13.575 (BRASIL, 2017), foi criada a Agência Nacional de Mineração (ANM), extinguindo assim o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Em 11 de maio de 2020, foi promulgada a Portaria ANM nº 32 (ANM, 2020), a qual altera a Portaria DNPM nº 70.389/2017 e dá outras providências. Atualmente, a Portaria em vigor é a nº 95 de 07 de fevereiro de 2022 (ANM, 2022), que além de compilar todas as resoluções anteriores e substituir a portaria DNMP 70389/2017, traz diversas alterações. Recentemente, a Portaria nº 95

foi alterada pela Portaria nº 130 de 24 de fevereiro de 2023 (ANM, 2023). Os atos normativos vigentes que dispõem sobre segurança de barragens de mineração estabelecem, dentre outros aspectos, as diretrizes para o desenvolvimento do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração – PAEBM.

O PAEBM consiste em uma importante ferramenta, por meio da qual são identificados e compilados, em um único documento, os procedimentos e ações que devem ser implementados para mitigar riscos e responder com eficiência às situações de emergência que possam comprometer a segurança da barragem e de sua área de influência.

A necessidade de se realizar o PAEBM para uma determinada estrutura depende de sua classificação. Além disso, a política agora inclui a avaliação das vulnerabilidades sociais entre as populações afetadas e o desenvolvimento de um sistema de alerta mais robusto, abrangendo elementos como o planejamento de rotas de evacuação e a criação de pontos de encontro, complementados por sinalização correspondente.

Considerando o arcabouço legal e as políticas existentes no Brasil, é notória a importância dada à delimitação das áreas em risco, antecipação de alertas e desenvolvimento da consciência populacional acerca dos riscos. Neste contexto, uma formulação mais eficiente das políticas, à luz das obrigações estabelecidas e da implementação de medidas de mitigação de riscos, pode ser alcançada por meio de uma análise prospectiva de impactos, utilizando modelos de evacuação e avaliações de potenciais perdas de vida. Esses modelos, denominados modelos de perdas de vida, facilitam a correlação das características da inundação com a exposição e vulnerabilidade da população e dos ativos afetados.

O presente estudo busca, portanto, explorar modelos de perdas de vida e avaliar como eles podem ser úteis no complemento das diretrizes legais, tendo em vista a capacidade de oferecer uma abordagem detalhada e dinâmica para a análise de riscos, ao simular o comportamento de indivíduos e grupos durante eventos de inundação, permitindo a identificação de padrões de evacuação e resposta a emergências. Com isso, tem-se a expectativa de: aprimorar o planejamento de rotas de evacuação; criar pontos de encontro e implementar sistemas de alerta mais

eficazes, integrando as vulnerabilidades sociais das populações afetadas nas estratégias de gestão de riscos.

Importante destacar que fatores como a condição socioeconômica, o acesso à informação e a infraestrutura disponível nas comunidades, podem influenciar significativamente na capacidade de resposta das populações em situações de crise. Ao integrar essas vulnerabilidades sociais nas estratégias de gestão de riscos, promove-se uma abordagem mais equitativa e inclusiva, garantindo que as necessidades e capacidades de todos os grupos, especialmente os mais vulneráveis, sejam levadas em conta. Isso não apenas fortalece a resiliência das comunidades, mas também contribui para a construção de um ambiente mais seguro e preparado para enfrentar desastres.

1.1 Justificativa

Os desastres causados por inundações têm se tornado cada vez mais frequentes e devastadores, tanto no Brasil quanto no mundo. Segundo Jonkman *et al.* (2008), os modelos de perdas de vidas, como o LifeSim e o *Life Safety Model* (LSM), baseados em agentes, podem ser utilizados para identificar as possíveis consequências das inundações, e os resultados podem ser empregados para avaliar os riscos e desenvolver estratégias de mitigação. Estudos recentes na literatura demonstram a eficácia desses modelos; no entanto, são raros aqueles que se baseiam em validações de eventos reais (SILVA; ELEUTÉRIO, 2019).

Dentro do Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG (SMAHR), alguns aspectos associados a modelos de perdas de vida, especialmente os modelos LifeSim e RCEM (*Reclamation's Consequence Estimating Methodology*), foram explorados para avaliar sua aplicabilidade em rupturas de barragens de rejeito (SILVA, 2020).

Este estudo busca contribuir ao comparar e avaliar a aplicabilidade de dois modelos de perdas de vidas baseados em agentes, o LifeSim e o LSM, em cenários de ruptura hipotética de barragem e inundações naturais. Além disso, pretende-se avaliar o desempenho desses modelos na simulação da eficiência de sistemas de alerta e

evacuação para reduzir fatalidades, com o intuito de colaborar no aprimoramento das políticas de mitigação de desastres e na formulação de estratégias mais eficazes.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o desempenho de dois modelos de perdas de vida, baseados em agentes, para simular a ocorrência de fatalidades e a eficiência de sistemas de alerta e evacuação em reduzir fatalidades associadas a inundações naturais e tecnológicas.

Os objetivos específicos são:

- Avaliar o desempenho dos modelos LifeSim e LSM em um estudo de caso de rompimento de barragem, identificando suas capacidades de previsão e suas limitações em situações de desastre tecnológico; e
- Avaliar o desempenho do modelo LifeSim em um estudo de caso de inundação natural, analisando sua precisão na simulação de eventos reais e sua capacidade de realizar a estimativa de perdas de vidas e de avaliar a eficiência de sistemas de alerta e evacuação.

1.3 Resumo metodológico

Para a comparação da análise de performance e validação dos modelos LifeSim e LSM, foram selecionados estudos de caso de acidentes reais amplamente documentados na literatura. Para atender ao primeiro objetivo específico, optou-se por analisar o estudo de caso da ruptura da Barragem B-I de Brumadinho, ocorrida em 2019, que resultou em 272 mortes, comparando os resultados com o evento real e com os achados de estudos já desenvolvidos na área (MELO, 2022; GIBSON *et al.* 2021; MARTÍNEZ-ARANDA *et al.*, 2022; LUMBROSO *et al.*, 2021; LIGIER, 2020).

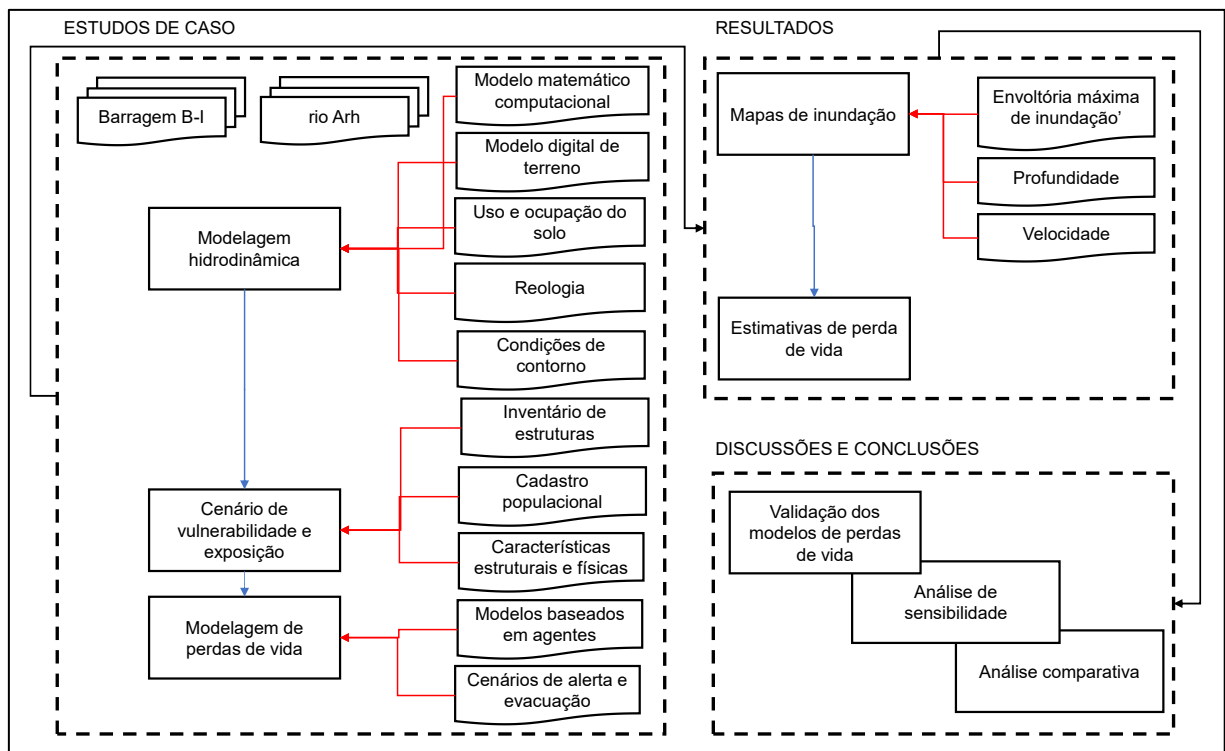
Em relação às inundações naturais, foi escolhido o estudo de caso do desastre ocorrido em Ahr, no oeste da Alemanha, em 2021, que resultou em 134 fatalidades (APEL *et al.*, 2022; THIEKEN *et al.* 2023), seguindo a mesma lógica de análise utilizada no estudo de caso anterior.

A metodologia adotada para cada estudo de caso consistiu em cinco etapas principais, descritas detalhadamente a seguir e apresentadas na Figura 1.2:

- Coleta de dados: Reunir dados detalhados sobre os eventos de inundação, incluindo informações geográficas, geomorfológicas, hidrológicas, sociais e de infraestrutura. Esses dados foram obtidos de diversas fontes, incluindo publicações científicas;
- Configuração do modelo hidrodinâmico: Preparar o modelo HEC-RAS, ajustando seus parâmetros de entrada com base nos dados coletados. Esta etapa envolve a validação inicial dos modelos para garantir sua precisão e confiabilidade;
- Cenário de vulnerabilidade e exposição: Determinar o número de pessoas e estruturas em risco e suas características (estruturais e físicas) com base nas informações coletadas, bem como estabelecer a configuração do sistema viário e locais seguros;
- Configuração dos modelos de perdas de vida: Preparar os modelos LifeSim e LSM, ajustando seus parâmetros de entrada com base no cenário de vulnerabilidade e exposição e na modelagem hidrodinâmica desenvolvida;
- Simulação dos eventos: Executar as simulações dos eventos de inundação utilizando ambos os modelos de perdas de vida. As simulações foram realizadas para replicar as condições dos eventos reais, permitindo a comparação direta dos resultados com os dados observados e de estudos anteriores;
- Validação dos modelos: Avaliar o desempenho dos modelos LifeSim e LSM e validá-los a partir da interpretação dos resultados, da identificação de discrepâncias, e da comparação com dados reais e de estudos anteriores;
- Análise de sensibilidade: Avaliar como os parâmetros dos modelos influenciam no número de fatalidades, e se os modelos são capazes de “medir” a eficiência de sistemas de alerta e evacuação em reduzir fatalidades associadas a inundações naturais e tecnológicas; e
- Análise comparativa: Avaliar e comparar os resultados dos modelos LifeSim e LSM em termos de precisão, confiabilidade e capacidade de replicar as condições dos eventos reais; identificar as principais diferenças nos resultados

gerados por cada modelo e entender as razões dessas diferenças; analisar os métodos utilizados por cada modelo para calcular as perdas de vida, destacando os pontos fortes e fracos de cada abordagem; e propor melhorias nos modelos com base nas conclusões da análise comparativa, visando aumentar a precisão e a eficácia na previsão de perdas de vida em futuros eventos de inundação.

Figura 1.2: Metodologia abordada de cada etapa e sua relação com as demais.



Fonte: autoria própria.

1.4 Organização da dissertação

Na presente dissertação, optou-se por uma estrutura organizada em cinco capítulos, cada um desempenhando um papel importante na construção e entendimento do trabalho. A introdução geral, apresentada neste capítulo inicial, visa situar o contexto da pesquisa, delineando os objetivos, a relevância e a justificativa do estudo, além de conter um resumo metodológico para o desenvolvimento do trabalho.

O Capítulo 2 é dedicado à apresentação do estado da arte referente ao tema abordado. Neste capítulo, são revisadas as principais teorias, estudos e pesquisas anteriores que formam a base do conhecimento atual sobre o assunto. A revisão da literatura inclui uma análise crítica das abordagens existentes, identificando lacunas e

oportunidades para novas investigações e estabelecendo um panorama detalhado que justifica a condução deste trabalho.

No Capítulo 3, o foco recai sobre o desenvolvimento metodológico e a apresentação dos resultados do primeiro objetivo específico, que trata da ruptura da Barragem B-I. Este capítulo detalha os métodos e técnicas utilizados para a coleta e análise dos dados, descrevendo os procedimentos, as ferramentas e modelos aplicados. Os resultados obtidos são discutidos à luz da literatura revisada, evidenciando as contribuições e as implicações dos achados para o campo de estudo.

O Capítulo 4 expande a discussão metodológica e de resultados, abordando o segundo objetivo específico, que envolve a inundação pelo rio Ahr na Alemanha. Similarmente ao capítulo anterior, são apresentados os métodos empregados, as estratégias de análise adotadas e os resultados alcançados. Este capítulo não apenas relata os dados, mas também oferece uma interpretação aprofundada deles, relacionando-os com o contexto mais amplo da pesquisa e destacando a relevância dos resultados obtidos.

O Capítulo 5 é dedicado à discussão dos resultados gerais, à consolidação do objetivo geral e à conclusão do trabalho. Nesta seção, os principais achados de cada capítulo são sintetizados e integrados, proporcionando uma visão abrangente do estudo como um todo. Além disso, são discutidas as implicações teóricas e práticas dos resultados, as limitações do estudo e são apresentadas sugestões para pesquisas futuras. A conclusão reforça a contribuição do trabalho para a área de conhecimento, destacando as inovações e avanços proporcionados pela pesquisa.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta recomendações baseadas nos resultados da pesquisa. Este capítulo fornece orientações práticas e estratégicas para profissionais da área, formuladores de políticas públicas e outros *stakeholders*, a fim de mitigar problemas semelhantes no futuro e melhorar a gestão de riscos associados a rupturas de barragens e inundações naturais.

Esta organização estrutural visa garantir uma leitura fluida e compreensiva, permitindo o acompanhamento de forma lógica e sequencial o desenvolvimento da pesquisa,

desde a contextualização inicial até as considerações finais e as recomendações práticas.

2 ESTADO DA ARTE

Este capítulo proporciona o contexto essencial e apresenta uma visão abrangente dos artigos e modelos fundamentais que constituem a base desta dissertação. Inicialmente, são explorados aspectos relacionados à gestão de riscos de inundações; em seguida, após apresentar elementos associados à modelagem hidrodinâmica, a estimativa de perdas de vidas é enfatizada, oferecendo uma descrição abrangente e especificações detalhadas dos modelos utilizados neste estudo: o *Life Safety Model* (LSM), da BC Hydro (JOHNSTONE *et al.*, 2005), e o LifeSim (ABOELATA; BOWLES, 2005).

2.1 Gestão de riscos de inundações

O gerenciamento de riscos de inundações visa reduzir os danos causados através da diminuição da exposição, ameaça e vulnerabilidade (GRACIOSA, 2010). De acordo com o *Office of the United Nations Disaster Relief Coordinator* (UNDRO, 1979), a probabilidade de um fenômeno potencialmente danoso ocorrer em um local específico durante um certo período é denominada ameaça (ou perigo).

A susceptibilidade a inundações de uma área está relacionada tanto à predisposição natural do meio físico quanto às práticas de uso e ocupação do solo. A vulnerabilidade, por sua vez, refere-se ao fator intrínseco de um indivíduo, objeto ou sistema que está exposto a uma ameaça. A exposição diz respeito à situação das pessoas, infraestrutura, habitação, capacidades de produção e outros bens humanos tangíveis localizados em áreas propensas a perigos.

Finalmente, o risco resulta da combinação da probabilidade de ocorrência de danos ou prejuízos sociais, ambientais e/ou econômicos durante um determinado tempo de exposição, sendo uma função do perigo e do dano associado a ele.

Segundo a *United Nations Office for Disaster Risk Reduction* (UNDRR, 2017), o gerenciamento de risco envolve estratégias e políticas que visam a prevenção de novos riscos, a mitigação de riscos existentes e o gerenciamento de riscos residuais.

Esse gerenciamento é essencial para fortalecer a resiliência e diminuir as perdas decorrentes de desastres, sendo classificado em prospectivo, corretivo e compensatório:

- **Gerenciamento de risco de desastres prospectivo:** busca prevenir o surgimento de novos riscos de desastres, e focam em lidar com os riscos de desastres que podem se desenvolver no futuro se políticas de redução de risco de desastres não forem implementadas. Exemplos dessas políticas são o melhor planejamento do uso do solo ou sistemas de abastecimento de água resistentes a desastres.
- **Gerenciamento de risco de desastres corretivo:** foca em riscos já existentes, procurando sua eliminação ou redução, por exemplo, através da reestruturação de infraestruturas críticas ou realocação de populações expostas; e
- **Gerenciamento de risco de desastres compensatório:** aumenta a resiliência econômica e social frente aos riscos residuais, incorporando atividades como preparação, resposta e recuperação, e usando instrumentos financeiros como seguros, resseguros e fundos de contingência.

Neste contexto, mais especificamente relacionado ao gerenciamento de risco de desastres prospectivo, as avaliações de danos causados por desastres fornecem informações de muita relevância para o suporte à decisão e desenvolvimento de políticas nas áreas de gestão de desastres e planejamento de adaptação às mudanças climáticas (MERZ *et al.*, 2010).

Isso posto, as modelagens hidrodinâmicas e de perdas de vida possibilitam a avaliação detalhada e abrangente de dados de desastres associados a inundações, proporcionando uma melhor compreensão dos eventos e suas consequências. A modelagem hidrodinâmica permite a simulação de eventos de inundação, considerando parâmetros como o fluxo de água, a velocidade e a profundidade em diferentes pontos do curso d'água.

Já a modelagem de perdas de vida estima o número potencial de vítimas em um evento de inundação, levando em conta variáveis como densidade populacional, velocidade de resposta e características do evento.

Esses dois tipos de modelos são complementares e, juntos, oferecem uma visão abrangente dos riscos e impactos das inundações. A seguir, estão descritas as contribuições específicas de cada tipo de modelagem, destacando-se os modelos de perdas de vida.

2.2 Modelagem hidrodinâmica

As modelagens de propagação de onda de cheia associadas à ruptura de uma barragem ou a uma inundação natural são extremamente úteis para a classificação do perigo, planejamento de ações de emergência, mapeamento e avaliação do risco (GRAHAM, 1998).

Essas modelagens simulam a hidrodinâmica dos eventos de cheia, que podem ser reais ou preditivos, e caracterizam o escoamento em trânsito a partir de variáveis como a profundidade e a velocidade, as quais podem ser avaliadas ao longo do tempo de um dado evento. Além disso, fornecem informações referentes às envoltórias máximas de inundação, que ilustram os limites máximos territoriais atingidos em termos de área, e à severidade com que essas regiões são afetadas pelas inundações.

A representação bidimensional (2D) dos modelos hidrodinâmicos refere-se ao estudo do comportamento e das características de fluidos em movimento dentro de um contexto de duas dimensões, considerando variações temporais. Esse tipo de fluxo é modelado frequentemente para entender e prever fenômenos como inundações e movimentação de rios, nos quais as mudanças no movimento e nas características do fluido ocorrem ao longo do tempo, e são analisadas no plano horizontal.

A abordagem em 2D é particularmente útil quando a variação vertical do fluxo é muito menor em comparação às dimensões horizontais, permitindo assim simplificações nas equações de movimento. Isso envolve, habitualmente, a utilização de modelos que se valem das equações de águas rasas, que são simplificações das equações de Navier-

Stokes, ou equações de Saint-Venant. Esses modelos são importantes para simulações computacionais em hidrologia e engenharia civil, oferecendo uma forma eficiente de calcular as respostas dos fluidos a intervenções ambientais e humanas.

Os modelos resolvem as equações supracitadas por métodos numéricos que empregam, em geral, uma combinação de métodos de diferenças finitas e volumes finitos em uma malha poligonal não estruturada (USACE, 2002). Alguns dos *softwares* mais utilizados para modelagem hidrodinâmica 2D e encontrados na literatura são o HEC-RAS (USACE), o FLO 2D, o MIKE-21 (DHI - *Danish Hydraulic Institute*), o TELEMAC-2D (TELEMAC-MASCARET) e o DELFT-3D (DELTARES). Dentre eles, o HEC-RAS foi o utilizado no presente estudo, o qual é capaz de simular uma gama de escoamentos hiperconcentrados, desde escoamentos não *newtonianos* de lama e detritos até movimentos de materiais granulares.

2.3 Modelo de perdas de vidas

Uma das consequências mais graves dos desastres de inundação é a perda de vidas humanas. Na última década, houve um avanço significativo no campo da estimativa de perdas de vida, com vários grupos desenvolvendo modelos para melhor caracterizar esses eventos. Os modelos de estimativa de perdas de vida são fundamentais para apoiar decisões políticas e de engenharia relacionadas ao risco de inundação, além de fornecer informações importantes para planejadores e gerentes de emergência, permitindo a melhoria e otimização de estratégias de mitigação (JONKMAN *et al.*, 2016).

A quantificação prospectiva das perdas diretas de vidas a partir de modelos considera três fatores principais: o número de pessoas potencialmente em risco, a eficácia das estratégias de evacuação e abrigo, e a taxa de mortalidade, que representa a proporção de pessoas que não sobrevivem em relação ao número total de expostos à inundação (JONKMAN, 2007).

Os modelos de perdas de vida podem ser baseados em análises de casos históricos com abordagens empíricas, que apresentam limitações (MCCLELLAND e BOWLES, 2002), ou em abordagens baseadas em agentes (*agent-based*), mais robustas e que

permitem uma quantificação variada ao longo do tempo das características do evento, correlacionando-as com critérios e limites de exposição a inundações (SILVA, 2020).

Estes últimos possibilitam o desenvolvimento de conhecimento prévio sobre áreas e populações mais vulneráveis, permitindo que sistemas de alerta sejam mais eficazes e evidenciando a necessidade de melhorias na infraestrutura e na implementação de medidas de contenção (EL BILALI *et al.*, 2021).

Para avaliar as perdas de vida relacionadas aos desastres causados por inundações, vários modelos e abordagens têm sido propostos e desenvolvidos por pesquisadores ao longo de décadas (SILVA e ELEUTÉRIO, 2019). Dentre eles, estão o método do *Department for Environment, Food e Rural Affairs* do Reino Unido (DEFRA, 2003); o método USBOR ou "Graham" (GRAHAM, 1999); o *Life Safety Model* (LSM), da BC Hydro (JOHNSTONE *et al.*, 2005); o *Hazards-United States* (HAZUS), da *Federal Emergency Management Agency* dos Estados Unidos (FEMA, 1999; JOYCE e SCOTT, 2005); o LifeSim (ABOELATA e BOWLES, 2005); e o método TU Delft (ASSELMAN e JONKMAN, 2003).

Alguns exemplos de aplicação, que abordam métodos distintos para a estimativa de perda de vida devido a inundações, podem ser encontrados na literatura. Gouldby *et al.* (2010) desenvolveram um modelo de análise de risco que incorpora um novo modelo de inundação baseado em tempo, melhorando a representação dos processos físicos na simulação de inundações. O modelo foi combinado com um método simplificado para estimar a perda de vida, utilizando estimativas de profundidade máxima e velocidades de inundação, fatores críticos nas fatalidades relacionadas a inundações.

Wang *et al.* (2017) introduziram um modelo integrado para a estimativa de perda de vida em regiões montanhosas do sudoeste da China, onde há escassez de informações. O modelo inclui um módulo de informações básicas, um modelo de simulação de propagação de inundações e um modelo de estimativa de perdas. Utilizando tecnologias de sensoriamento remoto (RS), sistema de informação geográfica (GIS) e sistema de posicionamento global (GPS), os autores demonstraram a aplicação prática do modelo na hidrelétrica de Lianghekou.

Li *et al.* (2019) desenvolveram um modelo de avaliação de risco de perda de vida baseado na teoria dos Conjuntos Fuzzy Variáveis, aplicado a oito barragens colapsadas na China. O modelo considera fatores de perigo, exposição e vulnerabilidade, e seus resultados mostraram consistência com a mortalidade real observada, sugerindo que o modelo pode ser eficaz na alocação de recursos para reforço de barragens e na gestão de risco de perda de vida em eventos de ruptura de barragens.

Lumbroso *et al.* (2021) modelaram o desastre da barragem de rejeitos B-I de Brumadinho com o uso dos *softwares* MIKE21 e LSM, com o intuito de representar o evento real e de avaliar se o número de mortes poderia ter sido reduzido caso houvesse sido emitido um alerta.

Norkhairi *et al.* (2022) investigaram o impacto dos sistemas de alerta precoce e do tempo de resposta da população na taxa de fatalidade em eventos de rompimento de barragens na Malásia. Utilizando o *Life Safety Model* (LSM) para simular a resposta de pessoas, veículos e edifícios à inundação hidráulica 2D, os autores demonstraram que os sistemas de alerta precoce e a prontidão da comunidade para evacuar são cruciais para reduzir o número de fatalidades.

Maranzoni, D'Oria e Rizzo (2024) propuseram um modelo probabilístico para a estimativa de perda de vida devido a inundações por rompimento de barragens. Esse modelo considera as incertezas nos componentes de risco (perigo, exposição e vulnerabilidade) e utiliza mapas dasimétricos para representar a população em risco em diferentes cenários socioeconômicos. A aplicação do modelo à hipotética ruptura da barragem de Mignano, na Itália, resultou em mapas probabilísticos de danos, destacando a distribuição espacial do risco de perda de vida e suas incertezas associadas.

Além das aplicações supracitadas, pode-se encontrar na literatura a proposição de outros modelos, como o de Brazdova e Riha (2014), associado a inundações fluviais e que foi avaliado com base no risco de inundação para a localidade de Krnov, na República Checa; ou o indicado por Priest *et al.* (2007), desenvolvido com base em dados sobre eventos de inundação em 25 locais de seis países europeus, e nos dados de um estudo de caso adicional no Reino Unido.

Portanto, a avaliação do desempenho de modelos de perdas de vida baseados em agentes para simular a ocorrência de fatalidades e a eficiência de sistemas de alerta e evacuação na redução de fatalidades associadas a inundações naturais e tecnológicas, utilizando estudos de caso como os eventos em Ahr, Alemanha, e Brumadinho, Brasil, tem como objetivo contribuir para o avanço do conhecimento e a melhoria das práticas de gestão de risco e resposta a desastres associados a inundações.

2.3.1 LifeSim

A seguir, o modelo LifeSim é detalhado pela apresentação de informações existentes em USACE (2018).

O *software* de estimativa de perda de vida *Life Loss Estimation* (LifeSim) foi desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica (HEC) do Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (USACE). Trata-se de um sistema de modelagem de simulação dinâmica distribuído espacialmente para estimar a perda potencial de vidas e danos econômicos causados por inundações e outras emergências hidrológicas. O seu principal objetivo é ajudar as equipes de estudo a compreender melhor as consequências de uma inundação, além de gerir os riscos para o público que depende dessas estruturas para mantê-los razoavelmente protegidos contra inundações.

Através da análise de risco de vida o *software* permite avaliar quantitativamente o risco de perda de vida em diferentes cenários de inundação e eventos hidrológicos, fornecendo informações críticas para suporte à tomada de decisões relacionadas à gestão de riscos de inundação, bem como para implementação de medidas de mitigação e desenvolvimento de planos de resposta a emergências e estratégias de evacuação, contribuindo assim para melhoria da segurança pública.

O LifeSim simula os resultados da exposição a eventos, como inundações e rupturas de estruturas, como barragens e diques. A exposição refere-se a pessoas e recursos expostos a esses eventos.

O componente chave da metodologia aplicada é que a magnitude da perda de vidas depende de as pessoas evacuarem com sucesso e, se aqueles que não conseguem

evacuar, conseguem encontrar abrigo adequado. Os fatores que influenciam a perda de vidas incluem: gravidade da inundação; localização da população em risco; resiliência estrutural; sistema de alerta; mobilização; sistema viário; resiliência veicular e humana; mobilidade humana; e disponibilidade para evacuar.

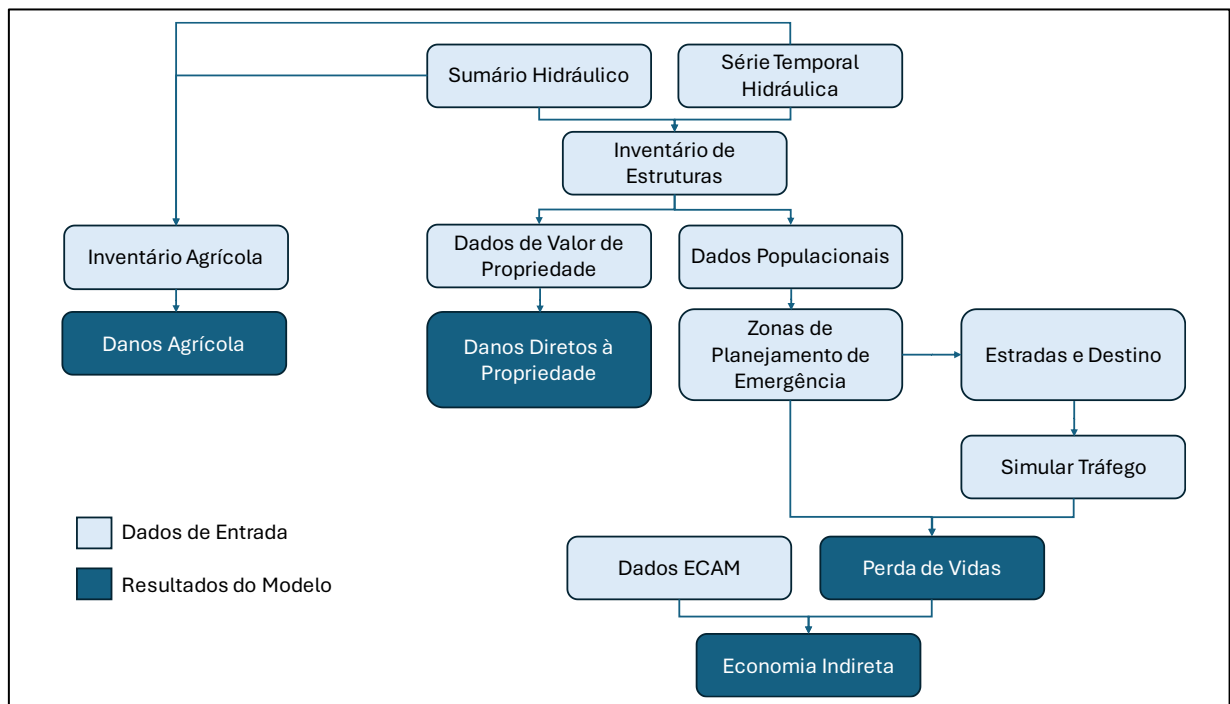
O LifeSim utiliza modelagem baseada em agente, onde um “agente” pode ser um veículo em evacuação ou um grupo de pedestres. O tamanho desse grupo é determinado conforme o tipo de ocupação, como, por exemplo, uma escola que pode simular um grupo de 30 pessoas em um ônibus escolar. Durante o processo de evacuação, os agentes interagem com as estradas, outros veículos e o perigo iminente. Após a simulação da emissão de alertas e da evacuação, o LifeSim calcula a letalidade para as pessoas expostas e os danos diretos causados pelo perigo.

Na sequência são listadas as informações gerais necessárias para construir um modelo representativo em qualquer cenário onde o risco é de ocorrência de inundações:

- Dados hidrológicos, dados hidráulicos e desempenho do sistema são necessários para definir o cenário de inundação a ser avaliado. Esses incluem informações sobre a magnitude e o momento das cheias, funções de desempenho dos diques ou barragens e informações sobre as inundações das planícies de inundação. Essas variáveis são combinadas em um modelo hidráulico e importadas como eventos hidráulicos;
- Tempo em que as consequências serão estimadas, como dia ou noite, dia útil ou fim de semana, e fora de temporada ou alta temporada para visitantes, bem como informações sobre o sistema de alerta de cheias para cada área ou subárea de estudo e a provável resposta do público aos avisos;
- Informação sobre taxas de mortalidade em função da profundidade e velocidade da água das cheias;
- Natureza rural ou urbana da área de estudo;
- Infraestrutura crítica em risco; e
- Fontes e magnitudes de incerteza.

A Figura 2.1 descreve as entradas gerais necessárias para configurar um modelo LifeSim e executar as operações especificadas. Informa-se que ECAM (*Economic Consequences Assessment Model*) denota Modelo de Avaliação de Consequências Económicas

Figura 2.1: Entradas e resultados gerais para um modelo LifeSim



Fonte: Adaptado de USACE (2018).

Os itens a seguir detalham o modelo e dão foco aos aspectos relacionados à estimativa de perdas de vida.

I. Métodos, etapas processuais e cálculos usados pelo LifeSim

Utilizando o método de Monte Carlo, o modelo realiza diversas simulações para gerar resultados potenciais. Com base nas informações sobre os perigos, a população em risco (PAR), as estruturas e a rede rodoviária, o modelo apresenta as seguintes capacidades:

- Estima as características hidráulicas;
- Amostra o momento em que um alerta é emitido para a população em cada Zona de Planejamento de Emergência (ZPE) em relação à ocorrência do perigo (por exemplo, inundação natural e rompimento de barragem ou dique);

- Separa a população em grupos de evacuação onde o tamanho do grupo é determinado pelo tipo de ocupação;
- Propaga o primeiro alerta para toda a população, e estima o tempo que a população de cada estrutura recebe o primeiro alerta;
- Determina quando cada grupo tomará medidas de proteção (se houver) uma vez eles recebem o primeiro alerta;
- Determina se o grupo tentará evacuar para um destino ou permanecerá em sua estrutura e evacuará verticalmente;
- Rastreia grupos de evacuação na rede rodoviária à medida que evacuam;
- Atribui grupos a uma zona de perigo (ex.: nenhum risco, risco baixo, risco alto);
- Calcula a perda de vidas em cada grupo aplicando uma taxa de mortalidade amostrada da zona de perigo atribuída a cada pessoa do grupo exposta ao perigo de inundação; e
- Estima a perda total de vidas com a soma das perdas de vidas para todas as estruturas e veículos capturados durante a evacuação.

II. Dados hidráulicos

O *software* LifeSlim pode utilizar diversas opções de entrada hidráulica para realizar as simulações, dentre elas, importar dados do HEC-RAS. Para calcular danos a estruturas, o modelo utiliza a combinação de profundidades e velocidades nas planícies de inundação e avalia consequências para as perdas de vidas.

III. Inventário de estruturas e propriedades associadas

O inventário de estruturas representa locais geoespaciais que contêm elementos danificáveis, tipicamente uma estrutura, como uma casa. O inventário de estruturas inclui os seguintes parâmetros essenciais: tipo de ocupação, número de andares, tipo de construção, altura da fundação, altura do piso térreo, altura acima do piso térreo, altura do sótão, população menor de 65 anos à noite, população maior de 65 anos à noite, população menor de 65 anos durante o dia e população maior de 65 anos durante o dia. Esses parâmetros são necessários para a distribuição inicial da população.

Os tipos de ocupação de estruturas definem informações comuns para estruturas semelhantes. Os dados usados pelo tipo de ocupação que influenciam na perda de vida incluem: incertezas na altura da fundação, parâmetros de evacuação e critérios de submersão estrutural.

No que diz respeito aos parâmetros de evacuação, é determinado se a população na estrutura será alertada ao mesmo tempo e se a população na estrutura toma ação protetiva ao mesmo tempo. Além disso, são definidas a probabilidade de acesso ao telhado/sótão (desconsiderando mobilidade limitada), a fração que evacua para o telhado ao invés do sótão (se o acesso for possível), a fração da população que evacua em veículos e a pé, e o tamanho do grupo de evacuação (e.g., número de pessoas por veículo de evacuação). A Tabela 2.1 descreve os intervalos potenciais para cada um deles e o impacto que eles têm no resultado do modelo.

Tabela 2.1: Parâmetros de evacuação e impacto no resultado do modelo

Parâmetro	Padrão	Intervalo (valores indicados pelo LifeSim)	Fonte de dados / Considerações	Sensibilidade aos resultados
População na estrutura alertada ao mesmo tempo	Todos os tipos de ocupação exceto residencial multifamiliar (RES3)	Ligado ou desligado	Determina se a população dentro de uma estrutura é alertada de forma independente ou simultânea.	Pode ser de Baixa a Alta
População na estrutura toma ação protetiva ao mesmo tempo	Apenas para AGR1, RES1, RES5 e RES6	Ligado ou desligado, apenas disponível para população alertada ao mesmo tempo	Determina se a população dentro de uma estrutura pode se mobilizar de forma independente.	Pode ser de Baixa a Alta
Probabilidade de acesso ao telhado ou sótão	0,95	0-1	Parâmetro definido com base no acesso à estrutura e não na mobilidade da população.	Sensível à profundidade da inundação e ao tempo de chegada.
Fração para telhado vs sótão	0,9	0-1	Parâmetro definido com base no acesso à estrutura e não na mobilidade da população. Variável com a porcentagem de estruturas com sótãos.	Baixa
Fração da população que evacua em veículos vs a pé	100%	0-100	Uso da rede de estradas para pedestres. Dependente da localização. Disponibilidade de transporte público.	Alta
Tamanho do grupo de evacuação	3 para todos os tipos de ocupação exceto RES5.	1-48	Baseado na capacidade do veículo usado para a evacuação.	Alta, se as estruturas tiverem muitos ocupantes e a rede viária estiver congestionada.

Fonte: Adaptado de USACE (2018).

Informa-se que na Tabela 2.1, conforme as definições do LifeSim, as siglas AGR1, RES1, RES3, RES5 e RES6 denotam diferentes tipos de ocupações. A sigla AGR1 refere-se à agricultura, englobando o armazenamento de produtos agrícolas e de gado, escritórios e triagem de matérias-primas, com exemplos como armazéns de grãos e instalações de processamento de alimentos. A sigla RES1 abrange várias definições de habitações unifamiliares e multifamiliares, incluindo casas unifamiliares de 1 e 2 andares, tanto com quanto sem porão. A sigla RES3 refere-se a habitações multifamiliares, como duplex e apartamentos, que podem variar em número de unidades. A sigla RES5 representa alojamentos institucionais, como prisões e dormitórios de universidades, enquanto RES6 se refere a lares de idosos, que oferecem cuidados com equipe de apoio, como casas de repouso.

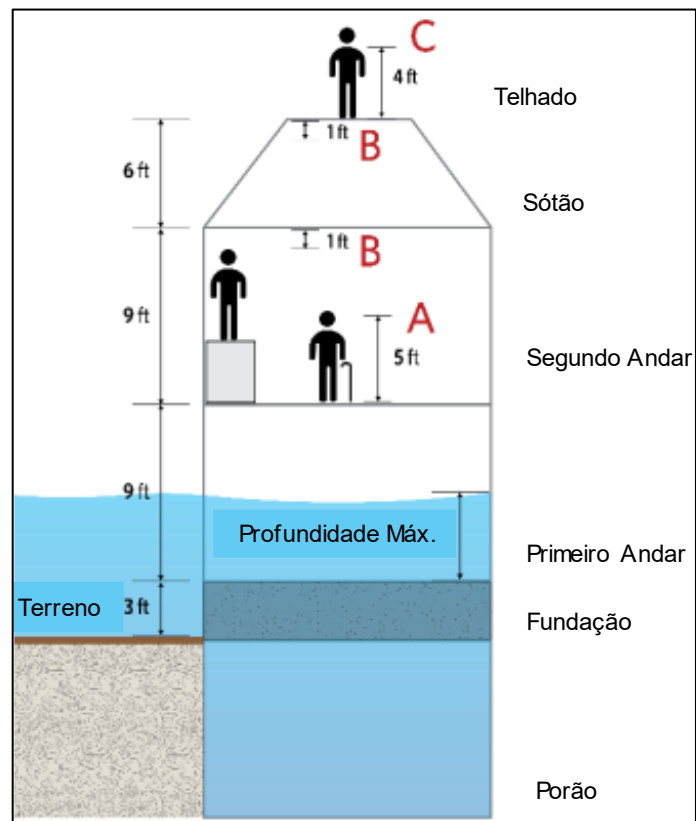
Referente aos critérios de submersão estrutural, são estabelecidas a profundidade do perigo elevado no telhado, a profundidade do perigo elevado do teto e a profundidade do perigo elevado do piso. A Tabela 2.2 descreve os intervalos potenciais para cada um deles e a Figura 2.2 ilustra cada um dos critérios.

Tabela 2.2: Critérios de submersão no LifeSim

Critérios de submersão	Descrição	Aplicável a...	Valores padrão do LifeSim
A. Profundidade de perigo elevado a partir do piso	Se a profundidade a partir do piso estiver acima do limite, então as pessoas serão colocadas na zona de perigo elevado.	Ocupantes com mobilidade limitada	1,22 – 1,83 metros, distribuição triangular com estimativa de 1,52 metros.
B. Profundidade de perigo elevado a partir do teto	Se a profundidade a partir do topo do teto estiver acima do limite, então as pessoas serão colocadas na zona de perigo elevado.	Ocupantes com mobilidade plena	0,15 – 0,46 metros, distribuição triangular com estimativa de 0,30 metros.
C. Profundidade de perigo elevado no telhado	Se a profundidade sobre o telhado for maior que o limite, então as pessoas presas no telhado serão colocadas na zona de perigo elevado.	Ocupantes com mobilidade plena	0,91 – 1,52 metros, distribuição triangular com estimativa de 1,22 metros.

Fonte: Adaptado de USACE (2018).

Figura 2.2: Ilustração dos critérios de submersão no LifeSim



Fonte: Adaptado de USACE (2018).

Os critérios de estabilidade de uma estrutura referem-se às condições hidráulicas utilizadas para determinar se tal estrutura entra em colapso quando exposta a inundações. Esses critérios são definidos em função da profundidade e da velocidade relativa ao primeiro andar da estrutura. Durante uma simulação, a estrutura será considerada em colapso se tanto a profundidade quanto a velocidade atingirem um ponto acima do limite funcional.

O tipo de construção é um fator crucial para definir os limites de estabilidade de uma estrutura. Esse tipo se refere ao material predominante da estrutura, como madeira, alvenaria, pré-fabricado, concreto e aço. A composição do material influencia diretamente a resistência da estrutura às forças hidráulicas.

Além do tipo de construção, o número de andares de uma estrutura também é um aspecto importante a ser considerado. O LifeSim leva em conta que todos os ocupantes da estrutura conseguem subir para os andares superiores, aumentando assim as chances de sobrevivência dos ocupantes presos dentro da edificação.

Quanto mais andares a estrutura possuir, maior será a probabilidade de evacuação segura.

Para avaliar o potencial de evacuação vertical, o LifeSim considera as alturas da fundação, do piso térreo, dos andares superiores e do sótão. A simulação leva em conta o movimento dos ocupantes em direção aos andares superiores, sendo a altura que conseguem alcançar e a profundidade da inundação na estrutura parâmetros fundamentais para definir os critérios de submersão.

O LifeSim usa a idade como indicador de mobilidade limitada e capacidade de auto-resgate, dividindo a população em maiores e menores de 65 anos. A mobilidade limitada é usada para determinar o potencial de evacuação vertical, ou seja, a capacidade de acessar áreas como um telhado.

Embora a taxa de mortalidade aplicada pelo LifeSim seja uniforme para todas as idades, os idosos apresentam uma menor probabilidade de alcançar áreas de baixo risco durante inundações. Caso seja identificado que uma pessoa possui mobilidade limitada, o LifeSim assume que essa pessoa não conseguirá evacuar para além do andar mais alto de um edifício, como o telhado ou o sótão. Em contrapartida, indivíduos fisicamente aptos, que não têm acesso ao telhado ou sótão, podem utilizar móveis ou adotar outras estratégias dentro da estrutura para se manterem acima do nível d'água.

Outro parâmetro importante é a fração da população que pode nadar, que é atribuída aleatoriamente à população total do inventário com base em uma porcentagem definida pelo usuário de pessoas com habilidade de natação. A capacidade de natação é usada para classificar as pessoas que evacuam a pé e estão expostas a águas profundas, mas de movimento lento. Dessa forma, as pessoas que sabem nadar são atribuídas às zonas de baixo risco, enquanto as que não sabem nadar são colocadas na zona de alto risco.

A Tabela 2.3 descreve os parâmetros populacionais, os intervalos potenciais para cada um e o impacto que eles geram no resultado do modelo. Essa tabela oferece uma visão detalhada de como diferentes variáveis populacionais influenciam os cenários de evacuação e os resultados das simulações.

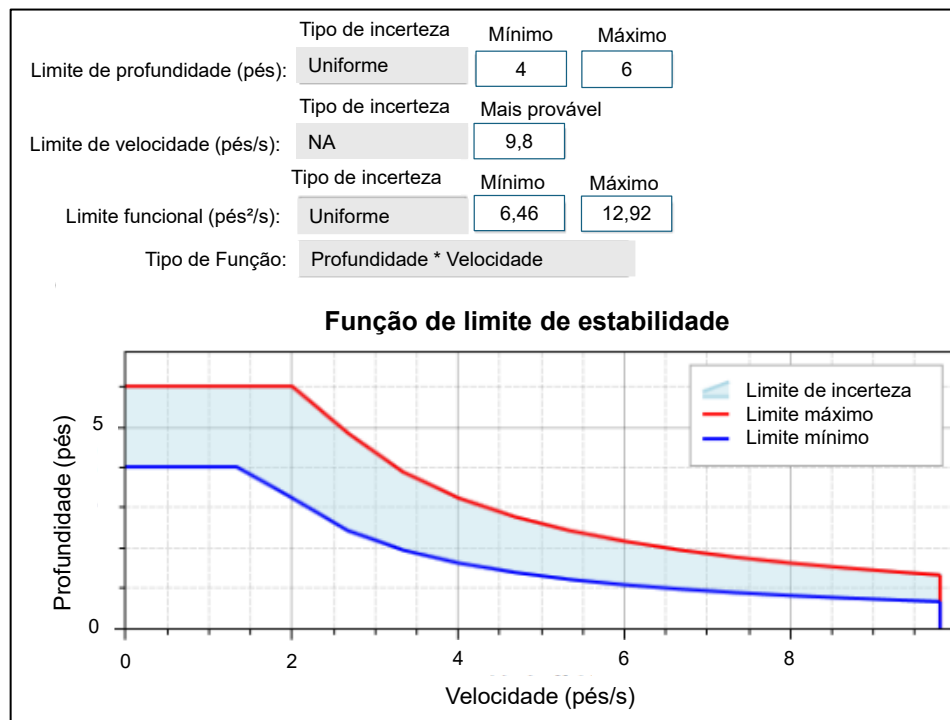
Tabela 2.3: Parâmetros populacionais definidos para uma alternativa no LifeSim

Parâmetro	Padrão	Intervalo (melhores práticas)	Fonte de dados / Considerações	Sensibilidade aos resultados
Fração com mobilidade limitada abaixo de 65 anos	0,051	0-1	Estatísticas de saúde regionais; determina a capacidade de evacuar verticalmente	Alta
Fração com mobilidade limitada acima de 65 anos	0,226	0-1	Estatísticas de saúde regionais; determina a capacidade de evacuar verticalmente	Alta
Fração que sabe nadar	0,45	0,40-0,85	Estatísticas regionais. Aplica-se àqueles evacuando a pé. Determina a zona de risco quando pegos em águas de inundação.	Depende da porcentagem de evacuados a pé. Pode ser significativo.

Fonte: Adaptado de USACE (2018).

Complementarmente, os critérios de estabilidade humana no LifeSim avaliam a capacidade das pessoas de permanecerem em pé ou atravessarem águas de inundação com base na função das profundidades (D) e velocidades (V) das águas de inundação naquele local, além dos critérios de estabilidade humana (RUSSO *et al.*, 2013). A capacidade de uma pessoa de permanecer em pé é definida no LifeSim como limiares de profundidade (D), velocidade (V), DV ou DV^2 . Se a profundidade e a velocidade instantâneas no local de uma pessoa excederem os limiares de velocidade ou DV, então assume-se que a pessoa está em uma situação de alto risco. Se apenas o critério de profundidade for excedido, a classificação de risco de uma pessoa depende de sua capacidade de nadar. A função padrão para estabilidade humana está ilustrada na Figura 2.3.

Figura 2.3: Critério de estabilidade em humanos padrão no LifeSim



Fonte: Adaptado de USACE (2018).

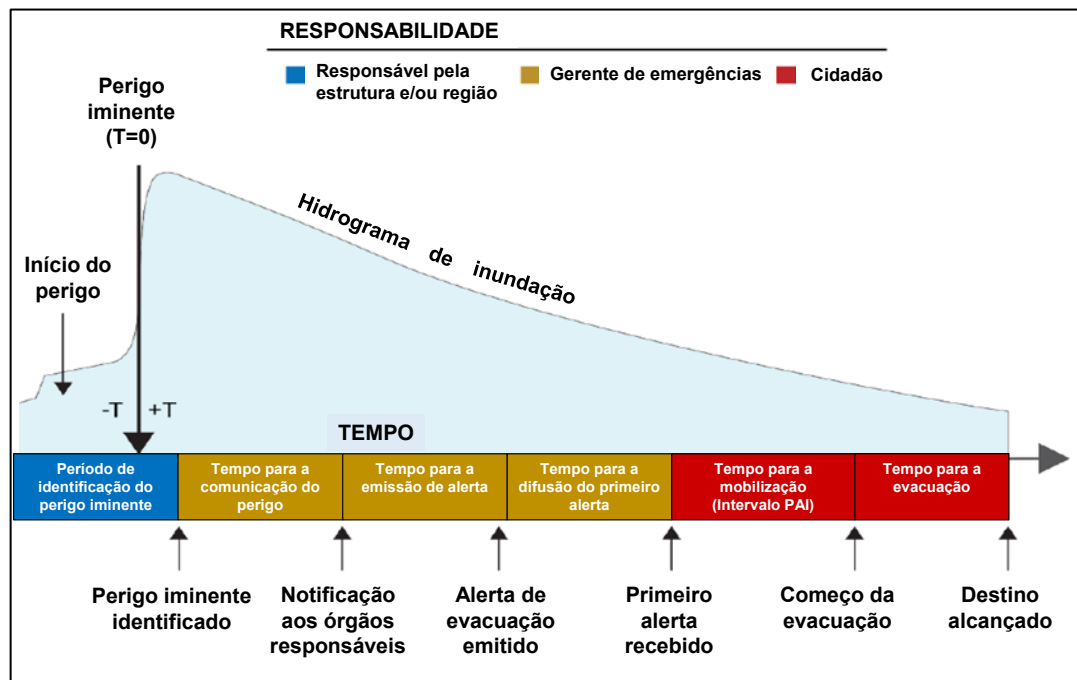
IV. Parâmetros de alerta e ação protetora

O LifeSim utiliza décadas de pesquisa em Tomada de Decisão de Ações Protetivas (PADM) para modelar evacuações horizontais e verticais, mas ainda não inclui ações de resgate devido à falta de dados.

O sistema de avisos e evacuação (ação protetiva) atualiza e redefine a localização da população a partir de suas posições iniciais assim que um aviso é emitido, direcionando-a para novas áreas classificadas em zonas de risco: sem perigo, baixo perigo ou alto perigo. Essa relocação pode incluir evacuação horizontal, realizada a pé ou em veículos ao longo de redes rodoviárias, bem como evacuação vertical dentro de edificações.

A Figura 2.4 ilustra a partir de pontos no tempo, os períodos (intervalos) entre pontos necessários para avisar e evacuar a população em risco (PAR), onde todos os períodos são cumulativos da esquerda para a direita e podem ser representados com incerteza no LifeSim. Ainda na Figura 2.4, pode-se perceber a presença de três “entidades” envolvidas no cronograma de alerta e evacuação, quais sejam: (1) o responsável / proprietário ou o operador da barragem ou dique, (2) a agência de gestão de emergências (EMA) e (3) a população em risco (PAR).

Figura 2.4: Linha do tempo dos componentes do estudo no LifeSim



Fonte: Adaptado de USACE (2018).

O momento em que o perigo ocorre é denominado tempo de início do perigo, servindo como referência para todos os parâmetros de alerta e evacuação que dependem da variável tempo na simulação. O tempo de identificação de perigo iminente é o parâmetro que conecta o processo de alerta e evacuação aos dados hidráulicos. Esse é o momento em que alguém reconhece que uma inundação com risco de vida está prestes a ocorrer ou está ocorrendo e decide que a PAR precisa ser evacuada.

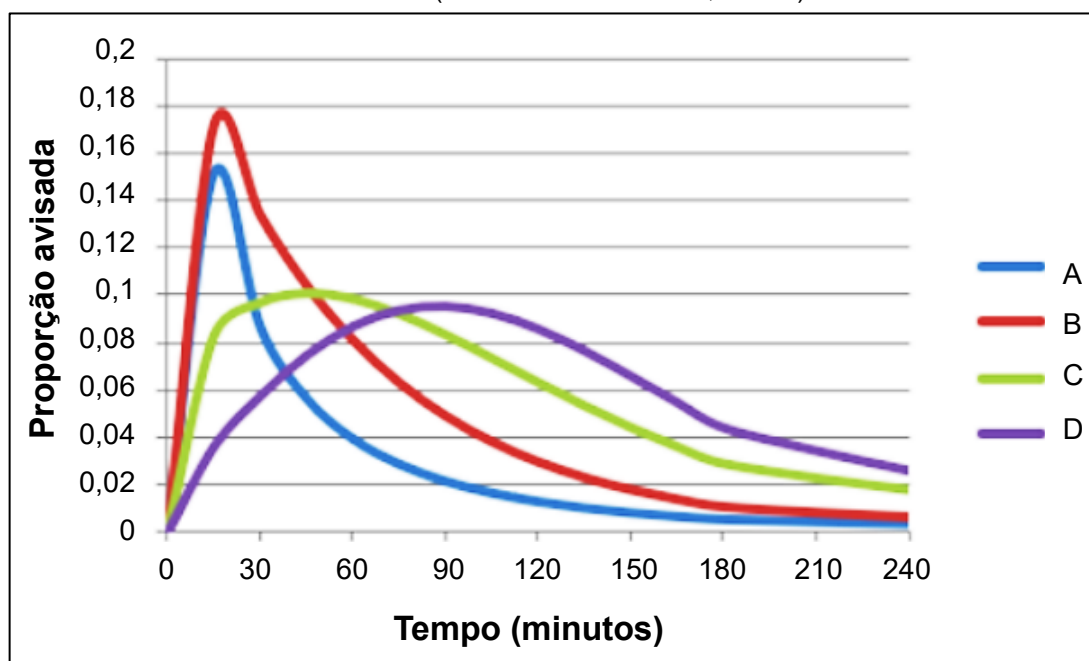
O intervalo entre a identificação de um perigo iminente e a notificação da agência responsável por ordenar a evacuação é chamado de tempo para a comunicação do perigo. A mensagem emitida com intuito de alertar os destinatários sobre a necessidade de evacuação é chamada de “aviso”; trata-se do primeiro alerta público de uma ordem de evacuação. O tempo para a sua emissão é o intervalo que decorre desde o momento em que a agência emissora do aviso toma conhecimento do perigo pela primeira vez até o momento da sua emissão.

A relação que define a rapidez com que o primeiro aviso é disseminado na população é chamada de tempo para a difusão do primeiro alerta. A ação tomada para um indivíduo ou grupo se proteger é chamada de iniciação de ação protetora (PAI), e consiste no período que se inicia com o recebimento do primeiro alerta e termina com a primeira tomada de medida de proteção pelo destinatário. Nesse intervalo de tempo as

peças estão reunindo familiares, fazendo malas, avisando outras pessoas etc. Por fim, tem-se o tempo para que as pessoas evacuem até chegarem a um local seguro.

A pesquisa de Mileti e Sorensen (2017a) identificou quatro categorias principais que afetam o tempo para a emissão de alertas durante uma evacuação, a saber: formalização dos procedimentos; experiência e treinamento da equipe; desempenho do sistema; e fatores situacionais. Eles desenvolveram funções para estimar esses tempos com base em pesquisas com gerentes de emergência e em 70 casos de acidentes químicos. Quatro funções de distribuição de probabilidade foram criadas e são usadas no LifeSim para determinar os tempos para a emissão de alertas, apresentadas na Figura 2.5.

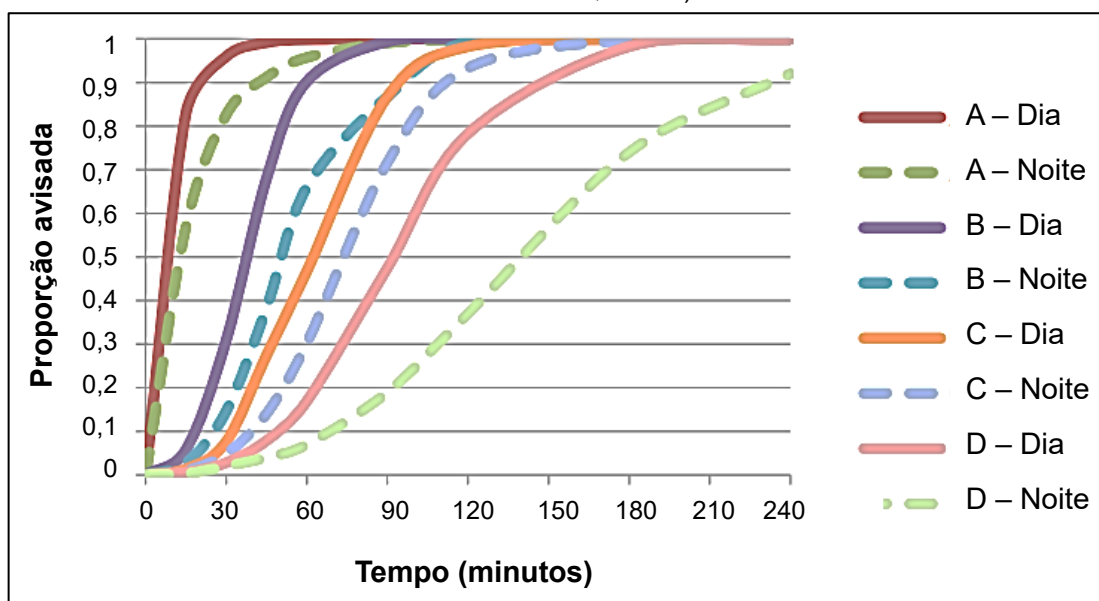
Figura 2.5: Funções de distribuição de probabilidade para tempos para a emissão de alertas usadas no LifeSim (MILETI e SORENSEN, 2017a).



Fonte: Adaptado de USACE (2018).

As funções de tempo para a difusão do primeiro alerta usadas no HEC-LifeSim foram desenvolvidas por Mileti e Sorensen (2017b) com base em dados de eventos históricos, como inundações, furacões, incêndios florestais, tornados, vulcões, acidentes químicos e ataques terroristas. Eles criaram oito funções, que são usadas como padrão no LifeSim, variando de "Alerta Rápido" a "Alerta Lento". As funções também foram ajustadas para considerar o horário do dia, conforme ilustrado na Figura 2.6.

Figura 2.6: Curvas simuladas para quatro sistemas de disseminação durante o dia e a noite (MILETI E SORENSEN, 2017b).

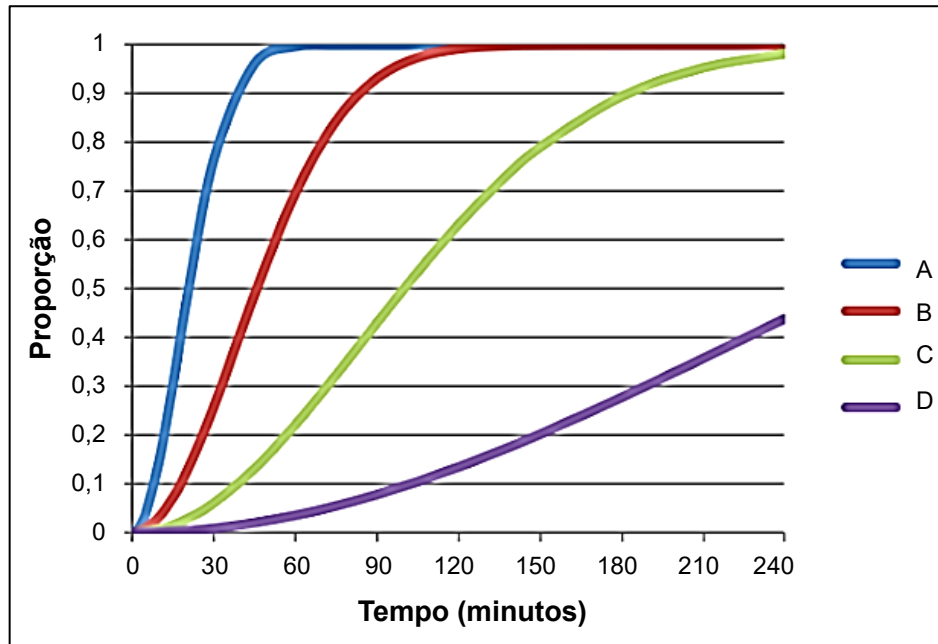


Fonte: Adaptado de USACE (2018).

As funções de tempo para o início de ação de proteção (PAI) usadas no LifeSim foram desenvolvidas pelo USACE-RMC com base na pesquisa de Mileti e Sorensen (2017c). Eles analisaram casos históricos de ações de proteção para criar um modelo matemático de PAI ajustado a esses casos, resultando em quatro funções diferenciadas pelo nível de preparação da população (Figura 2.7). A série A indica alta preparação e a série D baixa preparação. O USACE-RMC expandiu as funções de 8 horas para 72 horas para acomodar tempos de simulação mais longos do LifeSim, com base na mobilização assumida em 24 horas e 72 horas.

Os melhores e piores dos quatro casos gerais foram tomados como os limites de incerteza. As nove curvas padrão são uma recombinação dessas curvas gerais com base em respostas ponderadas ao questionário gerado no estudo representando a percepção de risco e a probabilidade de impacto.

Figura 2.7: Funções de intervalo PAI simuladas correspondentes a diferentes níveis de preparação e percepção (MILETI E SORENSEN, 2017c)



Fonte: Adaptado de USACE (2018).

V. Redes rodoviárias, destinos e parâmetros de evacuação

Os dados da rede rodoviária e dos destinos seguros representam possíveis rotas que podem ser utilizadas pelas pessoas durante uma evacuação. A simulação do tráfego ao longo da rede rodoviária começa quando o primeiro grupo inicia a evacuação para um destino seguro. No LifeSim, é utilizado o modelo de simulação de tráfego Greenshields em uma versão modificada, conforme demonstrado nas equações abaixo e na figura:

$$v_i = u_f \quad , \quad 0 \leq k_i \leq k_{bp} \quad 2.1$$

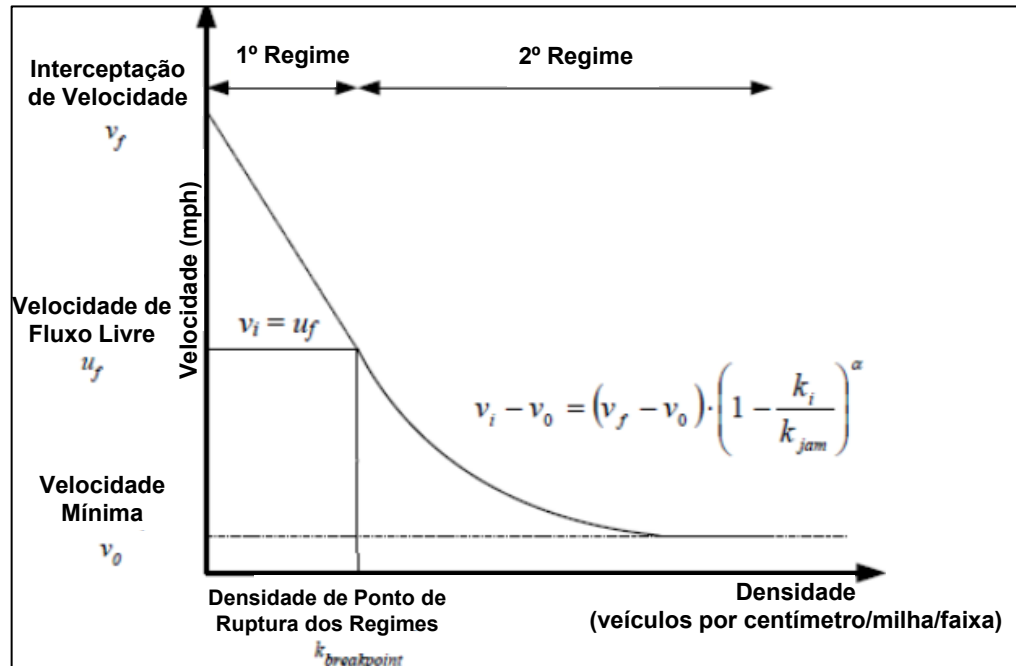
$$v_i - v_0 = (v_f - v_0) \left(1 - \frac{k_i}{k_{jam}} \right)^\alpha \quad , \quad k_{bp} \leq k_i \leq k_{jam} \quad 2.2$$

Em que:

- v_i = velocidade na via i;
- u_f = velocidade de fluxo livre na via i;
- k_i = densidade veicular na via i;
- k_{bp} = ponto de quebra de densidade na via i;
- v_0 = velocidade de parada e partida na via i;

- v_f = intercepto de velocidade;
- k_{jam} = densidade de congestionamento na via i ; e
- α = termo de potência de Greenshields.

Figura 2.8: O modelo de Greenshields modificado de regime duplo empregado no LifeSim.



Fonte: Adaptado de USACE (2018).

A linha da rede rodoviária geralmente é importada de um shapefile ou diretamente do serviço web OpenStreetMap.

A velocidade de fluxo livre refere-se à velocidade com a qual os veículos trafegam sem impedimentos de outros veículos, enquanto a velocidade de parada e partida é a velocidade na qual os veículos se movem quando as condições de engarrafamento são atendidas.

A densidade de congestionamento é a observada quando o fluxo de tráfego começa a se aproximar de zero. A densidade de ruptura é o ponto em que os veículos passam das velocidades de fluxo livre para condições de congestionamento e mudam para um modelo de Greenshields. O termo de potência de Greenshields (α) define a forma da função velocidade-densidade.

No início do processo de evacuação, os veículos se dirigem para destinos seguros, podendo mudar de rota caso encontrem uma estrada congestionada ou inundada. As

peessoas são consideradas seguras e retiradas da simulação assim que o destino é alcançado.

A Tabela 2.4 descreve os vários parâmetros de evacuação, os possíveis intervalos para cada um e o impacto que eles têm no resultado do modelo.

Tabela 2.4: Parâmetros de evacuação do LifeSim

Parâmetro	Padrão	Intervalo (melhor prática)	Fonte de dados / considerações	Sensibilidade aos resultados
Velocidade do pedestre	6,44 km/h	3,22 – 8,05 km/h	O padrão é uma caminhada rápida. 1,1 m/s (3,9 km/h padrão em modelos de tráfego). Habilidade, terreno, distância, motivação, cargas.	Depende da porcentagem de evacuados a pé. Pode ser significativo.
Fração em carros vs SUVs/caminhões	0,5	0-1 (maior em áreas rurais)	Específico da região. Impacta decisões de rota através de estradas inundadas.	Baixa
Fração que redireciona em engarrafamento	0,8	0-1	Julgamento de especialistas e conhecimento da rede rodoviária.	Alta para redes congestionadas com múltiplas rotas de saída.
Distância de olhar para frente do veículo	402 m	Dependente do intervalo de tempo de evacuação	Julgamento de especialistas. Considera a distância percorrida no único intervalo de tempo de evacuação como um mínimo.	Alta
Comprimento efetivo do veículo	6 m	6-7,6 m	Considera comprimento de <i>buffer</i> em tráfego congestionado. Aplica-se apenas quando a retenção veicular está habilitada.	Baixa
Profundidade de evacuação não-veicular	0,6 m	0-0,9 m	Decisão de sair de uma estrutura. Calculado na estrutura, não na frente da estrutura.	Baixa
Intervalo de tempo de evacuação	10 seg	1-30 seg	Antecipação. Precisão vs tempo de execução.	Alta
Intervalo de atualização do tráfego ao vivo	5 min	1-10 min	Tempo de execução. Não é necessário capturar a congestão da rede completa a cada intervalo de tempo. (Simula aproximadamente Waze ou Google fornecendo informações de tráfego disponíveis para os motoristas).	Baixa

Fonte: Adaptado de USACE (2018).

No que se refere à estabilidade, o entendimento atual, baseado em eventos históricos, é que veículos perdem estabilidade em águas profundas e/ou rápidas, sendo empurrados para áreas mais perigosas. Quando a estabilidade de um veículo é comprometida, ele é considerado “preso” e os ocupantes são atribuídos à zona de

inundação menos favorável no LifeSim. A Tabela 2.5 mostra as funções padrão para a estabilidade de veículos de baixa e alta altura.

Tabela 2.5: Critérios padrão de estabilidade de veículos no LifeSim para veículos de baixa e alta altura.

Limite Hidráulico	Veículos de baixa altura			Veículos de alta altura		
	Alto	Baixo	Melhor estimativa	Alto	Baixo	Melhor estimativa
Profundidade (m)	1,5	0,3	1,2	2	0,5	1,5
Velocidade (m/s)	6	3	4,5	6	3	6
DV (m ² /s)	1,3	0,3	0,8	2,4	0,6	1,2

Fonte: Adaptado de USACE (2018).

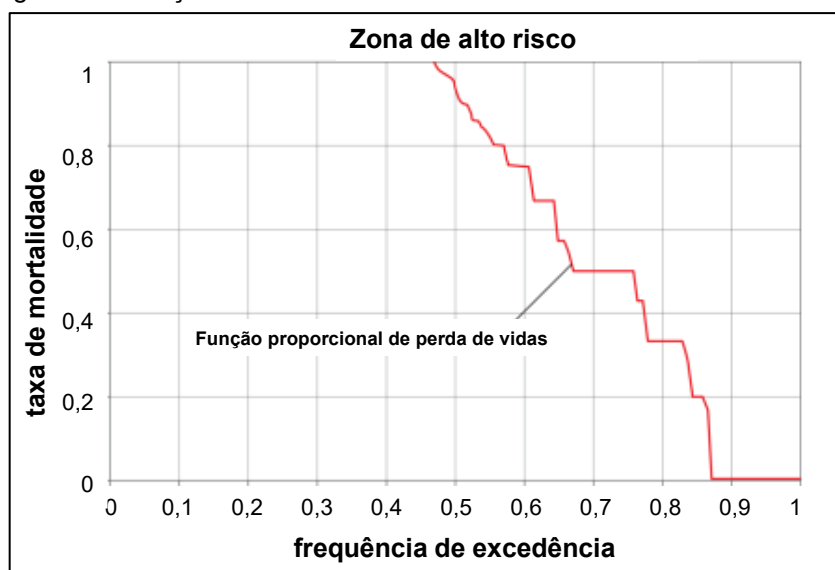
VI. Taxas de mortalidade

Por fim, para determinar a quantidade de pessoas que perderão a vida em condições de inundação de alto ou baixo risco é utilizada a função de taxa de mortalidade. Essas funções resultam de uma extensa pesquisa de eventos históricos de inundação.

As estimativas de perda de vidas são feitas usando as distribuições de probabilidade de perda de vidas desenvolvidas por McClelland e Bowles (2000), atualizadas por Aboelata, Bowles e McClelland (2003).

A Figura 2.9 mostra a distribuição das taxas de mortalidade para grupos populacionais na zona de alto risco.

Figura 2.9: Função de alta taxa de mortalidade de risco usada no LifeSim.



Fonte: Adaptado de USACE (2018).

A taxa de mortalidade é obtida através de amostragem aleatória da frequência relativa de excedência nos grupos atribuídos em uma zona; nessas amostragens são expressas ocorrências naturalmente variáveis. A perda de vidas é calculada para cada grupo após a determinação da taxa de mortalidade.

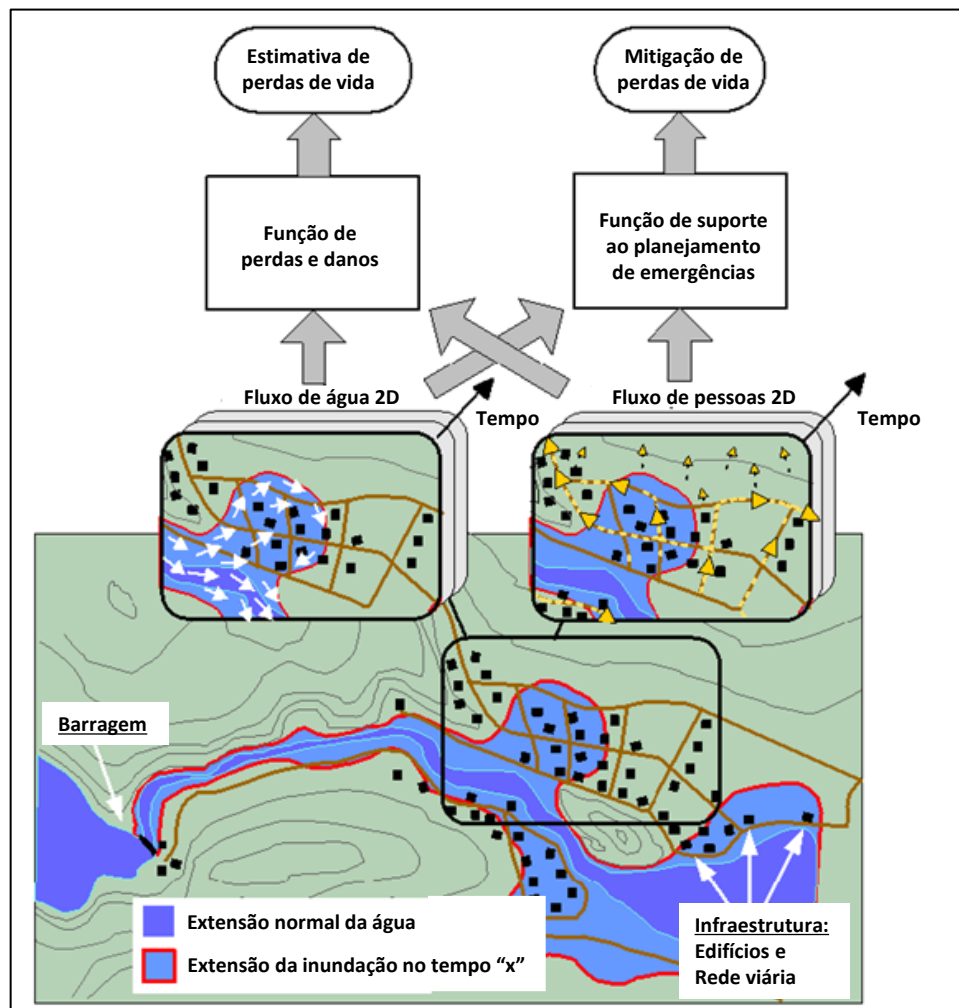
2.3.2 *Life Safety Model* (LSM)

A seguir, o modelo *Life Safety Model* (LSM) é detalhado pela apresentação de informações existentes em Lumbroso e Davison (2016) e BC HYDRO (2006).

O LSM é um modelo baseado em agentes que representa as interações das pessoas com a inundação e fornece estimativas do número de pessoas que provavelmente seriam feridas ou mortas. Seu desenvolvimento foi iniciado em 2006, com o intuito de promover melhorias nas avaliações de risco relacionadas a barragens hidrelétricas na Colúmbia Britânica, no Canadá, e assim salvaguardar vidas humanas. O modelo adota uma abordagem fenomenológica, o que o torna mais robusto se comparado a modelos comumente usados, que utilizam métodos empíricos para fornecer uma estimativa de perda de vidas, e simula a interação física dos indivíduos com as inundações modeladas (BC HYDRO, 2006).

A Tabela 2.6 apresenta uma imagem conceitual de como o LSM é aplicado. Para uma área de estudo específica, o LSM integra as características relacionadas ao modelo hidrodinâmico com um modelo "fluxo de pessoas", ambos bidimensionais.

Figura 2.10: Conceito do LSM



Fonte: Adaptado de BC HYDRO (2006).

A partir dessa forma de análise, dois tipos de resultados são produzidos pelo modelo:

- **Estimativas de perda de vidas:** Utilizando funções de perdas e danos, o modelo estima as consequências às pessoas e à infraestrutura. Essas estimativas são usadas para produzir estatísticas resumidas de perda, bem como estatísticas descritivas mais detalhadas; e
- **Planejamento de emergência e mitigação da perda de vidas:** O modelo permite a adição de eventos hipotéticos e a alteração de parâmetros relacionados à implementação de um plano de emergência e atividades de mitigação. Esses eventos podem incluir tempos de aviso e rotas de fuga mais eficientes.

A superfície de uma dada região de interesse representada; por exemplo, por um modelo digital de elevação, fornece um “pano de fundo” sobre o qual todos os outros

objetos do LSM são georreferenciados. A cheia de inundação é incorporada a partir de uma modelagem hidrodinâmica externa que detenha uma representação das profundidades e velocidades do evento em função do tempo.

A maior parte dos objetos do LSM que interagem com a inundação diz respeito ao cenário de vulnerabilidade e exposição a ser determinado. Isso inclui objetos fixos, como edifícios e centros de aviso, e objetos móveis, como grupos de pessoas em risco e veículos. No LSM, existem algumas definições para os objetos a serem inseridos no modelo:

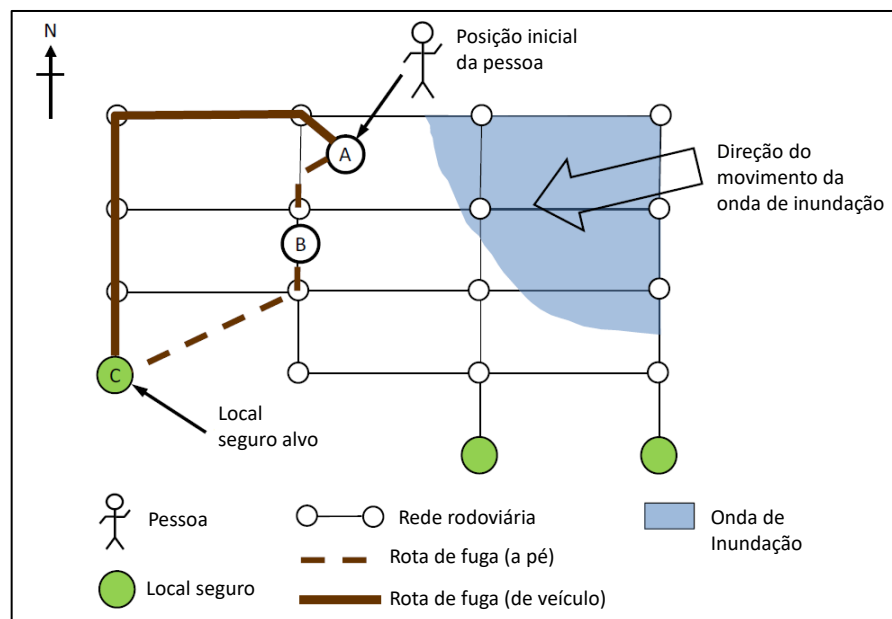
- O objeto mais importante em uma simulação do LSM é denominado como Unidade de População em Risco (PARU), que é uma representação virtual de uma pessoa que poderia estar localizada dentro da área de estudo. Um grupo de PARUs que compartilham a mesma localização, como um edifício, ou que estão viajando no mesmo veículo, ou caminhando juntos, é chamado de Grupo de População em Risco (PARG);
- O PARG pode ser visto conceitualmente como um grupo de pessoas ligadas, de forma que estas se comportam como uma unidade coletiva. Esse vínculo pode ser social, como o relacionamento entre membros da mesma família, ou derivado da natureza humana de ajudar e apoiar outros em perigo ou reagir de maneira uniforme;
- Os edifícios incluem estruturas antropogênicas, como casas, escolas e centros comerciais que contêm pessoas. Locais ao ar livre onde as pessoas podem se agrupar podem ser modelados como edifícios;
- A rede de estradas e trilhas descreve a localização de segmentos de estrada, segmentos de ponte, segmentos de trilha e interseções, usadas por PARGs para evacuar; e
- Os centros de aviso podem ser localizados na zona de risco e servem para alertar radialmente edifícios, veículos e pedestres em uma área, proporcionando, assim, a capacidade de contabilizar um plano de emergência local na simulação.

A lógica usada pelo LSM pode ser explicada considerando como um indivíduo pode vivenciar um evento de inundação. Para exemplificar o funcionamento do modelo na

prática, a Figura 2.11 mostra uma pessoa localizada em um prédio no início de uma inundação (localização A).

Se ela estiver em um prédio de dois andares, pode tomar a decisão de subir. Assumindo que a área será inundada e que a pessoa morrerá se ficar presa no prédio, ela pode decidir evacuar por rotas pré-definidas. São mostrados três possíveis locais seguros para os quais a pessoa pode evacuar por meio de rotas predefinidas, a pé ou em um veículo. Levando em consideração o tempo para chegar a cada local seguro, a alternativa a sudoeste é ideal para a fuga a pé e em veículo. No entanto, se a pessoa tentar escapar a pé, será impactada no ponto B. No terceiro cenário, a pessoa sobrevive devido a uma combinação de tempo de alerta suficiente e o uso de um veículo para chegar ao ponto C.

Figura 2.11: Modelo de evacuação com o LSM.



Fonte: Adaptado de Lumbroso e Davison (2016)

De maneira mais detalhada, a Tabela 2.6 descreve cada processo considerado no modelo de perdas de vida do LSM.

Tabela 2.6: Descrição da lógica do modelo LSM

Processo	Descrição
Onda de inundação	Passo a passo, a inundação avança e afeta todos os objetos em seu caminho, podendo causar fatalidades a qualquer passo de tempo. Por exemplo, as funções de perda de objetos podem mudar o estado dos objetos para destruído, derrubado ou falecido, se as características instantâneas da inundação forem suficientemente altas. Caso contrário, os objetos “edifício” e PARU podem ser perdidos em passos subsequentes via um declínio cumulativo.
Deteção e aviso de inundação	Alguns centros de aviso podem se tornar ativos quando encontram a inundação, ou com base em um tempo predefinido, ou por um sinal de outros centros de aviso ativos. Centros de aviso alertam PARU/PARGs próximos que estão em edifícios, a pé ou em veículos.
Conscientização sobre a inundação	PARGs podem se tornar conscientes da inundação via centros de aviso. Uma vez conscientes, PARGs iniciarão sua evacuação. Todos os PARGs em um edifício se tornam conscientes ao mesmo tempo se alertados por um centro de aviso. PARGs que estão a pé, ou em veículos, ou em edifícios, também podem se tornar conscientes se encontrarem diretamente a onda de inundação (acima de uma profundidade predefinida). PARGs em um edifício que é inundado até uma profundidade especificada são alertados sobre a inundação. PARGs conscientes podem alertar outros dentro de um raio especificado.
Tomada de decisão / Refúgio seguro	PARGs que estão em um edifício e que se conscientizam da inundação podem permanecer na edificação ou evacuar. Aqueles que optam por evacuar, o fazem após um tempo predefinido, que está associado a atividades de decisão e organização. Após esse período, a evacuação se inicia em direção ao local seguro mais próximo, evitando estradas fechadas.
Movimento / Comportamento de fuga	PARGs podem se mover pela rede de viária sem estar conscientes da inundação. Isso pode aumentar a densidade de carros nas vias e retardar a fuga daqueles que estão conscientes, os quais vão em direção aos locais seguros. Segmentos de vias que são suficientemente inundados podem ser fechados para PARGs subsequentes.
Perdas e danos de edifícios	O estado estrutural de um edifício permanecerá constante até que entre em contato com a inundação. Neste momento, o edifício pode ser destruído instantaneamente, colapsar devido aos efeitos cumulativos da inundação, ou depreciar estruturalmente e permanecer estável ao próximo passo de tempo. PARGs dentro do edifício podem se tornar conscientes da onda de inundação e podem optar por evacuar. PARGs podem ser considerados mortos se o edifício colapsar e se estiverem em seu interior quando o andar inundar. Neste último caso, podem “escapar” da inundação se o edifício tiver altura e capacidade de pisos suficientes para o abrigo.

Fonte: Adaptado de BC HYDRO (2006).

Para estimar as consequências da inundação, o LSM requer a especificação de uma Função Generalizada de Perdas e Danos de Objetos (ODLF). Os objetos do LSM que requerem essa função são: PARU, PARG, edifício e veículo.

Um objeto no LSM possui propriedades que podem variar com o tempo, como sua localização e seu estado. A ODLF é uma função que determina se e quando o estado do objeto deve mudar em função de uma série temporal de profundidade e velocidade $[d(t), v(t)]$. O princípio básico da ODLF é que cada objeto, em geral, tem uma resistência R para suportar a carga S da inundação. O estado muda se $R < S$. Por exemplo, a resistência de uma pessoa a ser derrubada depende de fatores como sua altura, peso e idade. A resistência de um edifício depende do tipo de construção e do mecanismo de falha, como flexão ou cisalhamento.

A perda cumulativa também reflete em uma redução na resistência, resultante da exposição à inundação, como fadiga, exaustão humana ou erosão da fundação. A resistência é, portanto, uma função da série temporal de profundidade da inundação $d(t)$ e velocidade $v(t)$. A carga S é uma função temporal de $d(t)$ e $v(t)$:

$$S(t) = S[v(t), d(t)] \quad 2.3$$

A seguir são detalhados os mecanismos e funções de perda no LSM para edifícios, pessoas e veículos.

I. Funções de perda para edifícios

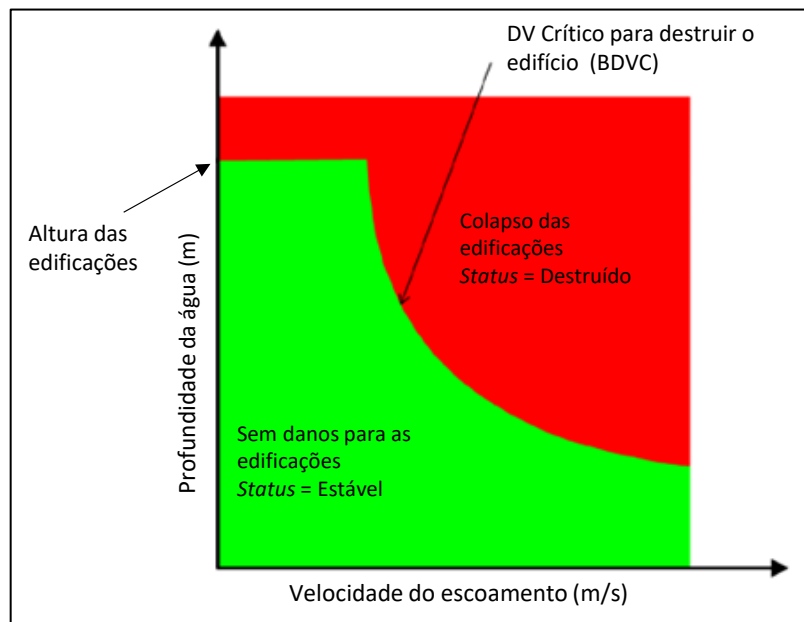
O LSM determina se o edifício está estável ou destruído a medida em que interage com a inundação. O modelo foi projetado para variar a condição de um edifício à medida que a sua resistência se degrada com a exposição. Com base nessa suposição de modelagem, o algoritmo da ODLF pode ser resumido na Figura 2.12 e no fluxograma mostrado na Figura 2.13. Para facilitar a compreensão, a Tabela 2.7 apresenta o significado das siglas utilizadas pelo LSM.

Tabela 2.7: Siglas utilizadas pelo LSM no contexto das funções ODLF para edifícios

Parâmetro	Descrição
DV	$[profundidade^{e1} \times velocidade^{e2}]$ no edifício (m^2/s) no tempo t . O padrão é $e1 = e2 = 1$.
BSS	Estado estrutural inicial
BSSC	Estado estrutural crítico
BCDVM	Capacidade de resistir a danos contínuos
RBCDVM	Fator de redução do multiplicador crítico de DV do edifício
BDVCA	DV crítico inicial para destruir o edifício (m^2/s)
BDVC	DV crítico atualizado para destruir o edifício (m^2/s) no tempo t

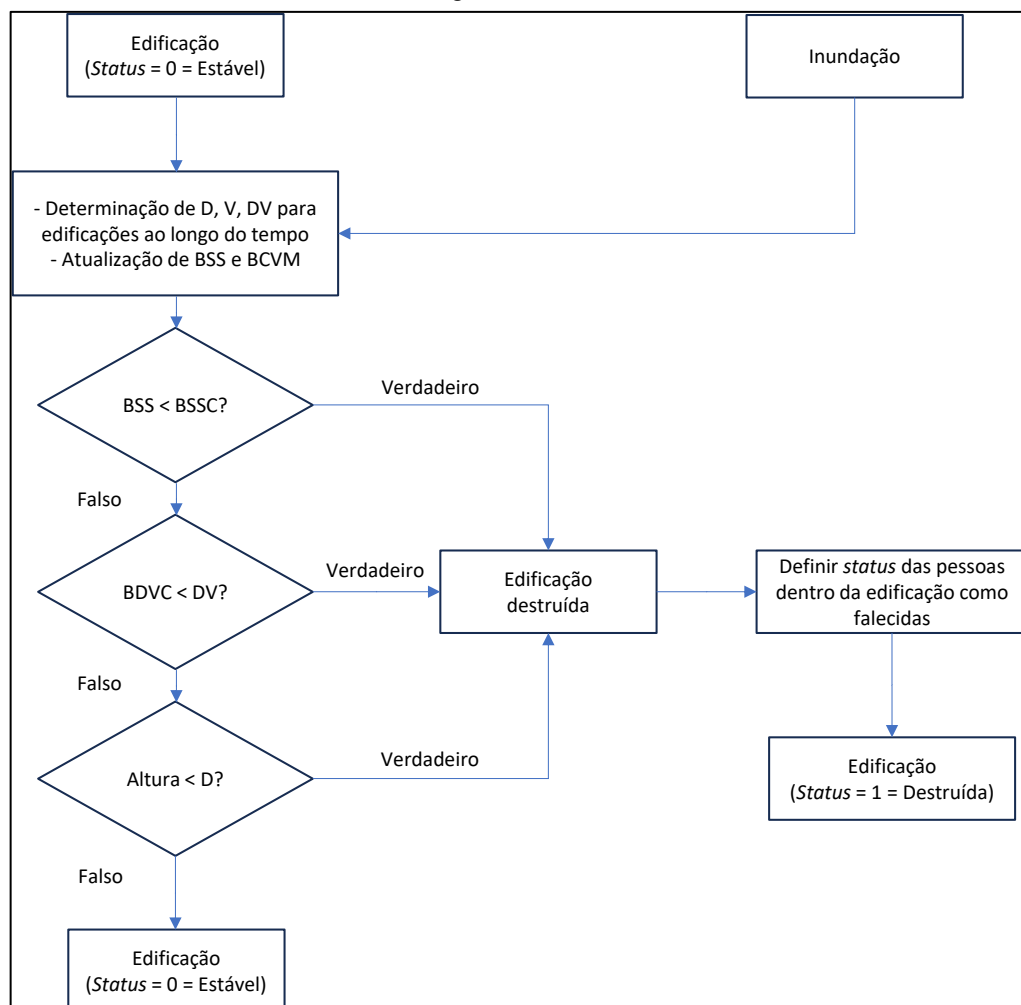
Fonte: Adaptado de BC HYDRO (2006).

Figura 2.12: ODLF para edifícios



Fonte: Adaptado de BC HYDRO (2006).

Figura 2.13: Fluxograma para atualização do *status* de edifícios com base nos dados de entrada da modelagem hidrodinâmica



Fonte: Adaptado de BC HYDRO (2006).

Conforme Figura 2.13, existem três maneiras de um edifício ser destruído: se o edifício experimentar um valor combinado de profundidade e velocidade suficientemente alto ($BDVC < DV$); experimentar uma profundidade de água maior que a altura do edifício ($Altura < D$); ou degradar abaixo de um nível crítico definido ($BSS < BSSC$). Em todos esses casos, as pessoas dentro do edifício serão consideradas falecidas.

No LSM, o BSS diminui com a exposição prolongada do edifício à profundidade e velocidade da inundação, conforme descrito na Equação 2.4 e na Equação 2.5.

$$BSS(t + 1) = BSS(t) \left[1 - \frac{\frac{dv(t) + dv(t+1)}{2} \cdot \Delta t}{BCDVM(t)} \right] \quad 2.4$$

$$BCDVM(t + 1) = BCDVM(t) - RBCDVM(t) \cdot (dv(t) \cdot \Delta t) \quad 2.5$$

A variável BSS é uma avaliação subjetiva de resistência. Se:

- $BSS = 1$; resistência estrutural média (por exemplo, casas típicas com estrutura de madeira);
- $BSS > 1$; resistência estrutural acima da média (por exemplo, grandes estruturas de alvenaria); e
- $BSS < 1$; abaixo da média (por exemplo, estruturas fracas ou temporárias).

O valor inicial padrão para BSS é 1,0, mas pode ser definido em qualquer valor que melhor represente a construção dos edifícios específicos da área de estudo. O parâmetro BSSC é o Estado Estrutural Crítico do Edifício, que define o limiar para a falha do edifício.

O Multiplicador Crítico de DV do Edifício BCDVM é um fator que define a taxa na qual o Estado Estrutural do Edifício (BSS) declina com a exposição à inundação, conforme definido na Equação 2.4. À medida que uma estrutura é enfraquecida, é possível que a taxa de declínio da resistência do edifício aumente com o tempo e a exposição à inundação. A Equação 2.5 simula a degradação de um edifício à medida que é exposto a uma inundação.

O fator de redução do Multiplicador Crítico de DV do Edifício, RBCDVM, pode ser atribuído a uma gama de valores; cujo valor padrão é igual a 1,0. À medida que um edifício é enfraquecido com a exposição contínua às águas da inundação, a taxa de declínio de sua resistência aumenta, o que pode ser ajustado por meio da variável RBCDVM. O fator BCDVM pode ser mantido como uma constante, com um RBCDVM = 0. Valores positivos de RBCDVM aumentam a taxa de declínio da resistência, e valores negativos diminuem a taxa, sendo o RBCDVM aplicado como um valor constante a todas as estruturas.

A falha de um edifício pode ocorrer de várias maneiras durante uma inundação; alguns exemplos de modos de falha podem incluir a erosão da fundação de um edifício ou a pressão hidrostática rompendo paredes/janelas/portas. Embora esses modos de falha não possam ser contabilizados individualmente no modelo, seus efeitos podem ser considerados na seleção das variáveis na ODLF.

II. Funções de perda para pessoas

A ODLF para humanos determina se uma pessoa sujeita aos danos da inundação pode ser derrubada ou morta. No modelo, um indivíduo derrubado é considerado imobilizado e continuará a perder “força” até ficar “fraco” o suficiente para ser considerado morto. Alternativamente, essa pessoa pode ser impactada por um “DV” significativo, resultando em morte imediata, ou experimentar um “DV” reduzido, permitindo que recupere a capacidade de se mover. Em última análise, se a pessoa não for derrubada e estiver consciente da inundação (movendo-se ativamente em direção a um refúgio seguro), ela se deslocará para o refúgio designado. Para facilitar a compreensão, a Tabela 2.8 apresenta o significado das siglas utilizadas pelo LSM.

Tabela 2.8: Siglas utilizadas pelo LSM no contexto das funções ODLF para pessoas

Parâmetro	Descrição
DV	$[\text{profundidade}^{e1} \times \text{corrente}^{e2}]$ em PARU (m^2/s) no tempo t . A predefinição é $e1 = e2 = 1$
PPC	Condição física inicial
PPCC	Condição física crítica
PLTDA	Profundidade de queda mais baixa (m) no tempo t
PHSDA	Profundidade máxima de segurança (m) no tempo t
PDVTCA	DV crítico para a pessoa tombar (m^2/s) no tempo t

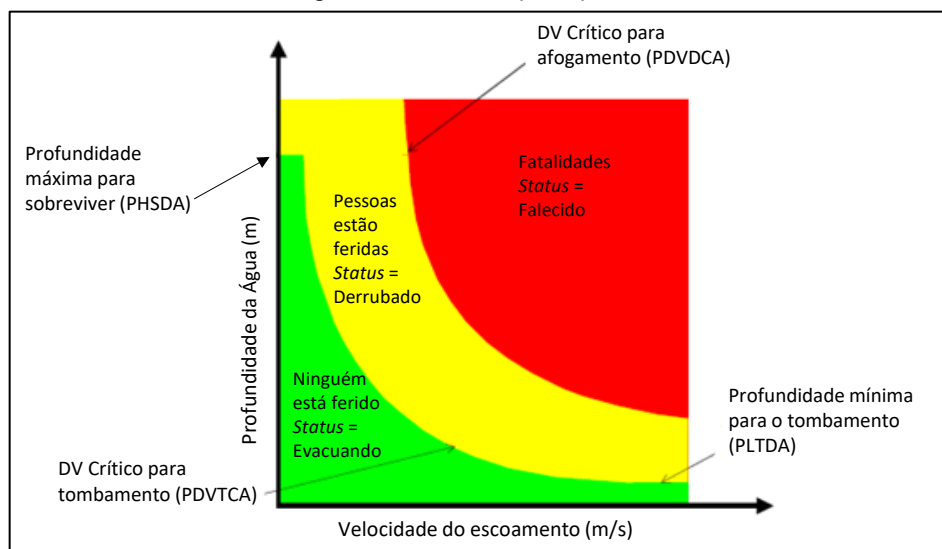
Continuação da Tabela

Parâmetro	Descrição
PDVDCA	DV crítico da pessoa que se está a afogar (m^2/s) no tempo t
PSA	Velocidade de fuga a pé (km/h) no tempo t
PDEUA	Tempo de espera antes da evacuação (edifício - segundos)
PDEVA	Tempo de espera antes da evacuação (veículo - segundos)
PCDVM	DV cumulativa que resulta em exaustão completa

Fonte: Adaptado de BC HYDRO (2006).

O modelo fornece dois critérios pelos quais o estado PARU pode ser definido como falecido, e dois critérios pelos quais o estado PARU será definido como derrubado. Para derrubar o PARU, ele pode experimentar uma profundidade de água de inundação muito grande para caminhar, conforme determinado pela Maior Profundidade Segura do PARU (PHSDA), ou se tornar instável com um “DV” suficientemente alto, conforme determinado pelos Critérios de Derrubamento por “DV” do PARU (PDVTC). É possível ainda que o PARU seja derrubado em águas extremamente rasas, mas de correnteza rápida, nos casos em que a Profundidade Mínima de Derrubamento do PARU (PLTDA) é atingida, conforme Figura 2.14.

Figura 2.14: ODLF para pessoas



Fonte: Adaptado de BC HYDRO (2006).

Para um PARU ser considerado falecido, ele deve experimentar um “DV” local maior que um valor limiar de “DV”, chamado de Valor Crítico de Afogamento (PDVDC), ou ter sua Condição Física (PPC) abaixo de um valor crítico chamado Condição Física Crítica (PPCC). O PDVDC pode ser visto como um limiar que resulta em morte

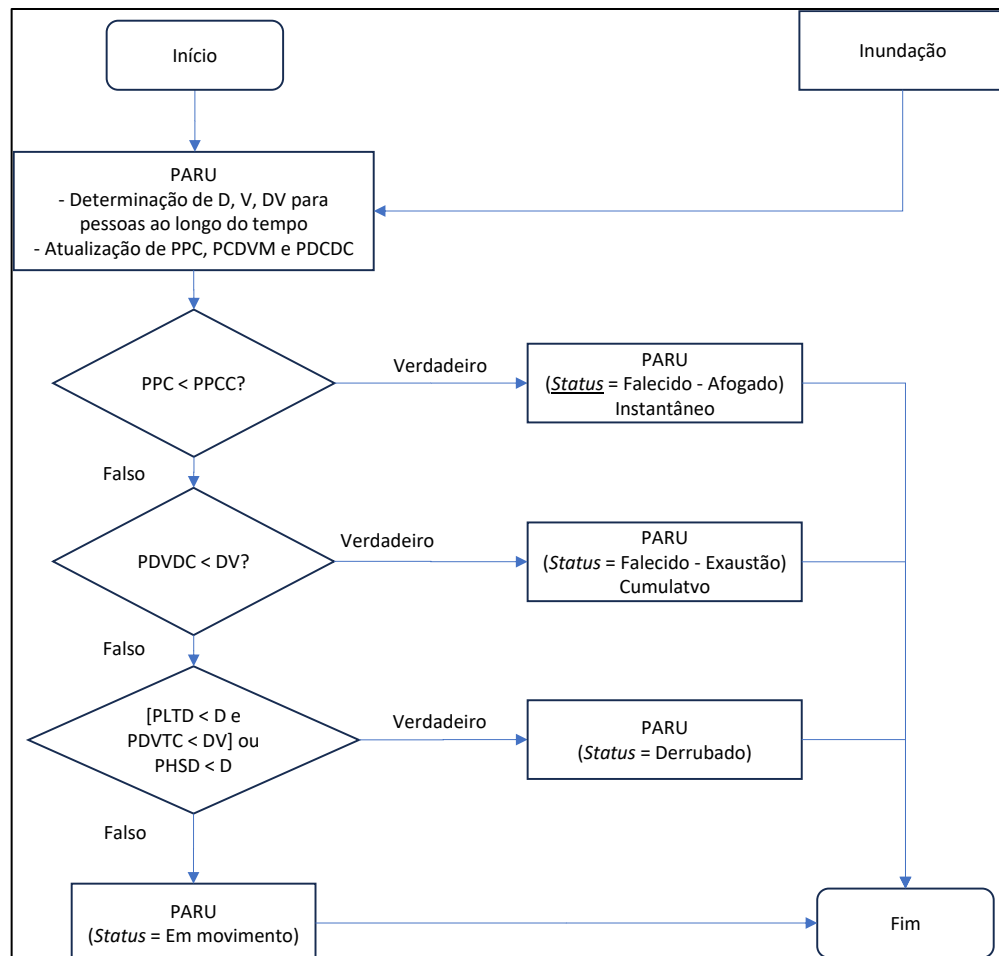
instantânea, pois indica que o indivíduo experimentou um produto de profundidade e velocidade da água de inundação de valor significativo. O critério PPC, por outro lado, representa o esgotamento gradual do PARU devido à exposição contínua à água da inundação. Impactos constantes com detritos ou ceder à hipotermia são exemplos de fatores que influenciam esse critério.

A Figura 2.14 e a Figura 2.15, juntamente com as equações 2.6 e 2.7, descrevem o algoritmo que define como a ODLF generalizada é aplicada a cada PARU.

$$PPC(t+1) = PPC(t) \left[1 - \frac{\frac{dv(t)+dv(t+1)}{2} \cdot \Delta t}{PCDVM(t)} \right] \quad 2.6$$

$$PCDVM(t+1) = PCDVM(t) - RPCDVM(t) \cdot (dv(t) \cdot \Delta t) \quad 2.7$$

Figura 2.15: Fluxograma para atualização do *status* de pessoas com base nos dados de entrada da modelagem hidrodinâmica



Fonte: Adaptado de BC HYDRO (2006).

III. Funções de perda para veículos

O LSM permite especificar um inventário detalhado de veículos. Informações sobre cada tipo de veículo influenciam sua estabilidade em águas em movimento e sua capacidade de passageiros. Normalmente, veículos pesados ou com maior distância do solo são mais estáveis em águas de inundação do que veículos mais baixos ou leves.

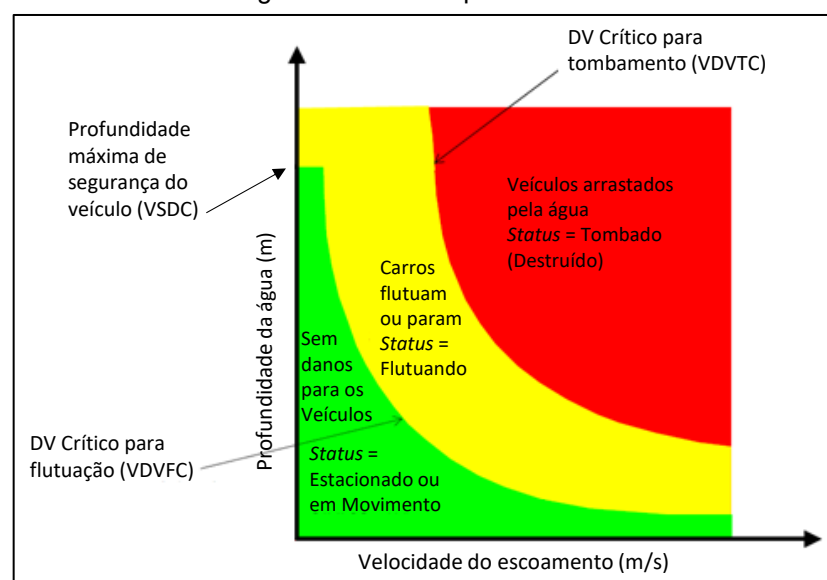
O modelo simula as interações dos veículos com a inundação visando determinar se o estado do veículo se torna “flutuante” ou “tombado” com base na profundidade e velocidade da inundação na localização do veículo. Usando uma versão específica da ODLF, o algoritmo e as equações que definem essa interação são apresentados na Figura 2.16 e na Figura 2.17, e nas Equações 2.8, 2.9 e 2.10. Para facilitar a compreensão, a Tabela 2.9 apresenta o significado das siglas utilizadas pelo LSM.

Tabela 2.9: Siglas utilizadas pelo LSM no contexto das funções ODLF para veículos

Parâmetro	Descrição
DV	[profundidade ^{e1} × corrente ^{e2}] em PARU (m ² /s) no tempo t. A predefinição é e1 = e2 = 1.
TFAF	Tempo até o primeiro alerta (segundos)
IUETA	Tempo de evacuação do edifício (segundos)
VEVT	Tempo de evacuação do veículo (segundos)
VSDC	Crítérios de Profundidade de Segurança do Veículo
VDVFC	DV crítico para veículo flutuante (m ² /s)
VDVTC	DV crítico para o veículo tombor (m ² /s)

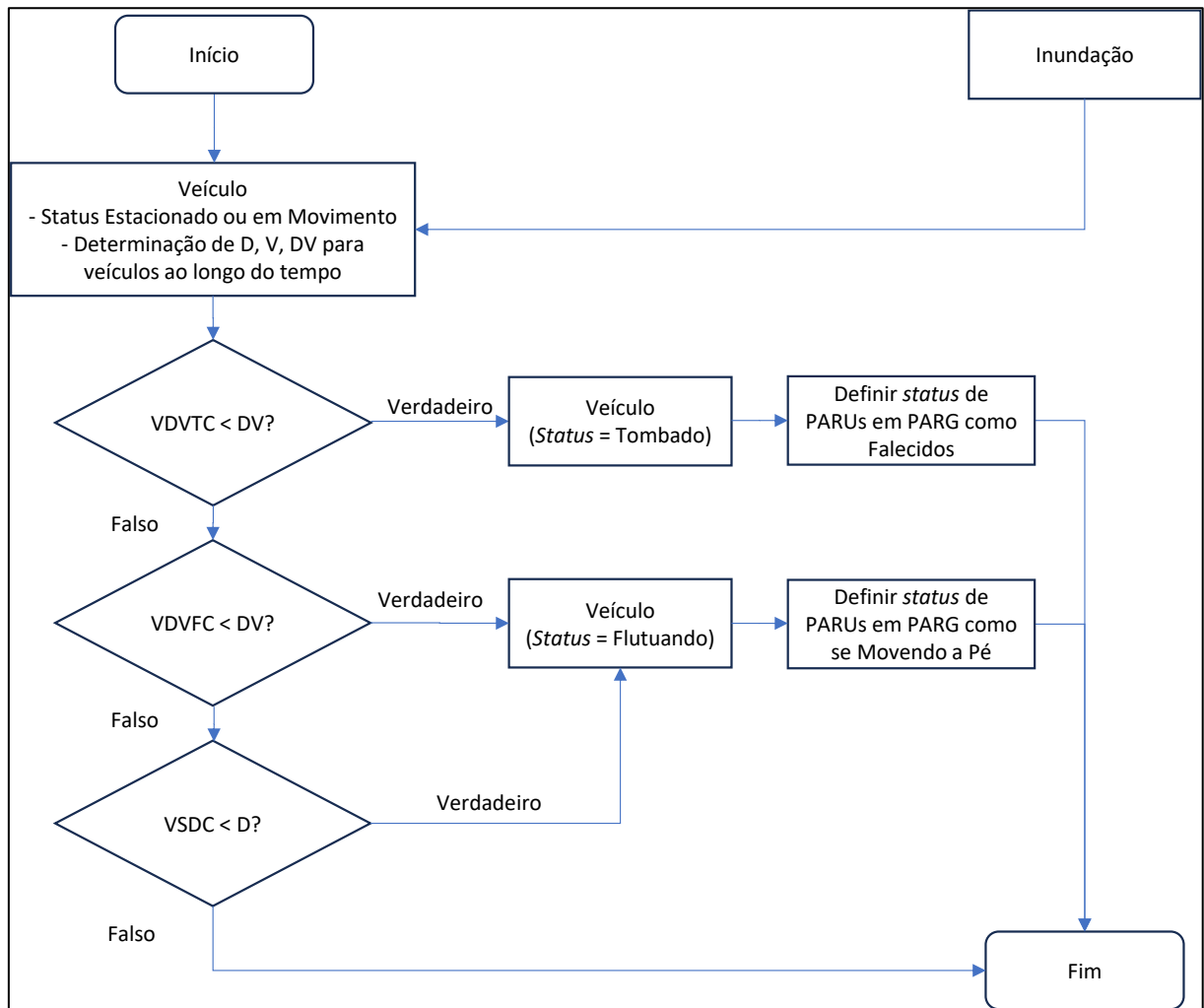
Fonte: Adaptado de BC HYDRO (2006).

Figura 2.16: ODLF para veículos



Fonte: Adaptado de BC HYDRO (2006).

Figura 2.17: Fluxograma para atualização do *status* de veículos com base nos dados de entrada da modelagem hidrodinâmica



Fonte: Adaptado de BC HYDRO (2006).

$$dv(t) > VDVFC \quad 2.8$$

$$dv(t) > VSDC \quad 2.9$$

$$d(t) > VSDC \quad 2.10$$

O veículo é considerado em estado flutuante quando a profundidade e a velocidade da água são suficientes para causar instabilidade e flutuação do veículo ou para parar o motor (Figura 2.16). No caso de tombamento, considera-se que o veículo foi perdido ou destruído, e todas as pessoas dentro dele são consideradas mortas. Quando veículos tombam (ou são perdidos), eles são removidos da rede viária e da simulação,

permitindo que o próximo veículo ocupe o espaço e possa tombor também, aparecendo na visualização como veículos tombando um sobre o outro.

Conforme Figura 2.17, um veículo pode se tornar flutuante de duas maneiras:

- Quando a profundidade local $d(t)$ excede o Critério de Profundidade Segura do Veículo (VSDC); ou
- Quando o produto da profundidade local pela velocidade (dv) excede o Critério de Flutuação do Veículo (VDVFC).

Se o *status* do veículo for definido como flutuante, os PARU dentro do veículo tentarão escapar e se evacuar a pé. Da mesma forma, se o DV exceder um limiar adicional, chamado Critério de Tombamento do Veículo (VDVTC), o veículo será considerado tombado e todos os PARU dentro do veículo serão considerados mortos.

Quanto ao movimento dos veículos, as velocidades das faixas são usadas para determinar até onde cada veículo pode se mover durante um passo de tempo. A velocidade da faixa (V) depende da densidade do tráfego e diminui à medida que a densidade aumenta. A velocidade da faixa é calculada usando a relação linear velocidade-concentração de Greenshields *et al.* (1935), onde a velocidade da estrada é uma função da densidade máxima do tráfego (K_{max}), da densidade atual do tráfego (K) e da velocidade alvo de fluxo livre (V_f):

$$V = V_f \times (1 - K / K_{max}) \quad 2.11$$

Valores padrão típicos são:

- Densidade máxima do tráfego (K_{max}) de 150 veículos/km/faixa;
- Limite inferior para $1 - K / K_{max}$ de 0,251; e
- Velocidade alvo de fluxo livre (V_f) igual ao limite de velocidade publicado para o segmento de estrada em particular.

Os valores típicos para a densidade máxima do tráfego vêm de uma variedade de fontes, incluindo May (1990) e TRB (2000), que mostram que a faixa típica para

densidade de congestionamento é de 115 a 155 veículos por km por faixa ou de 185 a 250 veículos por milha por faixa.

A distância percorrida pelo PARG é determinada pela velocidade de fuga a pé, predefinida, pelo tamanho do passo de tempo, para pedestres, e pelo cálculo de Greenshields para veículos. Isso significa que o passo de tempo pode influenciar os resultados do modelo, e deve ser pequeno o suficiente para descrever com precisão o movimento dos objetos (PARG e veículo) através da zona de risco, permitindo assim a interação com a inundação de forma adequada.

Se o passo de tempo for muito grande em relação à velocidade de movimento, o PARG pode parecer “saltar” ou se mover muito longe dentro de um passo de tempo antes de interagir novamente com a inundação, o que pode afetar as estimativas de perda de vidas. A Figura 2.14 mostra a distância que o PARG percorreria durante um passo de tempo em função da velocidade de viagem e do passo de tempo.

Tabela 2.10: Distância percorrida em um segmento de estrada com base na velocidade de viagem e intervalo de tempo

Velocidade de viagem (m/s)	Passo de tempo (s)	Distância percorrida (m)
1	60	60
2	60	120
3	60	180
4	60	240
5	60	300

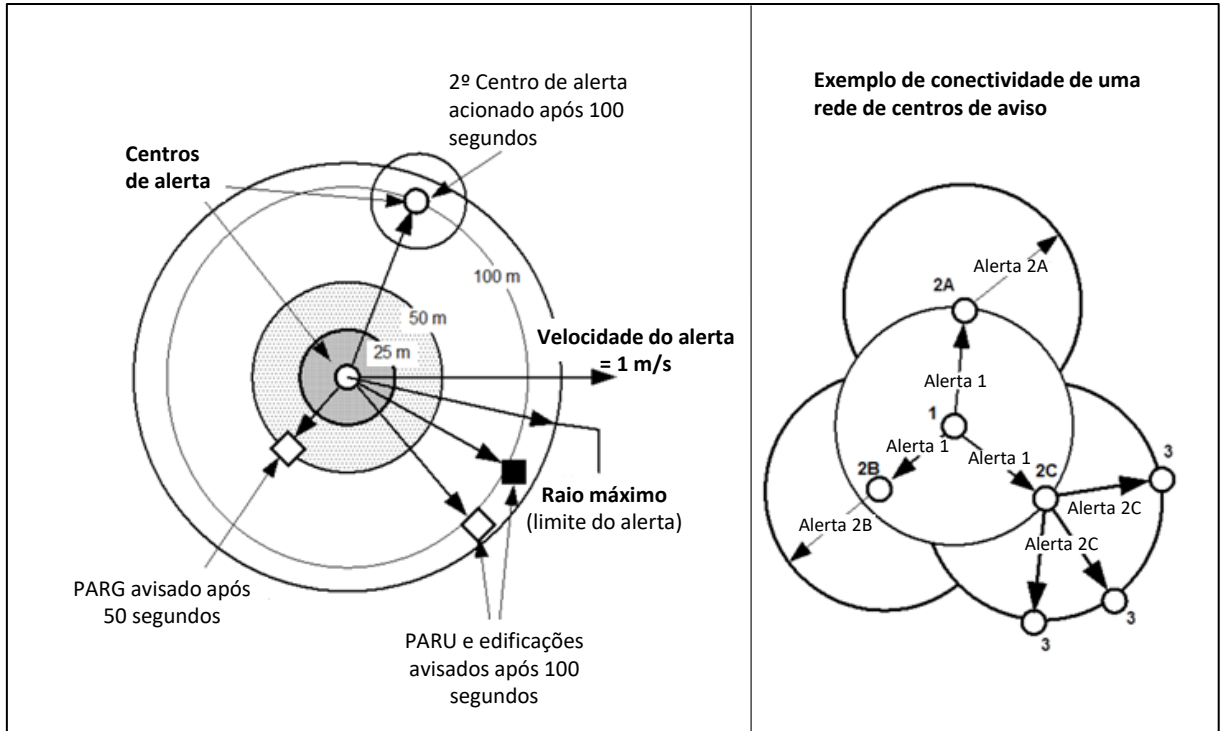
Fonte: Adaptado de BC HYDRO (2006).

Por fim, os centros de aviso estão localizados dentro da zona de risco e emitem um alerta radialmente para os PARUs até que o raio máximo de aviso seja alcançado (Figura 2.18). Esses centros podem se tornar ativos ao detectar a inundação ou podem estar interligados, permitindo que o aviso seja disseminado de centro para centro em cascata, espalhando progressivamente a mensagem por toda a região de interesse.

Além disso, os centros de aviso podem ter um tempo inicial de ativação especificado, tornando-se ativos antes mesmo de detectar a inundação ou receber aviso de outro centro. Cada centro de aviso também pode ter um tempo entre a sua ativação inicial e a disseminação do aviso. Um centro de aviso pode se tornar ativo antes do tempo

inicial especificado, se a onda de inundação chegar mais cedo ou se for avisado por outro centro.

Figura 2.18: Exibição do funcionamento e interação de centros de alerta



Fonte: Adaptado de BC HYDRO (2006).

3 AVALIAÇÃO DOS MODELOS DE PERDAS DE VIDA LIFESIM E LSM EM ESTUDOS DE RUPTURA DE BARRAGENS A PARTIR DO ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM B-I DE BRUMADINHO/MG, BRASIL

3.1 Resumo

A má gestão do risco associado a rupturas de barragens e a ausência de um planejamento de emergência eficaz são evidenciadas pelos recentes incidentes ocorridos no contexto nacional. A utilização de modelos hidrodinâmicos e de estimativa de perdas de vida permite compreender o comportamento das pessoas e identificar as causas das fatalidades em eventos desse tipo. Diante disso, este estudo modela o maior desastre recente do Brasil relacionado à ruptura de barragens, associado à falha da barragem de rejeitos B-I de Brumadinho, utilizando os *softwares* livres LifeSim e LSM para a modelagem de perdas de vida, e o HEC-RAS para a modelagem hidrodinâmica. Os objetivos são representar o evento real e realizar uma análise comparativa dos resultados obtidos nos modelos LifeSim e LSM. Os resultados indicam que o HEC-RAS 2D foi capaz de representar com precisão o alcance da inundação real, com uma aderência de 96,0% em área e diferenças percentuais de 12,8% e 3,8% de superestimação e subestimação, respectivamente, entre as áreas inundadas simuladas e observadas (real). Os tempos de chegada da inundação foram similares aos observados e a estudos anteriores, reforçando a validade do modelo. O LifeSim apresentou uma estimativa de fatalidades (271, valor da mediana) mais próxima do número real de mortes (272), enquanto o LSM apresentou uma estimativa significativamente maior (449). No LSM, a maioria das mortes associadas ao evento real foi atribuída ao colapso de edifícios, destacando o impacto estrutural significativo da onda de lama. No cenário modelado pelo LSM, apenas dez pessoas estavam conscientes do desastre e evacuando, enquanto 16 foram avisadas, mas não evacuaram, refletindo a falta de sistemas de alerta eficazes ou tempo insuficiente para evacuação no evento real. Com relação ao efeito da emissão de alertas antes da ruptura, observou-se uma clara tendência de redução do número de fatalidades à medida que o tempo de antecedência do alerta aumenta. No LifeSim, a mediana das fatalidades diminuiu de 265 (0 min) para 40 (72h), indicando que alertas emitidos com maior antecedência permitem evacuações mais eficazes e seguras. Alertas emitidos mesmo com apenas 5 ou 10 minutos de antecedência já apresentaram uma redução significativa no número de fatalidades, e com uma hora

de antecedência, a mediana das mortes caiu drasticamente para 133, mostrando a importância de um sistema de alerta precoce em funcionamento. O modelo LSM também mostrou uma redução significativa nas fatalidades com a emissão de alertas antecipados, com o número de mortes caindo de 385 sem alerta para 359 com 10 minutos de antecedência e 149 com 15 minutos de antecedência. No entanto, os resultados obtidos no LSM no presente estudo e no estudo conduzido por Lumbroso *et al.* (2021) não foram coerentes entre si e não convergiram com o evento real. Diante disso, concluiu-se que o LifeSim teve um desempenho mais realista na simulação de perdas de vida associadas a inundações no caso da Barragem B-I de Brumadinho.

3.2 Introdução

As barragens desempenham papéis extremamente importantes no controle de inundações, abastecimento de água, geração de energia hidrelétrica, irrigação, navegação, benefícios recreativos e na cadeia produtiva mineral. No entanto, devido ao armazenamento volumétrico e à probabilidade de inundação em decorrência de sua falha, elas representam uma grande ameaça para a população residente a jusante (PENG e ZHANG, 2013).

O rompimento de barragens tem causado um número significativo de inundações destrutivas, resultando em perdas consideráveis de vidas e danos econômicos. Apesar das melhorias na segurança das barragens, impulsionadas pelos avanços tecnológicos e pelo conhecimento aprimorado em engenharia, além de um maior rigor nas construções, não é possível garantir completamente a ausência de riscos. Acidentes ainda podem ocorrer, desencadeados por desastres naturais, ações humanas ou pela deterioração da capacidade estrutural da barragem ao longo do tempo (LI *et al.*, 2019).

Nos últimos anos, ocorreram muitos acidentes graves de rompimento de barragens no Brasil, como as falhas nas barragens Fundão, em Mariana, e B-I, em Brumadinho, nos anos de 2015 e 2019, respectivamente. Desde então, o governo e a população estão cada vez mais atentos à segurança das barragens e aos riscos que ameaçam vidas. Portanto, é extremamente urgente avaliar o risco de perda de vidas em caso de rompimento de barragens, sendo também de grande importância fornecer

contramedidas de gerenciamento de risco correspondentes para as partes interessadas.

Nesse contexto, modelos de perdas de vidas se apresentam como uma ferramenta importante na identificação das causas e circunstâncias que levam às fatalidades em rupturas de barragem, permitindo que sejam desenvolvidas estratégias de prevenção e mitigação de riscos para evitar futuras tragédias.

Para avaliar as perdas de vida relacionadas aos desastres causados pelas inundações, vários modelos e abordagens têm sido propostos e desenvolvidos por pesquisadores ao longo de décadas (SILVA; ELEUTÉRIO, 2019). Dentre eles, destaca-se os modelos baseados em agentes *Life Safety Model* (LSM) da BC Hydro (JOHNSTONE *et al.*, 2005) e o LifeSim (ABOELATA; BOWLES, 2005).

Estudos recentes demonstram a aplicabilidade desses modelos de perdas de vida (LUMBROSO; DAVISON, 2016; KALININA *et al.*, 2021; EL BILALI *et al.*, 2022), no entanto, poucos são os estudos que utilizam validações baseadas em eventos reais (RISHER *et al.*, 2017; SILVA; ELEUTÉRIO, 2019).

Nesse sentido, o presente estudo tem como principal intento restituir o maior desastre recente do país relacionado à ruptura de barragens, que foi o da barragem de rejeitos B-I de Brumadinho, utilizando os *softwares* livres LifeSim e LSM para a modelagem de perdas de vida, e o HEC-RAS para a modelagem hidrodinâmica. Além de representar o evento real, busca-se também realizar uma análise comparativa dos resultados obtidos nos modelos LifeSim e LSM, e avaliar se o número de mortes poderia ter sido reduzido com a emissão de alerta para a população.

3.3 Estudo de caso

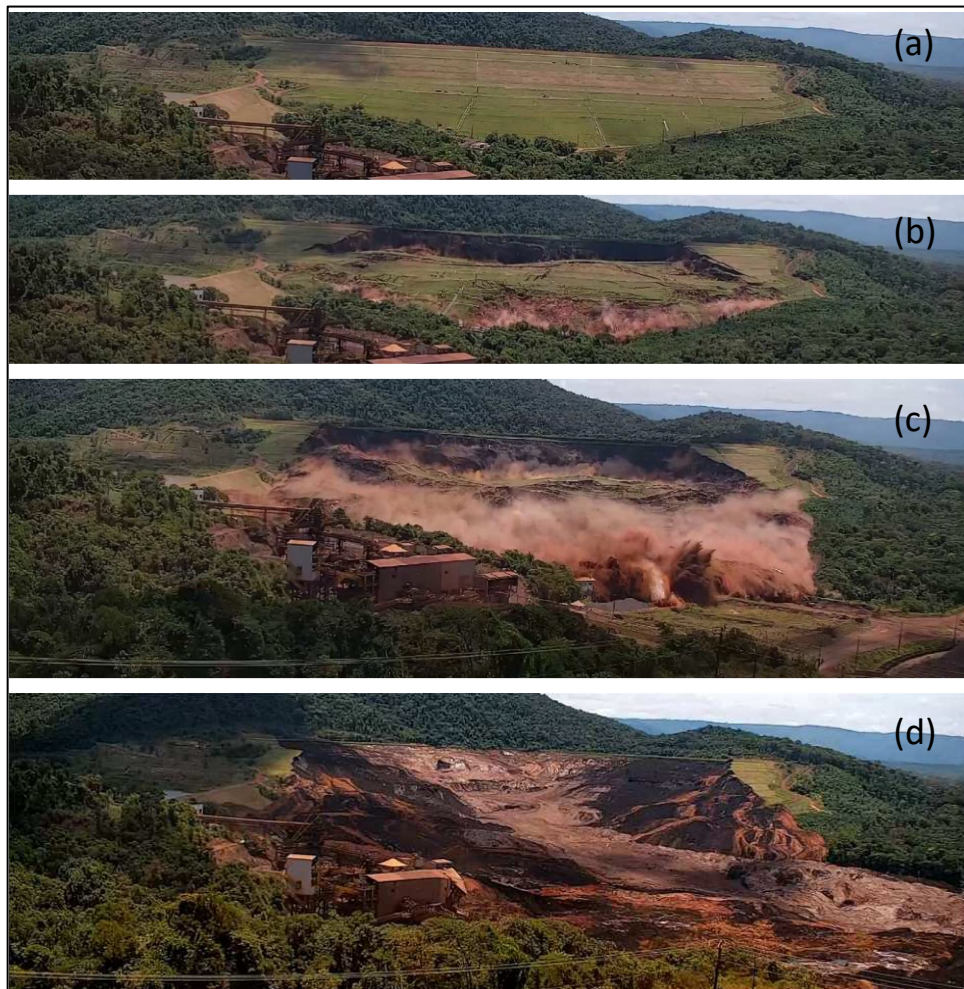
A Barragem B-I se localizava na mina de minério de ferro do córrego do Feijão, de propriedade da Vale, a 9 km a nordeste de Brumadinho, em Minas Gerais, Brasil. As informações apresentadas a seguir são baseadas no relatório do painel de especialistas sobre as causas técnicas do rompimento da barragem, desenvolvido por Robertson *et al.* (2019).

A ruptura da Barragem B-I, que ocorreu às 12h28 do dia 25 de janeiro de 2019, foi um evento súbito e catastrófico, liberando um vasto fluxo de lama que devastou estruturas da mina, incluindo o refeitório e escritórios, além de afetar casas, fazendas, pousadas, pontes e estradas rio abaixo. A ruptura começou de forma abrupta, gerando uma onda de aproximadamente 30 metros de altura, que atingiu primeiro a face a jusante da Barragem VI, antes de invadir a área da planta de processamento e, subsequentemente, o pátio de armazenamento. Esse fluxo destruiu o refeitório e os escritórios a jusante, terminando no rio Paraopeba, perto de Brumadinho.

Uma característica marcante dessa ruptura é o vídeo capturado por duas câmeras. As imagens mostram o início e a evolução da ruptura, desde o recalque inicial da seção central até o desenvolvimento de uma protuberância acima da base da barragem e subsequente erosão rápida, levando ao colapso total.

Na Figura 3.1 tem-se: (a) a deformação inicial observada da parte central da crista; (b) o desenvolvimento completo do rompimento do talude, com rompimento em massa movendo além do pé da barragem, a cerca de 6,7s após a primeira deformação observada na crista; (c) a regressão do rompimento a 18s após a primeira deformação observada; e (d) a regressão final do rompimento a 6 minutos e 25s após a primeira deformação observada.

Figura 3.1: Evolução da ruptura da Barragem B-I.



Fonte: Adaptado de Robertson *et al.* (2019)

Com o rompimento da barragem, aproximadamente 12 milhões de metros cúbicos de rejeitos foram carreados. Desses, uma parcela permaneceu na área da antiga B-I, totalizando cerca de 2 milhões de metros cúbicos. Ao longo da calha do ribeirão Ferro-Carvão até sua confluência com o rio Paraopeba, depositaram-se 7,8 milhões de metros cúbicos, enquanto os 2,2 milhões de metros cúbicos restantes atingiram a calha do rio Paraopeba, propagando-se até o remanso da Usina Hidrelétrica (UHE) de Retiro Baixo, entre os municípios mineiros de Curvelo e Pompéu (MINAS GERAIS, 2024).

Ainda de acordo com o Governo do Estado de Minas Gerais, o evento resultou na perda de 272 vidas; em março de 2023, três vítimas do rompimento, chamadas de “joias”, ainda estavam sendo procuradas pelo Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais. A investigação concluiu que o rompimento foi causado por uma liquefação

estática dos materiais retidos pela barragem, um fenômeno no qual uma perda significativa e súbita de resistência ocorre dentro do talude, levando ao colapso.

Além das perdas humanas, o desastre acarretou impactos significativos e prejuízos ambientais e socioeconômicos. A vegetação, a fauna e outros cursos d'água foram afetados ao longo de centenas de quilômetros, atravessando o território de mais de 20 municípios e gerando um dos maiores desastres socioambientais da história do país. Os efeitos negativos na economia não se limitaram aos municípios da bacia do rio Paraopeba, mas estenderam-se à Região Metropolitana de Belo Horizonte e ao estado de Minas Gerais como um todo.

3.4 Materiais e métodos

Para apresentar a simulação da ruptura da Barragem B-I e de suas consequências, dividiu-se a descrição do estudo em quatro etapas: (i) descrição da área de estudo; (ii) modelagem hidrodinâmica; (iii) cenário de vulnerabilidade e exposição; e (iv) modelagem de perdas de vida.

3.4.1 Descrição da área de estudo

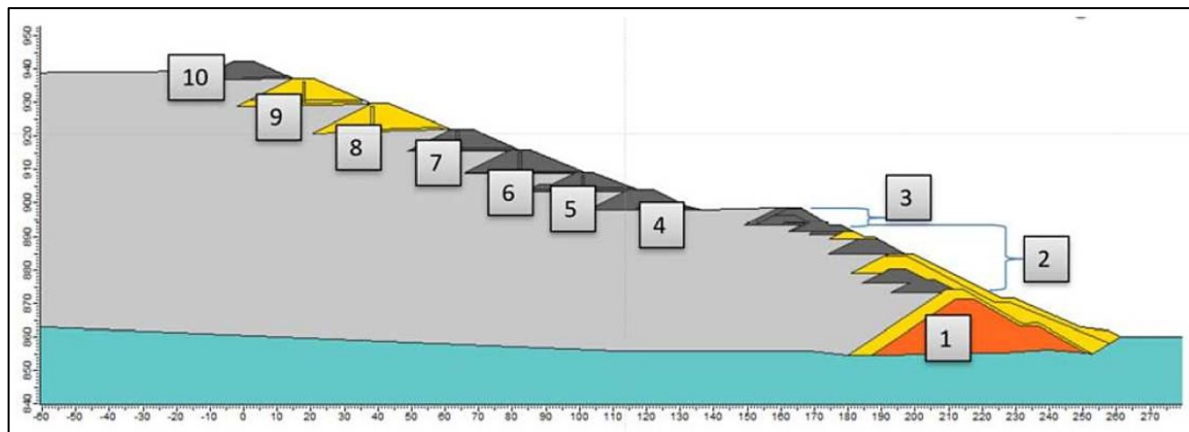
A Barragem B-I (Figura 3.2), construída em 1976 pela Ferteco Mineração pelo método de alteamento a montante (Figura 3.3), foi adquirida pela Vale em abril de 2001. Com altura de 86 metros e comprimento da crista de 720 metros, a barragem destinava-se à disposição de rejeitos do processo de beneficiamento a úmido de minério de ferro. Os rejeitos ocupavam uma área de 250 mil metros quadrados. Segundo a Vale, naquele momento, a barragem encontrava-se inativa, com um projeto de descaracterização em desenvolvimento (MINAS GERAIS, 2024).

Figura 3.2: Vista aérea da B I; à esquerda, barragem B VI



Fonte: Revisão Periódica de Segurança - TÜV SÜD (2018)

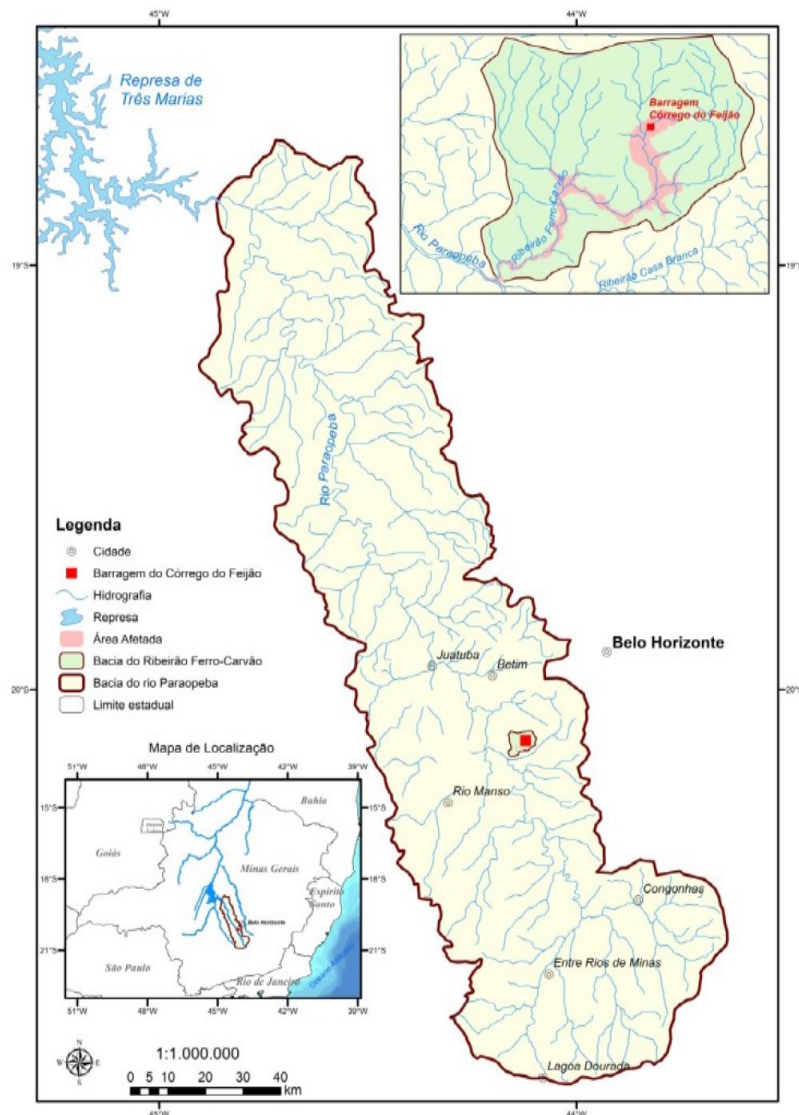
Figura 3.3: Seção transversal da Barragem B1 indicando suas etapas de construção



Fonte: Revisão Periódica de Segurança - TÜV SÜD (2018) *apud* Robertson *et al.* (2019)

A barragem estava localizada no ribeirão Ferro-Carvão (córrego do Feijão), afluente do rio Paraopeba que é um dos mais importantes tributários do rio São Francisco. O rio Paraopeba possui uma área de drenagem de 13.640 km² e o córrego do Feijão, seu afluente pela margem direita, possui área de drenagem de 32,8 km² (CPRM, 2019). As bacias do rio Paraopeba e do córrego do Feijão podem ser observadas na Figura 3.4.

Figura 3.4: Localização da bacia do rio Paraopeba e detalhe do córrego do Feijão



Fonte: CPRM (2019)

3.4.2 Modelagem hidrodinâmica

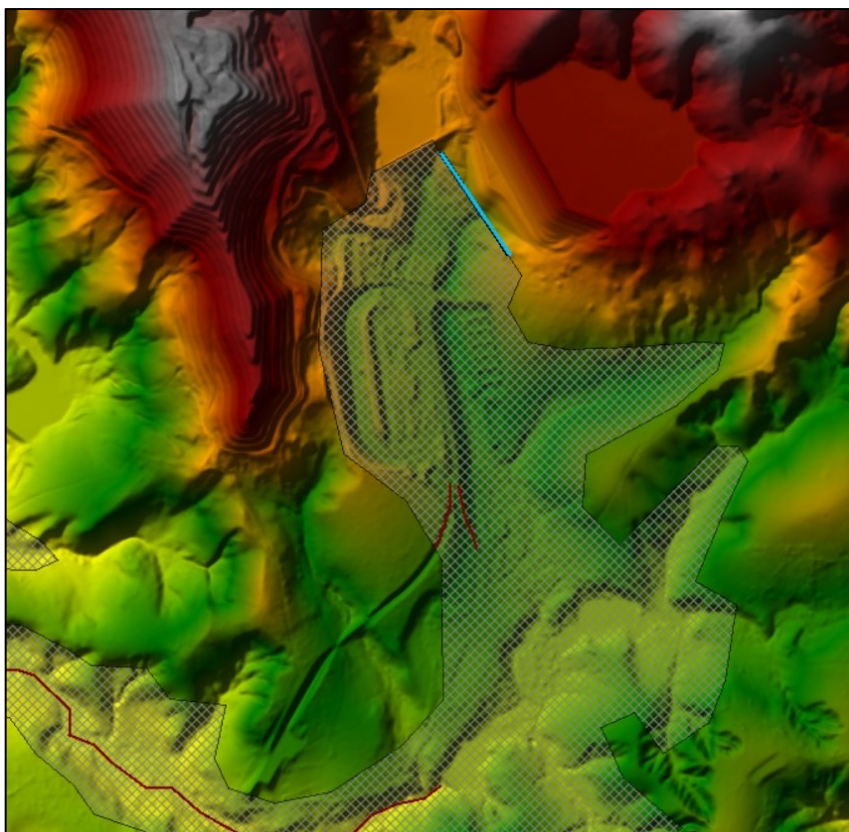
O processo de estimar o número de vítimas em uma inundação deve iniciar-se por meio da aplicação de um modelo hidrodinâmico. O desempenho dessa etapa inicial é fundamental para todas as fases subsequentes do estudo sobre perdas de vidas, uma vez que a precisão dos resultados da simulação da inundação tem papel crucial na credibilidade das estimativas de fatalidades.

Para obter as informações necessárias a esse modelo, foram seguidas as seguintes etapas: (i) caracterização topográfica; (ii) determinação do uso e ocupação do solo das regiões atingidas; (iii) determinação do hidrograma afluente da inundação; (iv) modelo matemático computacional; (v) reologia; e (vi) condições de contorno.

A simulação da ruptura da B-I se deu por meio da utilização do programa HEC-RAS 2D, em sua versão 6.4. Capaz de simular uma ampla gama de escoamentos hiperconcentrados, o programa também incorpora escoamentos não newtonianos de lama e detritos, além do deslocamento de materiais granulares.

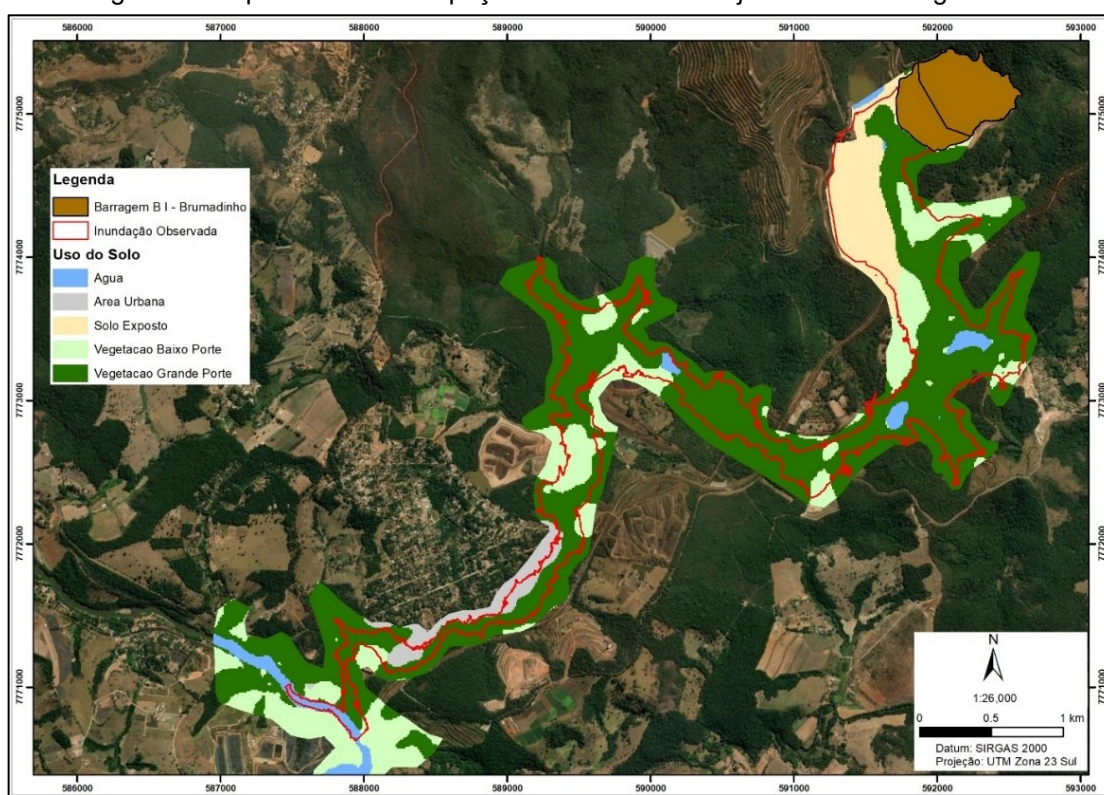
A região de interesse definida para o presente estudo de ruptura da B-I possui cerca de 9,2 km de extensão, a jusante da estrutura, abrangendo trechos fluviais, inseridos na bacia federal do rio São Francisco, do córrego Samambaia e do córrego do Feijão, até sua intersecção com o rio Paraopeba. Para a devida representação geomorfológica da região a jusante do barramento, a planície de inundação foi representada por uma malha computacional de 20m x 20m, e o talvegue principal foi objeto de refinamento de malha por meio da aplicação de *breaklines* (recurso do *software* de detalhamento) com uma malha de 15m x 15m. A base topográfica utilizada para o desenvolvimento do estudo de ruptura hipotética foi gerada a partir de um Modelo Digital de Terreno (MDT) com resolução espacial de aproximadamente 3 m e resolução radiométrica de 32 Bits, tipo *floating point*, produzido via aerolevanteamento a laser em 2016, conforme Figura 3.5.

Figura 3.5: Detalhamento da malha 2D do HEC-RAS



O mapeamento de uso e ocupação do solo das áreas de interesse (Figura 3.6) se baseou na interpretação visual de imagens digitais orbitais, de forma a extrair informações dos alvos da superfície terrestre com base nos padrões espectrais e nos elementos de fotointerpretação: textura, forma, tamanho, tonalidade, cor e sombras. Foi realizado um processo de classificação manual (vetorização em tela) das diferentes feições observadas nas imagens disponíveis, em escala de observação de 1:5.000, adotando como classes alvo os diferentes tipos de uso e ocupação do solo identificados.

Figura 3.6: Tipos de uso e ocupação do solo no vale a jusante da Barragem B-I.



Os valores de coeficiente de Manning considerados foram: floresta: $n = 0,16$; pastagem: $n = 0,05$; áreas mineralizadas: $n = 0,03$; e construções: $n = 0,10$. É válido salientar que os valores de coeficiente de Manning adotados estão de acordo com as recomendações apresentadas pelo *Natural Resources Conservation Service* (NRCS, 2016).

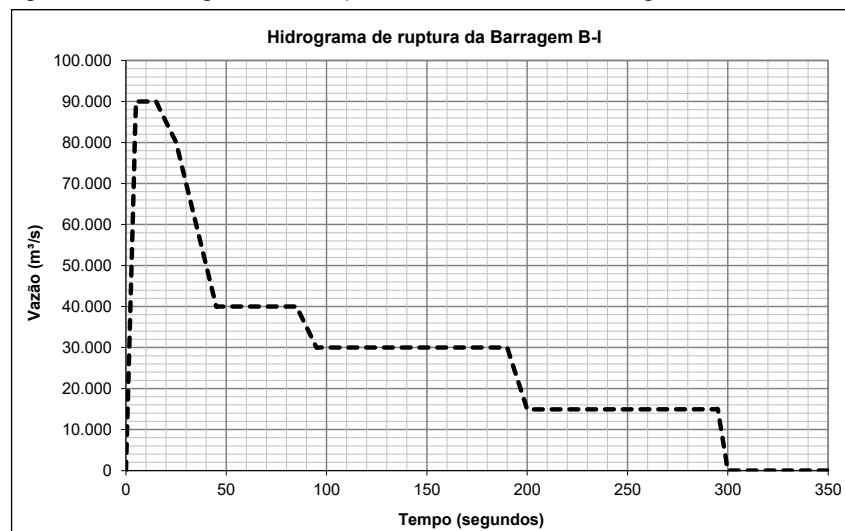
Como condição de contorno de montante, considerou-se o hidrograma de ruptura proposto por Lumbroso *et al.* (2021). O hidrograma em questão considera um volume mobilizado de aproximadamente $9,7 \times 10^6 \text{ m}^3$ e atinge uma vazão de pico de 90.000

m³/s dentro de 5 segundos. A forma do hidrograma foi baseada em informações do relatório do painel de especialistas (ROBERTSON *et al.*, 2019), que traz relatos de que a barragem falhou progressivamente, e em um vídeo de alta qualidade da ruptura, em que é possível observar a velocidade em que o fluxo de lama se propagou.

Embora seja evidente que o hidrograma em questão não apresenta a feição típica de um hidrograma de ruptura (Figura 3.7), especialmente em razão da presença de patamares, decidiu-se utilizá-lo pelo fato de que, conforme Lumbroso *et al.* (2021), sua aplicação gerou resultados muito próximos à realidade do evento de ruptura.

A condição de contorno de jusante, por sua vez, foi assumida como a profundidade normal.

Figura 3.7: Hidrograma de ruptura utilizado na modelagem hidrodinâmica



Fonte: Adaptado de Lumbroso *et al.* (2021)

O volume mobilizado da barragem de rejeitos de Brumadinho assumiu comportamento não newtoniano, e o deslizamento de lamas resultante decorreu da liquefação estática dos rejeitos da barragem (ROBERTSON *et al.*, 2019). Diante disso, para representar adequadamente a propagação do volume mobilizado, adotou-se o modelo Bingham plástico, que caracteriza propriamente os escoamentos de rejeitos liquefeitos.

As três entradas para a construção do modelo Bingham no HEC-RAS 2D são: a concentração volumétrica, a tensão de escoamento e a viscosidade do fluido. Para fins de comparação, a seleção desses parâmetros foi baseada nos estudos conduzidos por Lumbroso *et al.* (2021):

- Concentração volumétrica: Lumbroso *et al.* (2021) consideram um valor de 1.800 kg/m³ adequado para a massa específica do volume mobilizado. A partir da massa específica da mistura, é possível deduzir a concentração volumétrica utilizando a seguinte equação: $r = r_w + (1 + (2,65 - 1)) * C_v$, em que “ ρ ” denota a massa específica da mistura em kg/m³, “ ρ_w ” denota a massa específica da água em kg/m³ e “ C_v ” denota a concentração volumétrica. O cálculo aponta uma concentração volumétrica de 48,5%, considerando uma massa específica de 1.000 kg/m³ para a água.

O valor condiz com os resultados obtidos por Martínez-Aranda *et al.* (2022), em que se menciona que o volume mobilizado era composto por água, uma fração de areia mineral (38%) e uma fração fina (62%), dotada principalmente de mineral silte-argiloso e partículas de metais pesados, e que o teor inicial de água foi estimado em cerca de 50% em volume.

Diante disto, considerou-se a concentração volumétrica de 50%. Destaca-se, contudo, como enfatizado por Gibson *et al.* (2021), a inserção dos parâmetros de tensão de escoamento (τ_y) e viscosidade dinâmica (μ) como valores inseridos pelo usuário, que fazem com que o modelo HEC-RAS 2D não seja sensível ao parâmetro “ C_v ”, já que ele não é utilizado para cálculo desses parâmetros;

- Viscosidade do fluido de Bingham: Foi adotado o valor de 100 kg/m.s, segundo Lumbroso *et al.* (2021). Esse valor foi adotado, apesar de se contrapor a estudos anteriores (LIGIER, 2020), com o objetivo de se representar melhor o evento ocorrido. Em estudos futuros, recomenda-se a tratativa das incertezas associadas a esse parâmetro segundo Melo (2022), o que não foi foco do presente estudo;

- Tensão de escoamento: Lumbroso *et al.* (2021) testaram uma faixa extensa de valores para a variável em questão, entre 400 e 4.000 N/m², e concluíram que o intervalo entre 750 e 1.000 N/m² resultou em tempos de chegada da lama ao rio Paraopeba mais coincidentes com os relatados. Para o presente estudo, foi feita uma análise de sensibilidade, que apontou que a faixa de valores entre 1.100 e 1.140 N/m² é a que apresentou resultados mais concordantes com o evento ocorrido. Optou-se por adotar o valor de 1.100 N/m², por conferir ao modelo um tempo de chegada mais próximo do trabalho de Lumbroso *et al.* (2021).

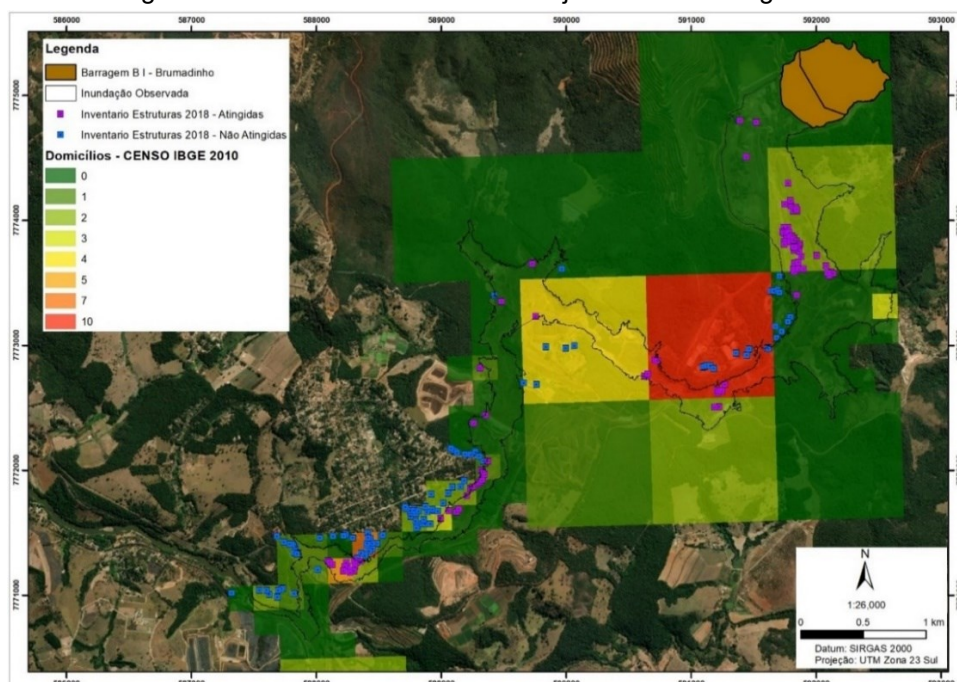
3.4.3 Cenário de vulnerabilidade e exposição

No que diz respeito a informações referentes às estruturas contidas na área de risco, utilizou-se o levantamento cadastral realizado em 2018 da região a jusante da Barragem B-I, realizado a época para subsidiar o PAEBM da estrutura.

Para avaliar o inventário realizado, valeu-se da grade estatística do IBGE e foram obtidas as seguintes informações: (i) componentes da grade estatística interceptados pela mancha de inundação; (ii) número de domicílios em cada componente da grade estatística interceptado pela mancha; e (iii) percentual da área atingida pela mancha de inundação de cada componente da grade estatística.

A partir do produto do número de domicílios em cada componente da grade estatística pelo percentual de área impactada, foi obtido o número estimado de domicílios atingidos pela mancha de inundação, sob a hipótese de distribuição homogênea dos domicílios. Esse número estimado foi, então, comparado ao número de domicílios mapeados no inventário, obtendo-se assim uma base de comparação. Incluiu-se na avaliação, também, o número de estruturas consideradas por Lumbroso *et al.* (2021). A Figura 3.68 apresenta a grade estatística do IBGE de 2010 e o inventário de estruturas realizado em 2018.

Figura 3.8: Inventário de estruturas a jusante da Barragem B-I.



Fonte: autoria própria.

É importante destacar algumas limitações na avaliação mencionada. Os dados da grade estatística do IBGE remontam a 2010, enquanto o levantamento de estruturas foi conduzido em 2018. Adicionalmente, a grade estatística é produto de uma metodologia desenvolvida pelo IBGE em 2015 para desagregar informações dos setores censitários nos componentes das grades, utilizando métodos de sensoriamento remoto (baseados em árvores de decisão). Esses métodos, por sua vez, apresentam limitações que comprometem sua aplicação em validações precisas quanto à quantidade de estruturas domiciliares.

De fato, constatou-se que, nos componentes da grade estatística onde não há domicílios, o número de estruturas inventariadas se aproximou de zero, indicando coerência entre o mapeamento e os dados da grade. Nas grades com um número considerável de domicílios, mas com uma área impactada pela inundação pequena (e, portanto, um número estimado de estruturas atingidas reduzido), o número de domicílios registrados no inventário impactados permaneceu consistente. Por último, nas grades com um elevado número de domicílios e uma grande área afetada, apesar da coerência na distribuição espacial das estruturas entre as duas fontes de dados, o quantitativo obtido da grade estatística do IBGE foi sempre muito inferior ao inventário realizado.

Em relação aos dados sintéticos, o inventário identificou 105 estruturas atingidas pela inundação (44 domicílios, 1 pousada, 52 estruturas da Vale e 8 estabelecimentos agropecuários), enquanto a estimativa para a grade estatística foi de 34 domicílios. Em relação ao estudo de Lumbroso *et al.* (2021), 48 estruturas foram consideradas impactadas (27 domicílios e 21 estruturas da Vale). Comparando-se o número de domicílios, há coerência entre os dados do IBGE e do inventário realizado. A diferença quantitativa pode ser justificada pelo crescimento populacional da região desde 2010. O quantitativo de estruturas adotado por Lumbroso *et al.* (2021), no entanto, foi considerado subestimado.

Para a modelagem de perdas de vida da barragem B-I, Lumbroso *et al.* (2021) consideraram que havia 200 pessoas na cantina/refeitório dos funcionários da Vale, 10 pessoas em cada um dos edifícios adjacentes da Vale e uma média de 2 pessoas em cada uma das demais edificações residenciais, estimativa que, segundo o autor,

se baseou em informações veiculadas na mídia, estimando uma margem de erro de cerca de 25%.

Conforme notícias veiculadas na mídia, estimava-se que havia 35 pessoas na Pousada Nova Estância (SINDSEMA-MG, 2019), e cerca de 200 funcionários da Vale no refeitório (PARREIRAS; ADLER, 2019). Segundo o presidente da Vale a época, Fábio Schvartsman, a mina tinha 613 empregados diretos e 28 terceirizados que se alternavam em três turnos, e estimou-se que 300 funcionários estavam no local no momento do rompimento (VEJA, 2019).

Diante de tais notícias, constata-se que, de forma geral, as considerações de Lumbroso *et al.* (2021) são coerentes. Para o presente estudo, considerou-se, também, 200 pessoas na cantina/refeitório dos funcionários da Vale. Contudo, para os edifícios adjacentes da Vale, levando em consideração o relato de que 300 funcionários estavam no local no momento do rompimento, dividiu-se uma população de 100 pessoas entre os edifícios, resultando em aproximadamente 2 pessoas por edifício. Além disso, considerou-se que havia 35 pessoas na pousada Nova Estância.

Por fim, obteve-se, a partir da grade estatística do IBGE de 2010, uma média de 2,84 pessoas por domicílio na região afetada pela inundação. Tendo em vista que a ruptura da barragem ocorreu às 12h28, em horário comercial, imagina-se que o número de pessoas nos domicílios tenha sido reduzido. Por esse motivo, assim como Lumbroso *et al.* (2021), considerou-se também 2 pessoas por domicílio.

3.4.4 Modelagem de perdas de vida

Para desenvolver a modelagem de perdas de vida no LifeSim e no LSM, é necessário dispor dos seguintes dados: (i) modelo hidrodinâmico do evento a ser simulado, neste caso, a ruptura da Barragem B-I; (ii) dados do inventário de estruturas e da população; (iii) sistema viário utilizado para a evacuação da população, com o deslocamento das pessoas para fora das áreas de risco; e (iv) locais seguros para destino esperado daqueles que estão ameaçados pelas inundações.

O modelo hidrodinâmico utilizado foi caracterizado no item 3.4.2, e o inventário de estruturas e populacional, no item 3.4.3. Além das informações apresentadas nessas

seções, é preciso ainda estabelecer outros os aspectos, descritos nos subitens subsequentes (3.4.4.1 - LifeSim, 3.4.4.2 - LSM e 3.4.4.3 - Cenários simulados).

3.4.4.1 LifeSim

No *software* LifeSim, é preciso definir o material de construção das edificações. Diante disso, adotou-se alvenaria para os domicílios (RES1-1SNB - residência unifamiliar com 1 andar) e para a pousada (RES4 - alojamento temporário com 2 andares), e concreto para os prédios da Vale (COM4 - escritório comercial com 2 andares). É essencial especificar, ainda, a profundidade das fundações, que foi estabelecida em 1 m, bem como as alturas do piso térreo e acima do piso térreo, ambas definidas como 2,74 m, seguindo os padrões adotados pelo *software*. Essas medidas são fundamentais para estabelecer a resistência de cada edificação ao escoamento.

Com relação à população, a fração das pessoas com dificuldade de mobilidade é definida com base em sua idade. O *software* permite apenas duas possibilidades: superior a 65 anos, com uma taxa de 22,6%, ou inferior a 65 anos, com uma taxa de 5,10%. Diante disto, foram considerados 2 cenários para todas as simulações empreendidas: um primeiro, em que toda a população tem idade inferior a 65 anos, e um segundo considerando toda a população com idade superior a 65 anos.

Conforme descrito no item 2.3.1, a estabilidade das estruturas, dos veículos e dos seres humanos é estabelecida por funções de estabilidade limite que variam conforme as características de cada “objeto”, e levam em consideração, basicamente, a profundidade e a velocidade do escoamento.

A dinâmica da evacuação é representada pelo modelo de transporte de Greenshields *et al.* (1935), que ilustra como a densidade de tráfego e a capacidade da via influenciam a velocidade dos veículos. Para o estudo atual, ajustou-se o percentual de pessoas que utilizaram veículos para evacuar em diferentes cenários, considerando um número médio de 3 pessoas por veículo. Assim, o número de veículos incluídos na simulação para a evacuação através das vias registradas no modelo é estabelecido pela porcentagem de pessoas que evacuaram por esse meio e pelo número médio de pessoas em cada veículo.

Adicionalmente, o *software* oferece a possibilidade de modificar várias informações, tais como: a velocidade dos pedestres; a proporção de veículos baixos *versus* altos; a fração da população que muda de rota durante congestionamentos; a profundidade a partir da qual as pessoas param de evacuar dos edifícios; e a fração da população que sabe nadar. Embora tenham sido mantidos os valores padrão do *software*, o percentual de pessoas que sabe nadar foi ajustado para 0%, considerando-se a presença de um fluxo de lama, conforme detalhado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Parâmetros para a evacuação

Condicionante	Unidade	Valor
Velocidade dos pedestres	m/s	0,45
Fração de veículos baixos vs. altos	%	50,0
Fração da população que altera a rota	%	80,0
Profundidade de não evacuação das estruturas	m	2,0
Fração da população que sabe nadar	%	0,0

Para uma compreensão abrangente do processo de evacuação e das estratégias de resgate da população, são essenciais informações sobre a rede viária e os locais seguros. Esses dados foram adquiridos através da análise de imageamento aéreo e do OpenStreetMap (OSM), respectivamente. Os locais seguros, também conhecidos como pontos de encontro, foram estabelecidos em elevações superiores à profundidade máxima de inundação prevista ao final de cada rota de evacuação.

Na situação da ruptura da Barragem B-I, não houve uma identificação prévia nem um alerta da falha. Portanto, ao representar o caso real, não foram incluídos tempos para a identificação do perigo, para a notificação aos órgãos responsáveis, nem para a emissão e difusão do alerta. Esse cenário foi denominado como “sem evacuação”.

Em outros cenários analisados, explorou-se a possibilidade de redução no número de mortes caso um alerta tivesse sido emitido. Nessas situações, o foco foi apenas no tempo para iniciar a mobilização, calculado a partir de diferentes momentos imediatamente após a emissão do alerta (não se considerou o tempo de difusão do alerta). A descrição desse tempo na mobilização foi baseada em uma das curvas propostas por Mileti e Sorensen (2017c), considerando a baixa percepção do risco e a preparação insuficiente da população para emergências, como descrito no item 2.3.1.

Além disso, o LifeSim utiliza a técnica de amostragem de Monte Carlo, escolhendo, de forma aleatória, diversos valores dos parâmetros do modelo, como a taxa de fatalidade e o tempo para a mobilização. Desse modo, o modelo gera uma estimativa probabilística de fatalidades.

3.4.4.2 LSM

No LSM, por sua vez, é necessário definir o estado estrutural inicial das estruturas (BSS); o estado estrutural crítico (BSSC); o produto crítico das variáveis profundidade e velocidade para a destruição inicial das edificações (BDVCA); e a capacidade de resistir a danos contínuos (BCDVM). As informações a seguir são baseadas em BC HYDRO (2006).

O LSM simula a degradação de edifícios com exposição contínua à inundação usando a variável BSS. No entanto, nenhuma das pesquisas disponíveis atualmente descreve a taxa para a qual a resistência dos edifícios diminui com a exposição a inundações. Dada a falta de evidências qualitativas sobre o declínio da resistência estrutural dos edifícios, o uso dos parâmetros BSS, BCDVM e RBCDVM é subjetivo.

Considerou-se, portanto, a destruição de um edifício com base em critérios de DV, permitindo a remoção da função de declínio BSS. Para tanto, adotou-se 1,0 para o seu valor padrão, 0,0 para o RBCDVM e definiu-se um valor alto para o BCDVM (10^9). Ao fornecer um valor alto para BCDVM, essencialmente descreve-se uma estrutura que não exibe degradação na resistência estrutural do edifício (BSS). Usando esse método, a falha do edifício pode ser modelada com base no critério constante de DV (BDVC).

Os dados utilizados para estabelecer os valores dos critérios de BDVCA possuem algumas lacunas lógicas, uma vez que o DV estimado que destruiu uma estrutura em uma inundação pode ter ocorrido instantaneamente ou ao longo de um período prolongado. Além disso, a percepção de “falha” de uma estrutura pode significar o colapso total do edifício ou a perda de proteção devido a uma falha parcial.

A falha parcial pode implicar que um edifício ainda permaneça de pé, mas perca uma parte de sua estrutura, reduzindo a proteção contra a inundação que seria fornecida

por um edifício totalmente intacto. A falha de uma parede do andar inferior de um edifício de vários andares ainda poderia proporcionar proteção suficiente para as pessoas nos andares superiores.

O valor de BDVCA pode variar dependendo do nível de dano assumido para resultar na falha de um edifício, o que, por sua vez, depende do tipo de construção do edifício e das condições do local. Os valores aproximados para BDVCA são:

- 5,0 m²/s para edifícios mal construídos;
- 10,0 m²/s para edifícios bem construídos de madeira;
- 15,0 m²/s para edifícios bem construídos de alvenaria;
- 20,0 m²/s para edifícios de concreto; e
- 35,0 m²/s para grandes edifícios de concreto.

Para o presente estudo, considerou-se o valor de 15,0 m²/s para as edificações em alvenaria e 20,0 m²/s para as edificações em concreto.

Para os indivíduos no LSM, é preciso definir: a condição física inicial (PPC); a condição física crítica (PPCC); a profundidade mínima de tombamento (PLTDA); a profundidade máxima segura (PHSDA); o produto crítico das variáveis profundidade e velocidade para o tombamento (PDVTCA); o produto crítico das variáveis profundidade e velocidade para o indivíduo se afogar (PDVDCA); e a capacidade de resistir à exposição contínua (PCDVM). As informações a seguir são baseadas em BC HYDRO (2006).

Semelhante à analogia em relação ao declínio do estado estrutural inicial (BSS), o PARU (Unidade de População em Risco) foi modelado com um declínio gradual na condição física com exposição contínua à inundação, conforme definido pela Equação 2.6. A taxa de declínio na PPC do PARU é definida pela Equação 2.7. Assim como no BSS, a variável PPC é uma classificação subjetiva da força, em que:

- PPC = 1,0; condição física média (PARU típico);
- PPC > 1,0; condição física acima da média (PARU extremamente saudável); e
- PPC < 1,0; condição física abaixo da média (PARU doente).

O valor padrão para PPC é 1,0, mas pode ser definido subjetivamente em qualquer valor que melhor represente a condição física das pessoas em risco específicas da área de estudo. Uma faixa recomendada para PPC pode variar entre 0,7 e 1,3. Adotou-se um valor de 1,0.

O parâmetro PPCC define a condição física crítica do PARU. Se a PPC diminuir para um nível abaixo do PPCC, o PARU será considerado morto. O objetivo dos critérios PPC e PPCC é fornecer flexibilidade na determinação da perda de vida do PARU. Os critérios PPCC podem ser assumidos como 0,0 para PARUs saudáveis, mas podem ter um valor mais alto para PARUs mais fracos (jovens, idosos ou deficientes). O padrão para PPCC deve ser considerado 0,0, sendo esse o valor assumido.

Assim como nos critérios para a edificação, pode-se não usar o declínio da PPC como um método de determinação da perda de vida e, em vez disso, usar apenas um DV crítico para determinar a perda de vida. Para isso, o RPCDVM pode ser definido como 0,0 para não haver alteração na taxa de PCDVM, com o PCDVM sendo fornecido um valor alto ($10,0^9 \text{ m}^2$) para o PCDVM de forma a garantir que a PPC não decline. Essa foi a estratégia adotada, sendo utilizados os valores mencionados.

A profundidade máxima segura do PARU (PHSDA) é um parâmetro físico baseado na altura do PARU. Essa variável define a profundidade da água, dada uma velocidade baixa o suficiente, na qual um PARU pode atravessar a água. Tipicamente, essa profundidade estaria aproximadamente na altura do peito e variaria para o PARU com base no sexo e idade de adultos e crianças, além da condição física assumida do PARU.

A Tabela 3.2 descreve as alturas típicas dos norte-americanos com base em estatísticas do Centro de Controle e Prevenção de Doenças do Departamento de Saúde e Serviços Humanos dos EUA. A PHSDA é aproximada em 70% da altura do PARU. Diante disso, considerou-se um valor de 1,10 m com base na referida tabela.

Tabela 3.2: Alturas típicas dos norte-americanos, com base em estatísticas do Centro de Controle e Prevenção de Doenças do Departamento de Saúde e Serviços Humanos dos EUA

Sexo	Idade	Altura (m) por percentil			PHSCA (m) por percentil		
		95%	50%	5%	95%	50%	5%
Homem	>17	1,86	1,74	1,64	1,30	1,22	1,15
Mulher	>17	1,73	1,62	1,52	1,21	1,13	1,06
Homem	15-17	1,83	1,71	1,59	1,28	1,19	1,11
	6-14	1,51	1,40	1,28	1,05	0,98	0,90
	<6	1,10	1,03	0,95	0,77	0,72	0,67
Mulher	15-17	1,72	1,61	1,52	1,20	1,13	1,06
	6-14	1,47	1,37	1,28	1,03	0,96	0,89
	<6	1,10	1,02	0,94	0,77	0,71	0,66

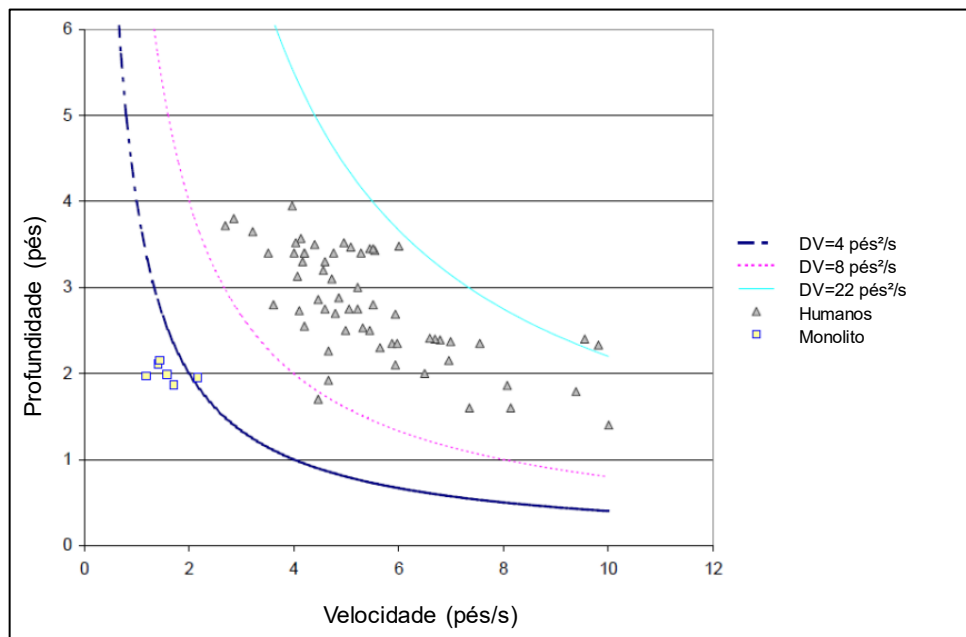
Fonte: Adaptado de BC HYDRO (2006).

Em estudos futuros, sugere-se como uma possibilidade de melhoria a revisão do valor adotado, especialmente em relação à realidade da região de Brumadinho/MG, onde as características populacionais podem apresentar diferenças significativas em comparação com as norte-americanas.

A profundidade mínima de derrubamento do PARU (PLTDA) é definida como a profundidade da água para a qual um PARU pode permanecer de pé com segurança, sem ser derrubado, independentemente da velocidade da água. Uma revisão da estabilidade de um monólito de concreto e de humanos em água em movimento foi realizada por Abt *et al.* (1989). Esses testes foram analisados mais detalhadamente em outras pesquisas (RESCDAM, 2002).

Os testes mostraram que o monólito era estável em combinações de DV menores do que em humanos, provavelmente devido à capacidade dos humanos de ajustar sua postura para manter o equilíbrio. No entanto, o PLTDA fornece um limite inferior para a estabilidade. Conforme mostrado na Figura 3.9, o critério de estabilidade para humanos parece corresponder a um limite de DV entre 8 e 22 pés²/s ou entre 0,74 e 2,04 m²/s. Para velocidades práticas de inundação, a profundidade ao longo dessa curva de DV estaria na faixa entre 0,9 e 2,1 pés, ou 0,27 e 0,64 m. Adotou-se um valor de 2,0 pés ou 0,61 m.

Figura 3.9: Dados dos testes de estabilidade em humanos



Fonte: Adaptado de BC HYDRO (2006).

O DV crítico para um PARU tombar (PDVTCA) também pode ser determinado com base nos estudos empreendidos, que mostraram que a estabilidade dos humanos adultos nos testes variou de aproximadamente $0,74 \text{ m}^2/\text{s}$ ($8 \text{ ft}^2/\text{s}$) a $2,04 \text{ m}^2/\text{s}$ ($22 \text{ ft}^2/\text{s}$). Considerou-se no presente estudo um valor de $1,0 \text{ m}^2/\text{s}$.

Com dados limitados disponíveis sobre quais combinações de profundidade e velocidade da inundação poderiam afogar instantaneamente um PARU, a variável PDVDCA é subjetiva. Considerou-se, então, um valor de $4,0 \text{ m}^2/\text{s}$.

Quanto aos veículos, é preciso estabelecer alguns critérios, a saber: a profundidade de segurança do veículo (VSDC); o produto crítico das variáveis profundidade e velocidade para que o veículo flutue (VDVFC); e o produto crítico das variáveis profundidade e velocidade para o tombamento (VDVTC). As informações a seguir são baseadas em BC HYDRO (2006).

O critério de profundidade segura para veículos (VSDC) indica o ponto em que um veículo está suficientemente submerso a ponto de o motor não conseguir operar. Uma visão simplista desse critério para veículos de passageiros seria que, uma vez que o assoalho do veículo está inundado ou o cano de escape está suficientemente submerso, o veículo torna-se inutilizável. Além dessa profundidade, o veículo pode

tornar-se instável para dirigir ou pode desligar. Essa profundidade é geralmente em torno de 0,3 m para veículos de passageiros típicos e até 1,0 m para veículos maiores, como caminhões de bombeiros (ARR, 1997). Utilizou-se o valor de 0,3 m.

Os critérios de profundidade e velocidade usados para avaliar se um veículo está flutuando definem o limite para o qual um veículo se torna instável, e são chamados de DV crítico para veículo flutuante (VDVFC). Os critérios de instabilidade podem ser considerados na faixa de 0,6 a 0,7 m²/s (ARR, 1997). Adotou-se o valor de 0,6 m²/s. Por fim, adotou-se um DV crítico para o veículo tombar (VDVTC) de 0,8 m²/s.

Informações referentes à rede viária e aos locais seguros são fundamentais para se compreender o processo completo de evacuação e as táticas de salvamento da população e foram obtidas com base na análise do imageamento aéreo e do OSM (*OpenStreetMap*), respectivamente. No Apêndice B é apresentado o código em R gerado para transformar o arquivo (shp.) das vias para o formato aceito no LSM. Os locais seguros, ou pontos de encontro, foram locados em cotas acima da elevação correspondente à profundidade máxima de inundação ao final de cada rota de evacuação.

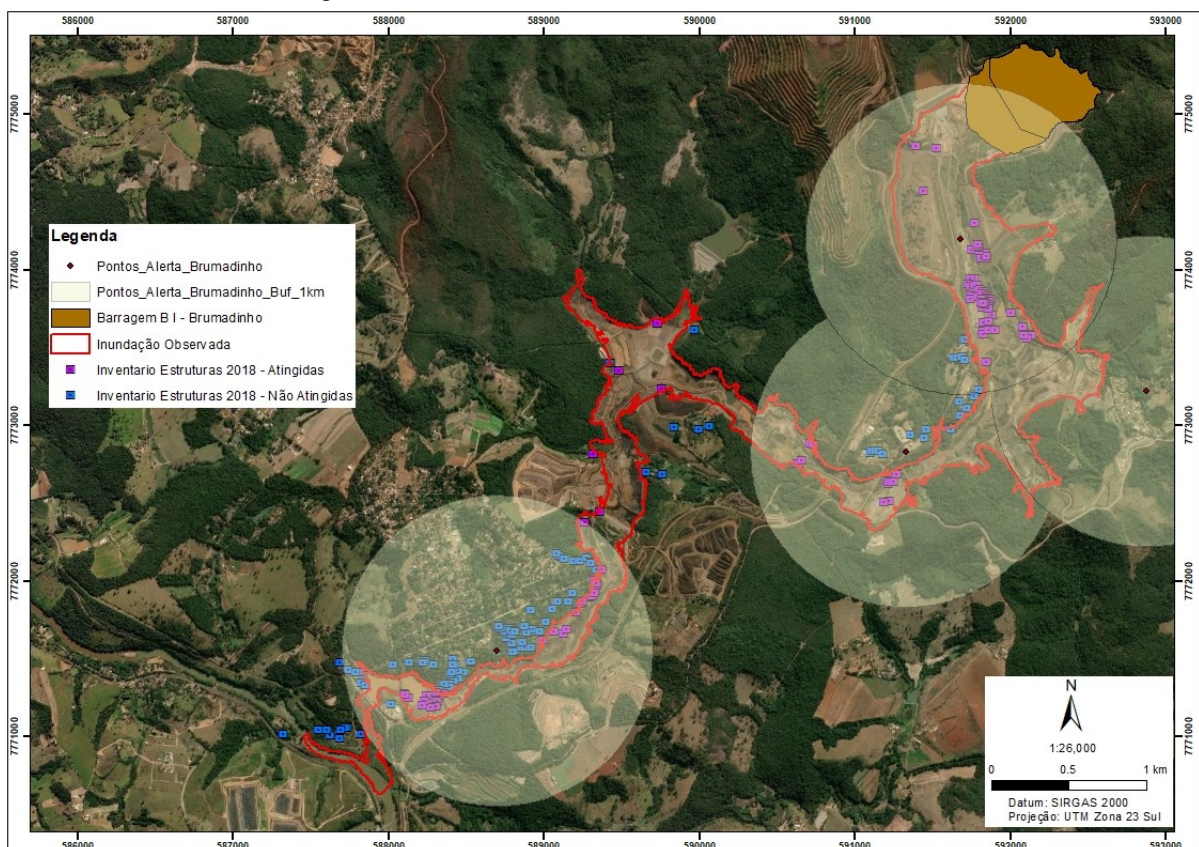
Na situação da ruptura da Barragem B-I, não houve identificação prévia nem alerta da falha. Portanto, para representar o caso real, não foram considerados tempos para a identificação do perigo, para a notificação aos órgãos responsáveis, e para a emissão e difusão do alerta. Esse cenário foi denominado “sem evacuação”.

Nos demais cenários foi avaliado se o número de mortes poderia ser reduzido caso um alerta tivesse sido emitido. Nesses casos, assim como em Lumbroso *et al.* (2021), foram considerados quatro centros de aviso, apresentados na Figura X e com as características descritas a seguir:

- Centro de Aviso 1
 - Localização: UTM N: 7.774.200 m e E: 591.685 m, fuso 23 sul;
 - Acionamento: no instante de identificação do perigo;
 - Propagação: 340 m/s; e
 - Raio de ação: 1.000 m.
- Centro de Aviso 2

- Localização: UTM N: 7.773.220 m e E: 592.880 m, fuso 23 sul;
- Acionamento: 10 segundos após a identificação do perigo;
- Propagação: 340 m/s; e
- Raio de ação: 1.000 m.
- Centro de Aviso 3
 - Localização: UTM N: 7.772.830 m e E: 591.330 m, fuso 23 sul;
 - Acionamento: 30 segundos após a identificação do perigo;
 - Propagação: 340 m/s; e
 - Raio de ação: 1.000 m.
- Centro de Aviso 4
 - Localização: UTM N: 7.771.550 m e E: 588.700 m, fuso 23 sul;
 - Acionamento: 60 segundos após a identificação do perigo;
 - Propagação: 340 m/s; e
 - Raio de ação: 1.000 m.

Figura 3.10: Centros de aviso considerados no LSM



Fonte: autoria própria.

3.4.4.3 Cenários simulados

Para a estimativa de perda de vida foram consideradas no LifeSim três possibilidades distintas para o modo de evacuação: i) todas as pessoas em risco evacuam a pé; ii) metade das pessoas em risco evacuam a pé e a outra metade evacua em veículos; e iii) todas as pessoas em risco evacua em veículos. Foram considerados, também, dois cenários com taxas de mobilidade distintas: um cenário com uma população com idade inferior a 65 anos, e outro com as pessoas com idade superior a 65 anos, resultando em um percentual de pessoas com dificuldade de mobilidade de 5,10% e 22,6%, respectivamente.

Complementarmente, assim como no estudo de Lumbroso *et al.* (2021), foram consideradas cinco possibilidades diferentes para a emissão do alerta: sem alerta; com alerta no momento da ruptura e com 5, 10 e 15 minutos de antecedência do alerta em relação ao evento; e outros seis cenários considerando 1h, 2h, 5h, 12h, 24h e 72h de antecedência do alerta em relação ao evento.

Em cada um dos cenários, foram realizadas 1.000 interações, conforme Hill *et al.* (2018), para a representação probabilística do modelo, considerando as incertezas definidas nas etapas do processo de evacuação e as distribuições de probabilidade de taxas de fatalidade. Complementarmente, simulou-se um cenário adicional para obter uma análise de sensibilidade quanto aos tempos de emissão de alerta. Neste, foram realizadas 10.000 iterações associadas a uma faixa de tempo de emissão do alerta de 0 a 72h minutos antes da ruptura.

No LSM cinco possibilidades diferentes para a emissão do alerta foram consideradas, tal qual foi feito em Lumbroso *et al.* (2021).

3.5 Resultados e discussão

3.5.1 Simulação hidrodinâmica do evento

A envoltória máxima da inundação simulada no HEC-RAS 2D (área de 2,899 km²) foi capaz de representar com precisão o alcance da inundação real provocada pela ruptura da B-I (Figura 3.11), com uma equivalência de 96,0% em área (2,783 km²).

As manchas apresentam pequenas diferenças entre si; foi observada uma superestimação e subestimação em área de 12,8% e 3,8% na simulação, respectivamente. Essas diferenças podem ter origem nas incertezas associadas à topografia do terreno (ALVAREZ *et al.*, 2017), ao volume mobilizado (GALLEGOS *et al.*, 2009), à determinação do coeficiente de Manning (SOUZA, 2016), à determinação de hidrogramas de ruptura (SILVA; ELEUTÉRIO, 2023; SOUZA, 2016), à definição de parâmetros reológicos (MELO, 2022), entre outros.

Foram estimados os tempos de chegada da onda para três localidades: cantina/refeitório (A), ponte ferroviária (B) e rio Paraopeba (C). Apesar das incertezas em termos de áreas simuladas, os resultados obtidos foram satisfatórios para as análises propostas, principalmente pelo acordo do tempo de chegada da onda de inundação simulado em relação ao observado e comparado com os resultados de Lumbroso *et al.* (2021), Ligier (2020) e Gibson *et al.* (2021), conforme Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Comparação entre os tempos de chegada observados de estudos anteriores e da mancha simulada para o estudo de caso da Barragem B-I

Local	Tempos de chegada observados Ligier (2020) (hh:mm:ss)	Simulação de Lumbroso <i>et al.</i> (2021) (hh:mm:ss)	Simulação de Gibson <i>et al.</i> (2021) (hh:mm:ss)	Simulação de Ligier (2020) (hh:mm:ss)		Simulação no presente estudo (hh:mm:ss)
		Modelo MIKE21	Modelo HEC-RAS 2D 6.1	Modelo TELEMAT-2D	Modelo MIKE21	Modelo HEC-RAS 2D 6.4
Ponto A	~ 00:02:00	00:01:30	00:01:30	00:01:15 - 00:02:15	00:01:15 - 00:02:00	00:01:00
Ponto B	~ 00:10:00 - 00:12:00	00:09:10	00:09:15	00:04:15 - 00:09:30	00:03:45 - 00:07:15	00:08:00
Ponto C	~ 01:30:00 - 02:10:00	01:26:05	01:27:45	01:42:00 - 02:55:00	01:51:00 - 02:40:00	01:33:00

Fonte: Adaptado de Melo, 2022

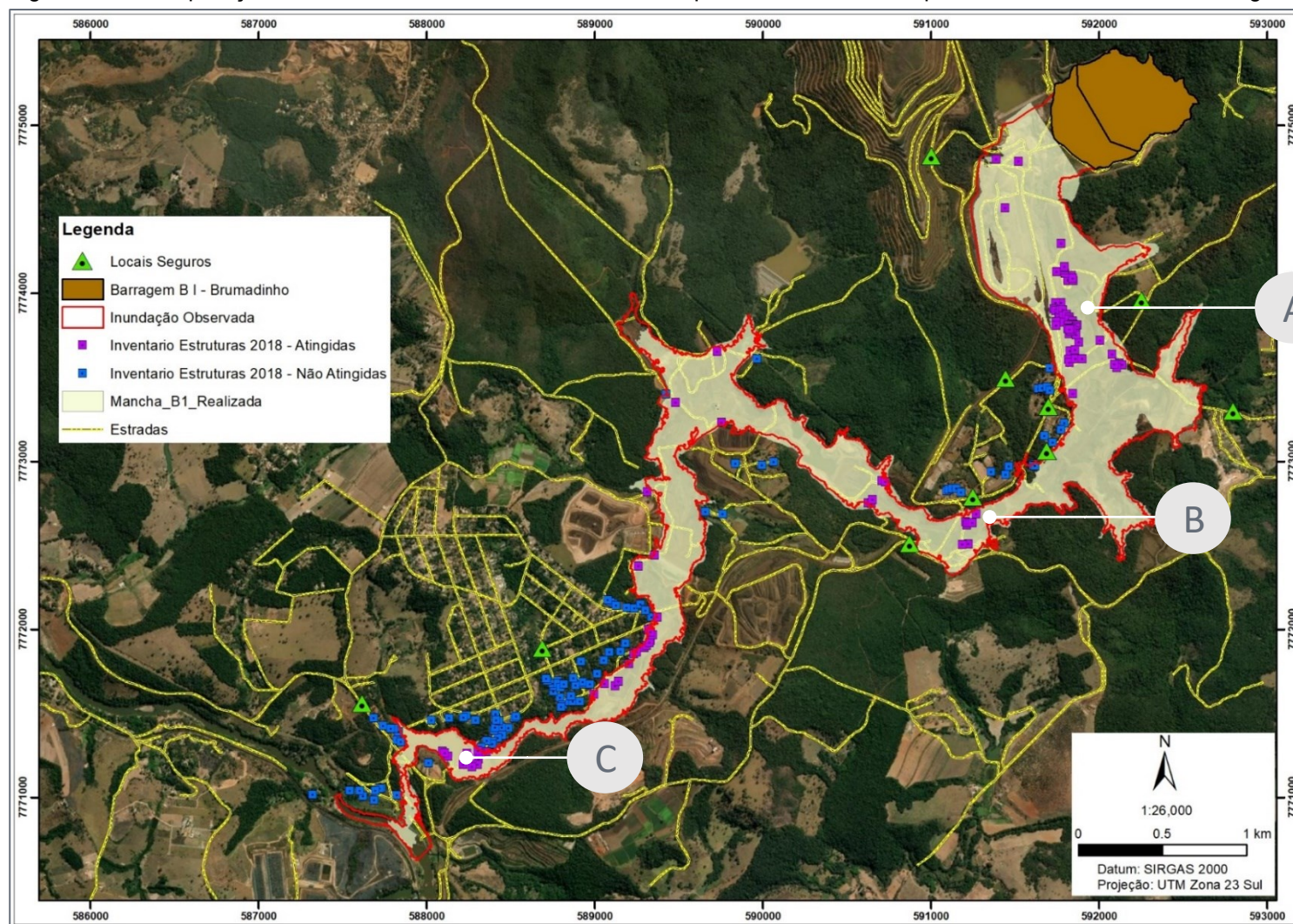
As profundidades máximas atingidas foram da ordem de 30 m, o que demonstra conformidade com o relatório do painel de especialistas sobre as causas técnicas do rompimento da barragem desenvolvido por Robertson *et al.* (2019), conforme apresentado na Figura 3.12. As velocidades máximas, como esperado, foram altas, sobretudo próximo ao espaldar de montante da barragem, chegando a mais de 23 m/s (Figura 3.13).

No que diz respeito ao cenário de vulnerabilidade e exposição, a Tabela 3.4 ilustra o número de pessoas em risco consideradas no instante da ruptura da Barragem B-I. Complementarmente, também na Figura 3.11, são apresentados os dados de entrada utilizados no LifeSim e no LSM, indicando o inventário de construções, o sistema viário retirado do OSM e os destinos adotados neste trabalho para a evacuação.

Tabela 3.4: Estimativa de localidades e pessoas em risco para o estudo de caso da Barragem B-I

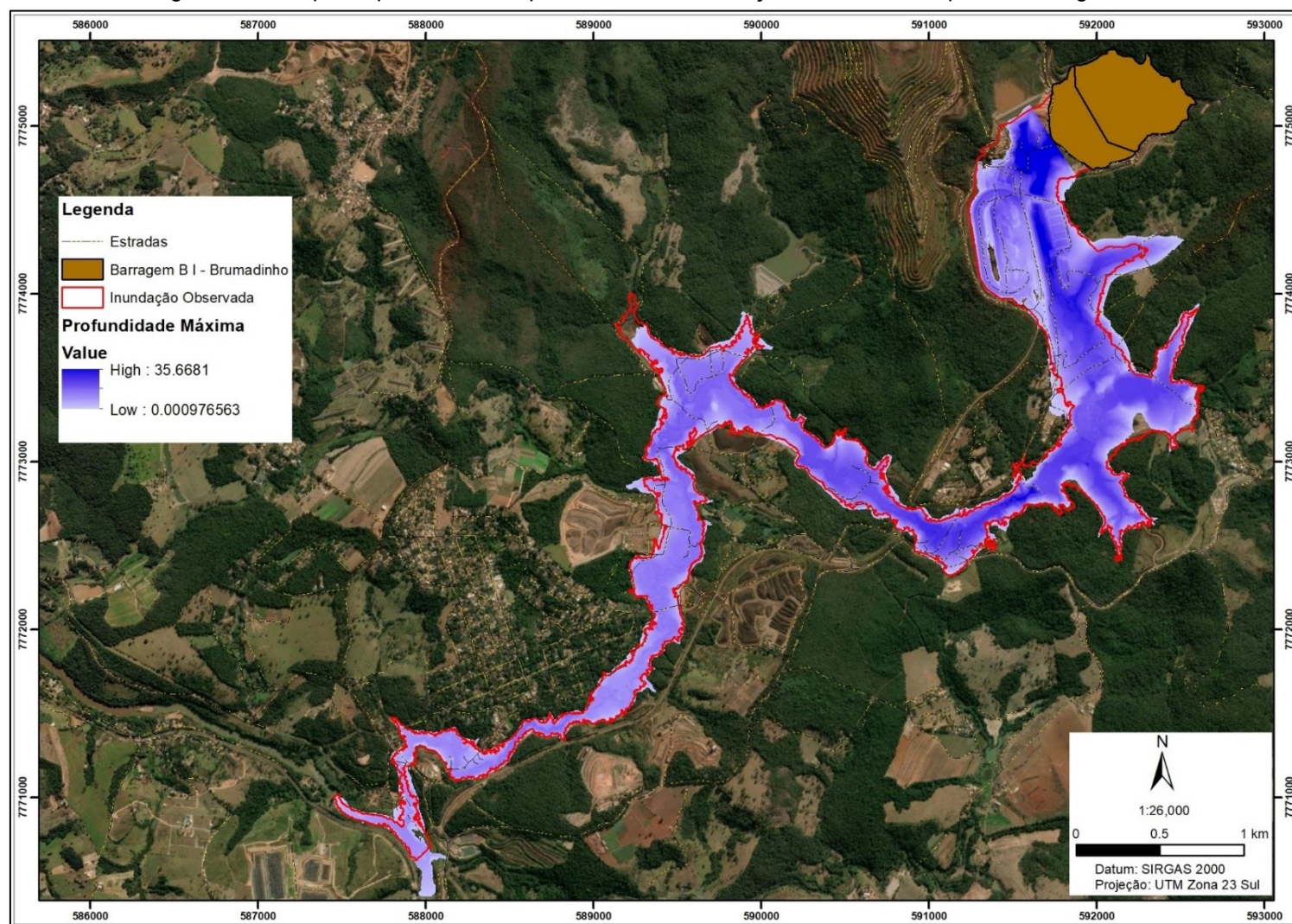
Localidades	Nº de edificações	Média de pessoas / Edificação	Total de pessoas em risco
Cantina/Refeitório	1	200	200
Edifícios adjacentes à cantina	51	2	102
Pousada	1	35	35
Edifícios residenciais	44	2	88
Estabelecimentos agropecuários	8	2	16
Total	105	-	441

Figura 3.11: Comparação entre as envoltórias e dados de entrada para o LifeSim e LSM para o estudo de caso da Barragem B-I



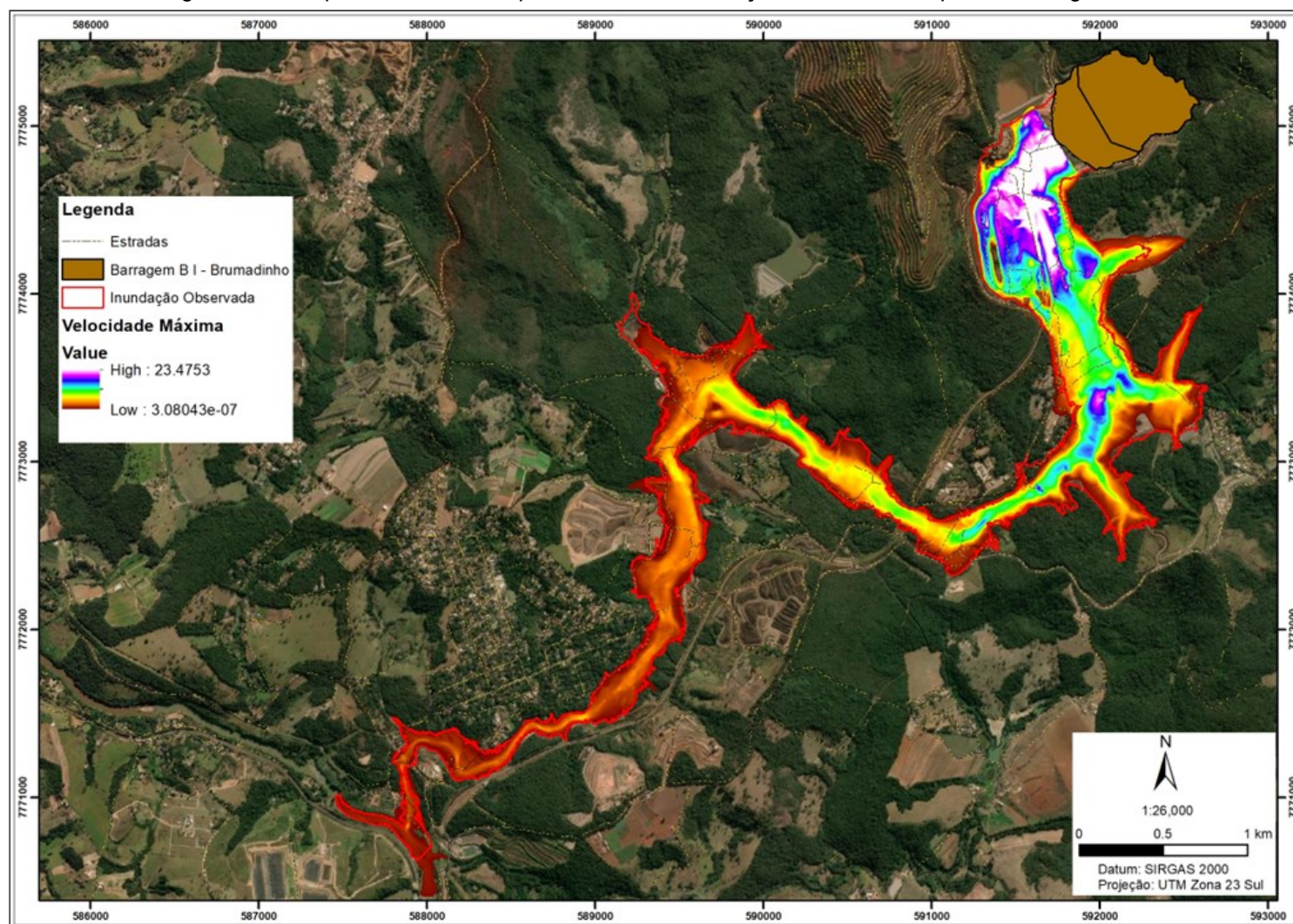
Fonte: autoria própria.

Figura 3.12: Mapa de profundidades proveniente da simulação hidrodinâmica para a Barragem B-I.



Fonte: autoria própria.

Figura 3.13: Mapa de velocidades proveniente da simulação hidrodinâmica para a Barragem B-I.



Fonte: autoria própria.

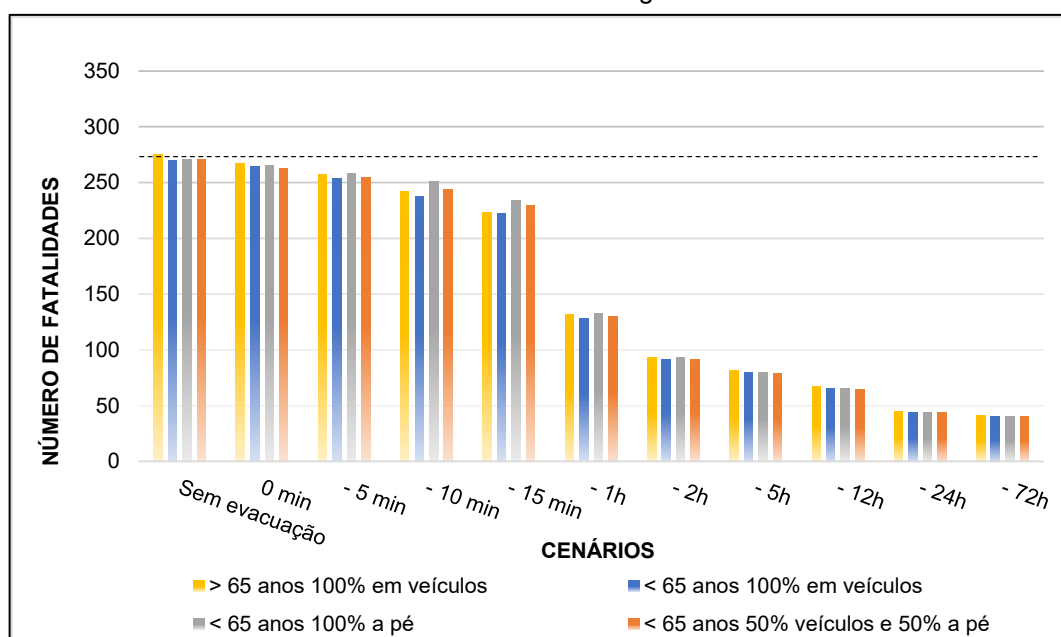
3.5.2 Simulação e análise de perdas de vida

Os resultados das modelagens de perda de vida são apresentados na sequência. Primeiramente, no LifeSim, fez-se uma análise de sensibilidade para compreender o efeito do modo de evacuação e da taxa de pessoas com dificuldade de mobilidade no número de fatalidades. A Tabela 3.5 e a Figura 3.14 apresentam o valor da mediana do número de mortes para cada um dos cenários desenvolvidos. Na Figura 3.14 a linha preta tracejada se refere ao número real de mortes (272).

Tabela 3.5: Análise de sensibilidade quanto ao modo de evacuação e mobilidade no LifeSim para o estudo de caso da Barragem B-I

Cenário	Estimativa de fatalidades (mediana)			
	< 65 anos 100% em veículos	< 65 anos 50% veículo 50% a pé	< 65 anos 100% a pé	> 65 anos 100% em veículo
Sem evacuação	270	271	271	275
0 min	264	263	265	267
- 5 min	254	255	258	257
- 10 min	238	244	251	242
- 15 min	222	229	234	223
- 1h	128	130	133	132
- 2h	91	91	93	93
- 5h	80	79	80	82
- 12h	65	64	65	67
- 24h	44	44	44	45
- 72h	41	40	40	41

Figura 3.14: Análise de sensibilidade quanto ao modo de evacuação e mobilidade no LifeSim para o estudo de caso da Barragem B-I



Para pessoas com menos de 65 anos, a diferença entre evacuar 100% a pé ou 100% em veículos não é muito significativa. Por exemplo, para um alerta com 5h de antecedência, o número de fatalidades foi de 80 (100% em veículos) e 82 (100% a pé). Contudo, para pessoas acima de 65 anos, evacuar 100% em veículos resulta em menos fatalidades do que evacuar a pé, evidenciando a necessidade de suporte adicional para essa faixa etária em situações de evacuação.

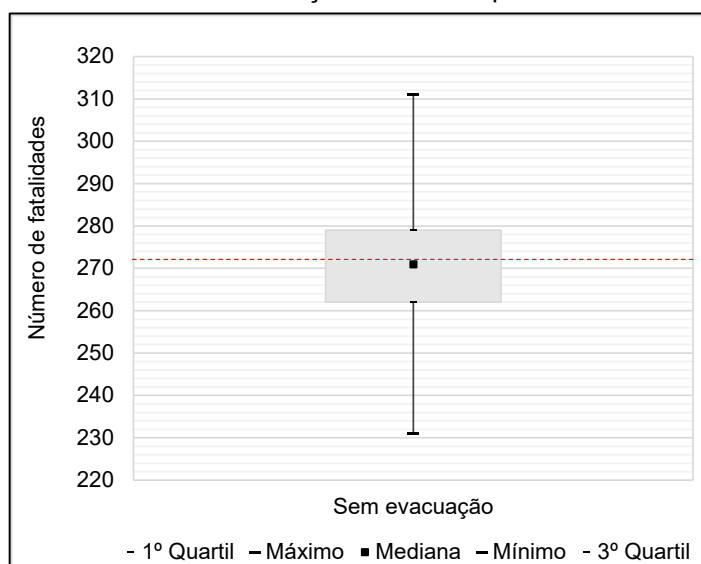
Pessoas com mais de 65 anos geralmente têm estimativas de fatalidades ligeiramente maiores do que aqueles com menos de 65 anos, especialmente quando a evacuação é feita 100% a pé. Isso ressalta a vulnerabilidade de pessoas mais velhas em emergências devido a possíveis limitações de mobilidade.

Apesar de ser possível detectar os comportamentos descritos, os resultados apontam uma variação muito pequena nos resultados. Diante disso, optou-se por avaliar detalhadamente somente os resultados que consideram a evacuação feita 100% a pé para uma população com menos de 65 anos. A Tabela 3.6 e a Figura 3.15 apresentam os resultados completos obtidos para o cenário que teve o objetivo de restituir o cenário real, sendo a linha vermelha tracejada o número real de fatalidades.

Tabela 3.6: Resultados obtidos para o cenário de reconstituição no LifeSim para o estudo de caso da Barragem B-I

Cenário	Estimativa de fatalidades				
	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
Sem evacuação	231	262	271	279	311

Figura 3.15: Box-plot do cenário de reconstituição no LifeSim para o estudo de caso da Barragem B-I



A mediana das estimativas de fatalidades é de 271, que está próxima do número real de óbitos (272). Isso sugere que o modelo utilizado para a estimativa tem uma boa aderência, pelo menos em termos de valor mediano. O intervalo interquartil (1º Quartil a 3º Quartil) vai de 262 a 279 fatalidades. Esse intervalo é relativamente estreito e indica que a maior parte das simulações do modelo produziu resultados próximos do número real de fatalidades, aumentando a confiança na consistência do modelo.

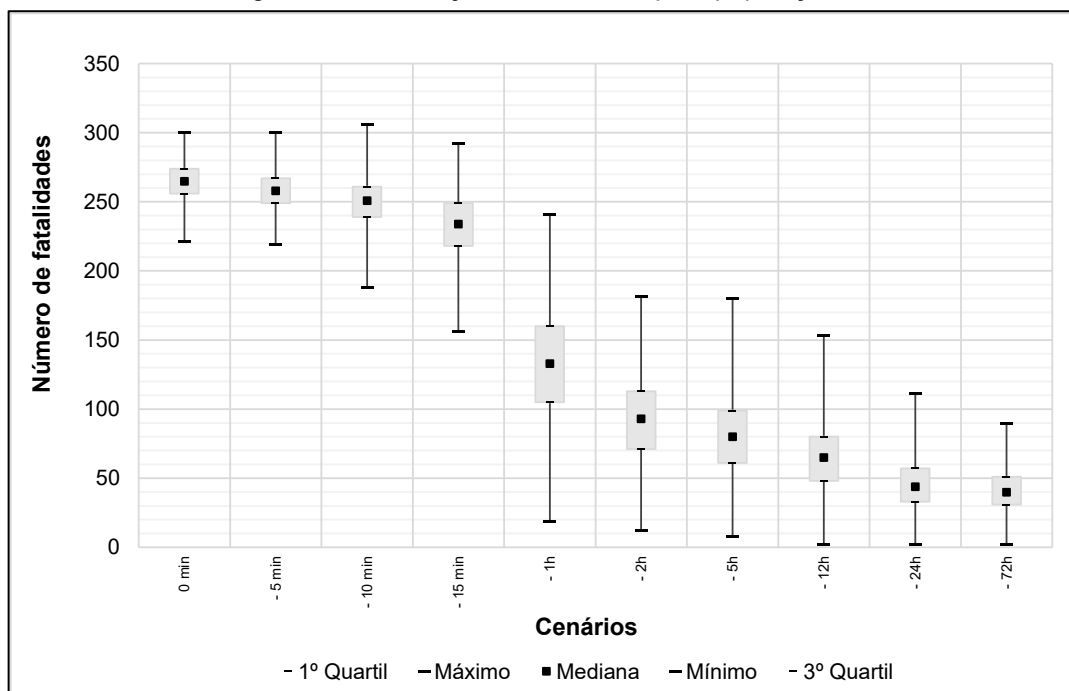
A estimativa mínima (231) e a máxima (311) mostram a amplitude das previsões possíveis. Embora essas estimativas sejam mais distantes do número real, elas ainda fornecem uma perspectiva sobre a incerteza inerente ao processo de modelagem e a variabilidade dos fatores que podem influenciar o número de fatalidades.

Para avaliar se o número de mortes poderia ter sido reduzido caso tivesse sido emitido um alerta para a população, foram simuladas dez possibilidades diferentes para a emissão do alerta: no momento da ruptura, e com 5 min, 10 min, 15 min, 1h, 2h, 5h, 12h, 24h e 72h de antecedência do alerta em relação ao evento. A Tabela 3.7 e a Figura 3.16 apresentam os resultados completos obtidos para o cenário que teve o objetivo de restituir o cenário real. Ressalta-se aqui que não se considerou o tempo de difusão do alerta, o foco foi apenas no tempo para iniciar a mobilização.

Tabela 3.7: Resultados obtidos nos cenários com a emissão do alerta em diferentes tempos no LifeSim para o estudo de caso da Barragem B-I. Evacuação feita 100% a pé e população com menos de 65 anos.

Cenário	Estimativa de fatalidades				
	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
0 min	221	256	265	274	300
- 5 min	219	249	258	267	300
- 10 min	188	239	251	261	306
- 15 min	156	218	234	249	292
- 1h	19	105	133	160	241
- 2h	12	71	93	113	182
- 5h	8	61	80	99	180
- 12h	2	48	65	80	153
- 24h	2	33	44	57	111
- 72h	2	31	40	51	90

Figura 3.16: Box-plots dos cenários com a emissão do alerta em diferentes tempos no LifeSim para o estudo de caso da Barragem B-I. Evacuação feita 100% a pé e população com menos de 65 anos.



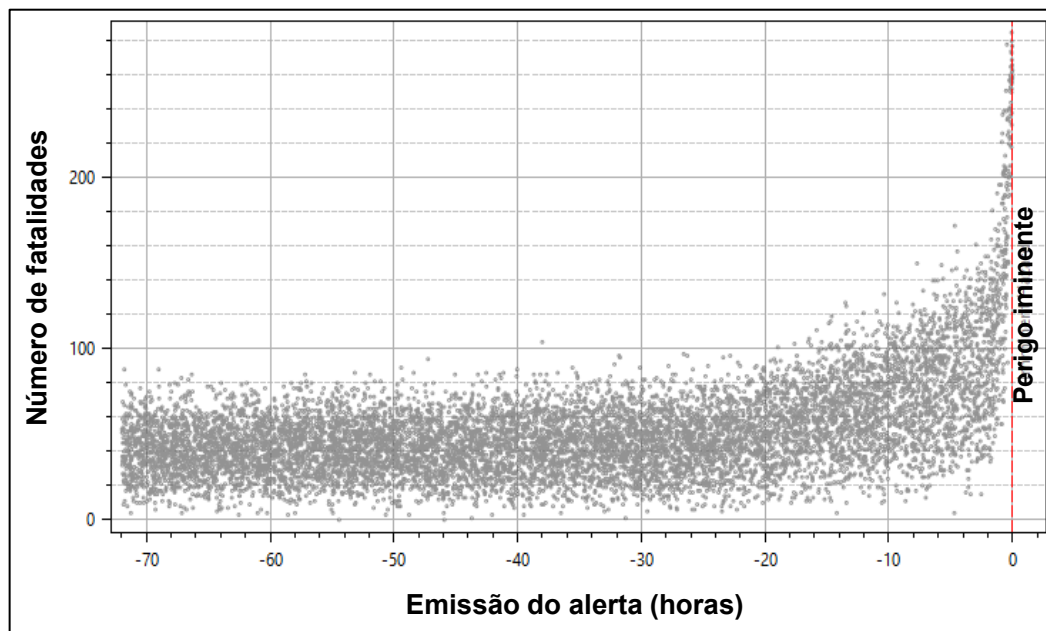
Para os cenários com alertas curtos (0, 5, 10 e 15 min), a redução nas fatalidades é gradual e pequena. Mesmo com um alerta de 15 minutos de antecedência, a mediana das fatalidades (234) ainda está significativamente alta comparada ao evento real (272). Para os cenários com alertas de 1 e 2 horas, a redução nas fatalidades torna-se mais pronunciada. Um alerta de 1 hora antes do evento reduz a mediana das fatalidades para 133, enquanto um alerta de 2 horas reduz ainda mais, para 93, menos da metade de fatalidades se comparado ao evento real. Esses resultados mostram a importância de um tempo de resposta adequado para a evacuação.

Por fim, alertas com maior antecedência (12 horas ou mais) mostram uma redução drástica nas fatalidades. Com 24 horas de antecedência, a mediana cai para 44, e com 72 horas, a mediana é de 40 fatalidades. Esses resultados destacam que alertas emitidos com ampla antecedência são altamente eficazes na minimização das fatalidades e que, para essas simulações, o número mínimo de fatalidades obtido se aproxima de zero.

Para compreender de forma mais detalhada a influência da antecipação do alerta nos resultados, realizou-se uma simulação adicional, na qual considerou-se uma faixa de

variação desse tempo, de menos (-) 72 horas a 0 horas. Nesse cenário foram realizadas 10.000 iterações, conforme exibido na Figura 3.17.

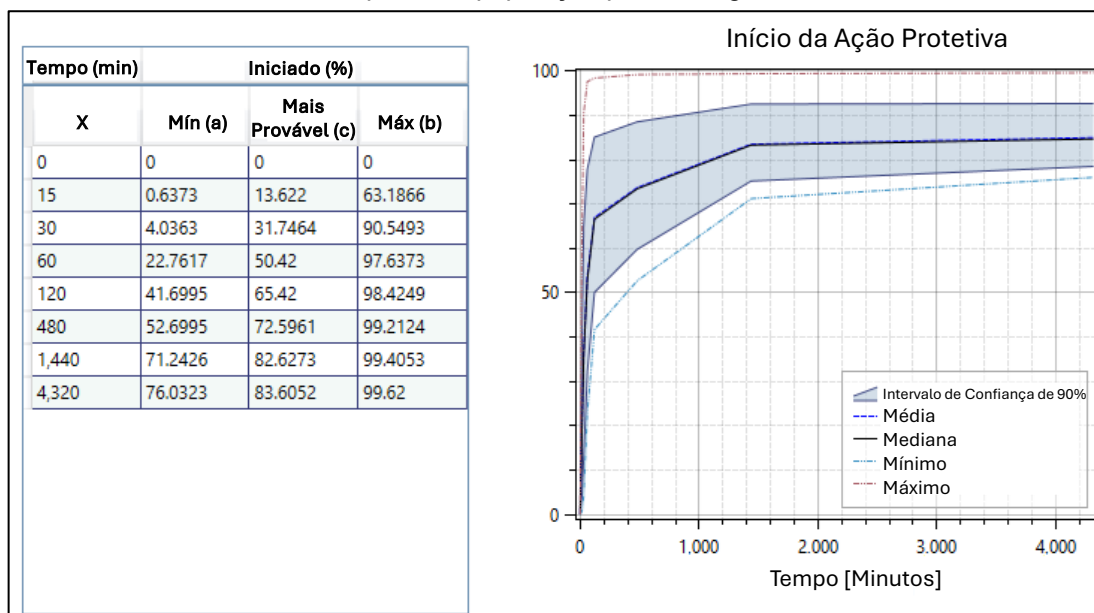
Figura 3.17: Cenário adicional variando o tempo de emissão do alerta no LifeSim para o estudo de caso da Barragem B-I



Pela Figura 3.17 percebe-se que, para períodos inferiores a 20 horas de antecedência na emissão do alerta, o número de fatalidades começa a crescer em uma taxa mais elevada, sendo esse um referencial importante de tempo para uma evacuação mais efetiva.

Para períodos superiores a 20 horas de antecedência, o número de fatalidades se mantém praticamente constante. Isso se deve à curva de mobilização proposta por Mileti e Sorensen (2017c) adotada, que considera a baixa percepção de risco e a preparação inadequada da população para emergências. Essa curva indica que, em média, 82,6% e 83,6% da população total inicia ações protetivas após 24 e 72 horas, respectivamente (Figura 3.18). Assim, mantém-se um percentual residual importante da população que não toma nenhuma ação protetiva, o que pode não refletir com precisão a realidade.

Figura 3.18: Curva de mobilização adotada que considera a baixa percepção de risco e a preparação inadequada da população para emergências.



Após a realização das simulações no LifeSim, avançou-se para a etapa de análise utilizando o modelo LSM. Nesse contexto, a Tabela 3.8 apresenta uma compilação dos resultados obtidos nas simulações realizadas com o modelo LSM, permitindo uma comparação mais aprofundada e uma melhor compreensão dos dados gerados.

Tabela 3.8: Resultados obtidos no cenário de restituição do evento real e dos cenários com a emissão do alerta em diferentes tempos no LSM para o estudo de caso da Barragem B-I.

Status	Quantidade				
	Sem evacuação	0 min	-5 min	-10 min	-15 min
Número de PARUs	647	647	647	647	647
Número de desavisados	168	0	0	0	0
Número de avisados	16	0	0	2	4
Número de avisados e evacuando	10	204	200	202	204
Número de seguros	0	0	0	0	0
Número de derrubados	4	58	62	84	290
Número de mortos - Total	441	385	385	359	149
Número de mortos - Afogados	0	4	4	4	4
Número de mortos - Exaustão (PPC<PPCC)	0	0	0	0	0
Número de mortos - Colapso de edifício	375	373	375	349	135
Número de mortos - Afogados no edifício	74	8	6	6	10
Número de mortos - Veículo derrubado	0	0	0	0	0

A simulação sem evacuação prevê 449 mortos, o que é significativamente maior do que os 272 óbitos reais. A maioria das mortes no modelo é atribuída ao colapso de edifícios, seguido por afogamentos, o que está em linha com relatos de colapsos

estruturais significativos no evento real. No entanto, a quantidade prevista de mortes por colapso (375) é maior do que a observada.

O modelo LSM também mostra uma redução significativa nas fatalidades com a emissão de alertas antecipados. Sem alerta (0 min), o número de mortes é 385. Com um alerta de 10 minutos, esse número diminui para 359, e com 15 minutos de antecedência, para 149.

O número de pessoas avisadas e evacuando permanece relativamente constante (em torno de 200) para todos os cenários, o que sugere que a eficácia do alerta não aumenta significativamente o número de evacuados, mas reduz as mortes ao diminuir o tempo de exposição ao perigo.

Lumbroso *et al.* (2021) também desenvolveram um estudo similar para a ruptura da Barragem B-I de Brumadinho. Considerando uma evacuação 100% a pé, os autores obtiveram os resultados apresentados na Tabela 3.9.

Os resultados obtidos para o cenário sem evacuação e com evacuação no momento da ruptura (449 e 385) são relativamente próximos aos encontrados por Lumbroso *et al.* (2021) (456 e 354), o que sugere uma consistência na modelagem básica e na estimativa do impacto inicial da ruptura sem intervenção.

Tabela 3.9: Resultados obtidos por Lumbroso *et al.* (2021) para o cenário que considera uma evacuação 100% a pé em um estudo de caso da Barragem B-I

Status	Quantidade				
	Sem evacuação	0 min	-5 min	-10 min	-15 min
Número de PARUs	456	354	256	200	0

A partir de 5 minutos de antecedência no alerta, os resultados começam a divergir mais fortemente, com uma maior diferença observada com 15 minutos de antecedência, onde se obteve 149 mortes no presente estudo e 0 mortes em Lumbroso *et al.* (2021). Essa discrepância é provavelmente devido às diferenças substanciais na modelagem da resposta de evacuação, ou na eficácia dos sistemas de alerta simulados.

É interessante perceber que o LifeSim, diferente dos resultados apresentados por Lumbroso *et al.* (2021), também não obteve uma redução drástica com antecedência de 15 minutos no alerta, o que parece ser razoável.

3.6 Conclusões

O HEC-RAS foi capaz de representar com precisão a ruptura e propagação da onda de cheia no vale a jusante. Uma aderência de 96,0% em área e diferenças percentuais de 12,8% e 3,8%, de superestimação e subestimação, respectivamente, foram levantadas entre as áreas inundadas simuladas e observadas. Os tempos de chegada foram similares aos observados e simulados em estudos anteriores (Lumbroso *et al.*, 2021; Ligier, 2020; Gibson *et al.*, 2021).

O modelo LifeSim apresentou uma estimativa de fatalidades (271, valor da mediana) mais próxima do número real de óbitos (272), enquanto o LSM apresentou uma estimativa significativamente maior (449). A maioria das mortes no LSM associadas ao evento real é atribuída ao colapso de edifícios, o que sugere que o modelo considera o impacto estrutural significativo da onda de lama. Essa distinção detalhada não é aparente no LifeSim, mas oferece uma visão mais detalhada e precisa das causas de fatalidades. Nesse cenário apenas dez pessoas estavam conscientes do desastre e evacuando; 16 foram avisadas, mas não evacuaram. A baixa quantidade de pessoas evacuando ou avisadas reflete a falta de sistemas de alerta ou tempo insuficiente para evacuação, conforme registrado no evento real.

Com relação ao efeito da emissão de alertas antes da ruptura, observa-se uma clara tendência de redução do número de fatalidades à medida que o tempo de antecedência do alerta aumenta. No LifeSim a mediana das fatalidades diminuiu de 265 (0 min) para 40 (72h), indicando que alertas emitidos com maior antecedência permitem evacuações mais eficazes e seguras.

Reitera-se que para a simulação com alerta 72h antes do rompimento o número mínimo de fatalidades obtido se aproxima a zero (2). Alertas emitidos mesmo com apenas 5 ou 10 minutos de antecedência já apresentam uma redução significativa no número de fatalidades (de 265 para 251, respectivamente). Com 1 hora de

antecedência, a mediana das mortes cai drasticamente para 133, mostrando a importância de se ter um sistema de alerta precoce em funcionamento.

O modelo LSM também mostra uma redução significativa nas fatalidades com a emissão de alertas antecipados. Sem alerta (0 min), o número de mortes é de 385. Com um alerta de 10 minutos, esse número diminui para 359, e com 15 minutos de antecedência, para 149.

Os resultados obtidos no LSM, no presente estudo e no estudo conduzido por Lumbroso *et al.* (2021), além de serem discrepantes ao evento real, não se mostraram coerentes entre si. Diante disso, para a avaliação de perdas de vida associadas a inundações, com base única e exclusivamente no estudo de caso da Barragem B-I de Brumadinho, conclui-se que o LifeSim tem um desempenho mais realista na simulação de eventos dessa natureza.

A construção do modelo no LSM apresentou diversas dificuldades. A interface do modelo é inteiramente baseada em DOS e depende de arquivos com extensões pouco comuns, além de utilizar o bloco de notas para edição.

Os dados das edificações, por exemplo, devem ser inicialmente inseridos em uma planilha padrão do LSM em Excel, que deve conter a localização, um identificador único para cada edificação e os parâmetros correspondentes no domínio do modelo. Embora esses dados possam ser gerados facilmente em um aplicativo externo, como o ArcGIS, a ausência de visualização no modelo dificulta a conferência e a validação das informações. Os dados referentes à população são construídos de maneira similar, enfrentando as mesmas limitações. Ao final, ambos os conjuntos de dados são convertidos para a extensão n3s.

A rede viária também é gerada em um arquivo n3s. Segundo o manual do LSM, a rede viária pode ser criada utilizando a barra de ferramentas LSM para ArcGIS, que deveria estar disponível gratuitamente pela HR Wallingford, ou por meio de um editor de texto. No entanto, essa aplicação não está acessível, e as tentativas de contato com a HR Wallingford não foram bem-sucedidas. Gerar a rede viária via editor de texto é extremamente trabalhoso, pois é necessário inserir em uma tabela do Excel todas as coordenadas dos vértices dos segmentos de reta das vias e suas elevações em um

formato específico do LSM. Além disso, é crucial que as linhas representando as vias estejam perfeitamente conectadas para evitar a criação de segmentos de estrada muito pequenos ou estradas desconectadas.

Devido à dificuldade em gerar essas informações, foi desenvolvido um código em R no âmbito desta dissertação para converter o arquivo (shp.) das vias para o formato aceito pelo LSM, conforme detalhado no Apêndice B.

Para os *inputs* hidrodinâmicos, são necessários dados de profundidade (extensões t3s ou xdmf), velocidade (extensão t3v ou xdmf), nível da água (superfície livre) (extensões t3s ou xdmf) e elevação do solo (extensões t3s ou xdmf). Para *softwares* como o HEC-RAS, é necessário um conversor específico. A HR Wallingford disponibiliza um conversor genérico gratuitamente (sem suporte), que converte arquivos CSV para profundidade, nível da água, velocidade e elevação do solo, contendo resultados pontuais para múltiplos intervalos de tempo, para o formato xdmf.

Para utilizar essa aplicação, é necessário primeiro transformar as manchas de inundação (extensão .gif) de cada temática para o formato CSV em todos os passos de tempo. Esse processo exige a manipulação de grandes volumes de dados, resultando em gigabytes de informações, o que prejudica significativamente a condução dos modelos.

As simulações no LSM demandaram um tempo considerável, especialmente devido à carga de dados exigida, o que inviabilizou a realização de cenários adicionais que requeriam um maior tempo de modelagem hidrodinâmica. Por esse motivo, o cenário com maior antecedência foi limitado a 15 minutos, não sendo viáveis cenários com 1h, 2h, 5h, 12h, 24h e 72h de antecedência em relação ao evento.

Os resultados são apresentados em blocos de notas, contendo um resumo de fatalidades e outras informações, conforme apresentado na Tabela 3.8. Contudo, não é possível visualizar como o *software* opera ao longo da simulação, a cada passo de tempo, o que limita a percepção do comportamento dos indivíduos e objetos durante as simulações.

Diante dessas dificuldades, e considerando que o estudo de caso do rio Ahr, na Alemanha, é infinitamente mais complexo do que o de Brumadinho, optou-se por desconsiderar o uso do LSM na aplicação do segundo estudo de caso, relacionado a inundações naturais.

4 ESTUDO DE CASO DA INUNDAÇÃO OCORRIDA EM JULHO DE 2021 NO RIO AHR, NA ALEMANHA: COMO O APRIMORAMENTO DA GESTÃO DE RISCOS DE INUNDAÇÕES PODERIA REDUZIR O NÚMERO DE FATALIDADES

4.1 Resumo

Em julho de 2021, a Alemanha foi acometida por chuvas extremas, que levaram a pelo menos 184 mortes, sendo considerado o evento mais catastrófico da história recente do país. Somente no vale do rio Ahr foram contabilizadas 135 mortes decorrentes das inundações. O presente estudo explora o emprego de dois modelos: um hidrodinâmico, o HEC-RAS, para caracterizar a severidade com que a inundação atingiu as áreas ocupadas às margens do rio Ahr; e outro baseado em agentes, denominado LifeSim, para calcular o risco de morte e determinar se a quantidade de vítimas fatais poderia ter sido menor com o aprimoramento da gestão de riscos de inundações. Os estudos indicaram que ambos os modelos foram capazes de reproduzir o cenário real de forma adequada. O HEC-RAS provou ser útil na simulação detalhada do comportamento das águas durante a inundação, permitindo uma compreensão precisa das áreas mais afetadas e da dinâmica da inundação. Já o LifeSim destacou-se ao avaliar o risco comunitário, revelando os principais aspectos que contribuíram para o alto número de vítimas. Os resultados mostraram que o número de mortes poderia chegar a zero caso os alertas de inundação tivessem sido emitidos com antecedência de pelo menos dois dias, e se as informações contidas nos alertas fossem mais claras em relação ao evento iminente e às ações que deveriam ser tomadas. Esses resultados elevam a importância da percepção e preparação da população quanto ao risco, bem como a eficácia dos sistemas de alerta e comunicação em situações de emergência. Assim, a integração desses modelos na gestão de riscos pode fornecer informações valiosas para estratégias de mitigação, potencialmente salvando vidas em futuros eventos de inundações.

4.2 Introdução

As inundações são um dos perigos relacionados ao clima mais frequentes e generalizados (HEWITT, 1997). Há quase duas décadas, já se previa que a extensão e frequência das inundações aumentasse devido aos efeitos das mudanças climáticas e do aquecimento global (STERN, 2007), resultando em alterações regionais na

distribuição das inundações e fazendo com que áreas anteriormente não afetadas passem a ser atingidas (FEW, 2006).

Atualmente, estas previsões têm se confirmado de maneira alarmante. Diversos estudos e relatórios recentes têm demonstrado um aumento na frequência e intensidade das inundações em várias partes do mundo. Regiões que antes eram consideradas seguras, agora enfrentam cheias severas, corroborando com as projeções feitas pelos cientistas. Os eventos recentes, como os registrados no Rio Grande do Sul em 2024 e na Europa em 2021, exemplificam a realidade dessas previsões, evidenciando a urgência em mitigar os efeitos das mudanças climáticas para reduzir o impacto desses desastres naturais.

Somado a isso, acredita-se que muitos casos de perda de vidas poderiam ser evitados ou minimizados com a implementação de sistemas eficazes de alerta e resposta (PRIEST *et al.*, 2007). O investimento em sistemas de emissão e difusão de alerta é crucial para garantir que as comunidades estejam informadas sobre ameaças iminentes. Estes sistemas permitem uma rápida disseminação de informações vitais, proporcionando tempo suficiente para que medidas preventivas sejam tomadas.

A preparação da população para responder adequadamente a emergências é igualmente importante. Treinamentos regulares e programas educacionais podem aumentar a conscientização sobre os riscos e ensinar as pessoas a agir de maneira segura e eficaz em situações de crise. A combinação de sistemas de alerta precoce bem desenvolvidos e uma população bem-preparada pode reduzir significativamente o impacto de desastres, salvando vidas e minimizando danos materiais.

Diante disso, o presente estudo de caso se insere neste contexto ao reconstituir o cenário da inundação ocorrida na Alemanha, na região do rio Ahr, a partir da utilização de um modelo baseado em agentes, chamado LifeSim, em conjunto com o HEC-RAS, modelo hidrodinâmico.

Este estudo tem como objetivo avaliar o risco de mortalidade para indivíduos situados nas proximidades do rio Ahr, e investigar se a melhoria na gestão de riscos de inundações poderia ter reduzido o número de fatalidades. Ao simular a inundação e analisar as condições e respostas dos moradores, busca-se uma compreensão

detalhada dos fatores que contribuíram para as mortes e destaca pontos críticos onde intervenções poderiam ser mais eficazes.

4.3 Estudo de caso

Em julho de 2021, entre os dias 12 e 15, ocorreram severas inundações na Europa Ocidental. Essas inundações resultaram em pelo menos 184 mortes na Alemanha, além de danos significativos à infraestrutura, incluindo casas, estradas, linhas ferroviárias e pontes. Diversos meios de subsistência foram severamente interrompidos pelo evento; o fechamento de estradas deixou algumas regiões inacessíveis por dias, cortando rotas de evacuação de algumas vilas e outras formas de resposta a emergências e colocando à prova o sistema de previsão, alerta e resposta a inundações (*Flood Forecasting, Warning and Response System - FFWRS*) (KREIENKAMP et al., 2021).

O mecanismo meteorológico que originou a crise foi um ciclone denominado “Bernd” (DIETZE et al., 2022), formado no Atlântico Norte e que se deslocou através da França em direção à Europa Central. Ao atingir o oeste da Alemanha, sua trajetória de deslocamento foi retardada devido à presença de um anticiclone no leste europeu, resultando na liberação de uma média de 115 mm de chuva em 72 horas na bacia do rio Ahr.

As áreas mais afetadas foram as partes centrais do país e, mais amplamente, o oeste da Renânia-Palatinado e a metade sul da Renânia do Norte-Vestfália. Como resultado, houve inicialmente transbordamentos localizados de pequenos cursos de água e inundações repentinas. Com a continuidade das chuvas, rios de médio e grande porte, como o Ahr, também transbordaram. Esses fatores levaram a uma situação de inundação extensa, desde a Eifel (Renânia-Palatinado), através do Rheinland e da área do Ruhr, até o Sudoeste da Renânia do Norte-Vestfália (JUNGHÄNEL et al., 2021).

O incidente foi considerado a mais grave catástrofe natural da história recente da Alemanha. No vale do rio Ahr, localizado a oeste de Bonn, as inundações resultaram na morte de 135 pessoas. Apenas a inundação de 1962 em Hamburgo foi mais mortal no contexto alemão, com 315 vítimas. Na noite de 14 para 15 de julho, após a

ocorrência das chuvas, a região do vale do rio Ahr foi devastada, resultando em 766 feridos e danos a aproximadamente 3.000 edificações, de um total de 4.200. Cerca de 56.000 pessoas residiam no vale; 42.000 foram impactadas pelas cheias e pelo menos 17.000 perderam completamente seus bens ou sofreram grandes prejuízos (DEUTSCHLAND.DE, 2021).

Uma reconstituição cronológica das ocorrências e ações tomadas durante as inundações no rio Ahr é apresentada na Figura 4.1, na Figura 4.2 e na Figura 4.3, a partir de uma adaptação do trabalho desenvolvido por Seidel (2021). Essa reconstituição destaca a evolução dos níveis de água, as ações das autoridades e as medidas de alerta adotadas em resposta à rápida ascensão das águas, ilustrando a dinâmica e a severidade do evento, proporcionando uma visão abrangente dos desafios enfrentados e das lições aprendidas na gestão desse desastre natural.

Figura 4.1: Reconstrução das ocorrências e ações tomadas durante as inundações no rio Ahr – 12/07/21 a 17h40 do dia 14/07/21

12 DE JULHO

Segunda-feira

Em 12 de julho, o Serviço Meteorológico Alemão alertou a população sobre “grandes quantidades de chuva” nos “próximos dias” e informou os centros de controle de enchentes dos estados. O Sistema Europeu de Alerta de Inundações já havia alertado as autoridades alemãs em 10 de julho sobre “inundações na bacia do Reno”.

14 DE JULHO

Quarta-feira

Na manhã de 14 de julho de 2021, o Serviço Meteorológico Alemão alertou para “tempestades extremas” com chuvas contínuas e fortes em grande parte da Renânia do Norte-Vestfália e Renânia-Palatinado.



Captura de tela de um vídeo do Serviço Meteorológico Alemão com avisos de mau tempo, a partir de quarta-feira, 10h52.

11h00: O serviço de alerta de enchentes do Departamento de Meio Ambiente do estado da Renânia-Palatinado aciona o segundo nível mais alto de alerta.

11h17: O Departamento de Meio Ambiente emite o segundo nível mais alto de alerta (vermelho, “alto risco de enchente”) através do aplicativo Katwarn. Ele alerta a população e outras autoridades sobre “níveis de água subindo rapidamente”.

14h30: O nível da água no medidor de Altenahr já subiu para 1,38 metros. Normalmente, ele fica bem abaixo de um metro.

14h34: A administração do distrito de Ahrweiler alerta a população através do aplicativo Katwarn que “são esperadas inundações locais”. As pessoas são aconselhadas a “não ir para porões ou garagens subterrâneas em caso de risco de inundação”.

15h26: O Departamento de Meio Ambiente prevê que esse evento de enchente pode atingir um nível crítico máximo de 5,19 metros no medidor de Altenahr. O maior nível registrado nas últimas duas décadas foi de 3,71 metros em 2016.

16h20: A prefeita da comunidade municipal de Altenahr, Cornelia Weigand, solicita ao escritório do distrito que declare estado de catástrofe. No entanto, isso ainda não aconteceu.

17h17: O Departamento de Meio Ambiente emite o nível mais alto de alerta através do aplicativo Katwarn: roxo.

“No rio Ahr e seus afluentes, o risco de enchentes é muito alto. Nas próximas 24 horas, são esperadas inundações repentinas e enchentes.”



Mapa do Departamento de Meio Ambiente da Renânia-Palatinado: Nível máximo de alerta de enchentes (roxo) para a área do Ahr.

17h40: A administração do distrito de Ahrweiler emite o segundo nível mais alto de alerta, embora o Departamento de Meio Ambiente já tenha emitido o nível mais alto de alerta. Em um comunicado de imprensa do distrito, é dito:

“A liderança técnica de operações (bombeiros, Agência Federal de Assistência Técnica, Cruz Vermelha Alemã, polícia e funcionários administrativos do distrito) apoia o inspetor de proteção contra incêndios e catástrofes do distrito, Michael Zimmermann, que às 17h40 assumiu o comando geral das operações, uma vez que o nível de alerta 4 foi declarado.”

Enquanto isso, a administração do distrito estabeleceu um centro de crise em seu edifício em Bad Neuenahr-Ahrweiler.

Fonte: Adaptado de Seidel (2021)

Figura 4.2: Reconstrução das ocorrências e ações tomadas durante as inundações no rio Ahr – 18h25 do dia 14/07/21 a 00h22 do dia 15/07/21

14 DE JULHO

Quarta-feira

18h25: O Departamento de Meio Ambiente reduz sua previsão de nível de água para quatro metros, mas não emite um sinal de segurança. Isso foi precedido por uma previsão de chuva reduzida pelo Serviço Meteorológico Alemão.

Mais tarde, Jürgen Pföhler (CDU), administrador do distrito de Ahrweiler, referirá à previsão de nível de água reduzida para explicar por que o distrito tomou medidas abrangentes tardiamente.

19h20: O Ministro do Interior da Renânia-Palatinado, Roger Lewentz (SPD), chega ao centro de comando da equipe de crise. O administrador do distrito, Pföhler, também está presente.

19h30: O Ministro do Interior Lewentz deixa o centro de comando. Mais tarde, ele dirá que teve a impressão de que a equipe de crise estava trabalhando de “forma calma e concentrada”.

19h30: O nível da água em Altenahr agora realmente excedeu o pico de 2016.

19h57: O Departamento de Meio Ambiente aumenta significativamente sua previsão de nível de água novamente: para 5,30 metros.

20h43: O Departamento de Meio Ambiente aumenta sua previsão de nível de água para 6,81 metros.

20h45: O medidor em Altenahr já registra um nível de água de 5,75 metros. Esse é o último valor preciso disponível para Altenahr durante esta enchente. Após isso, aparentemente, a energia elétrica foi cortada. A estação de medição não fornece mais dados. Mais tarde, descobriu-se que a régua de medição foi arrancada junto com a pequena casa onde estava instalada, sendo levada pelas águas.



Os restos da régua de medição e da estação em Altenahr após a enchente.

20h56: A administração do distrito de Ahrweiler posta no Twitter que são esperadas mais “enchentes repentinas e inundações”. Como “nível de água atual” em Altenahr, menciona 5,09 metros – mais de meio metro abaixo do último valor medido.

15 DE JULHO

Quinta-feira

00h22: Em muitos lugares do Vale do Ahr já parou de chover há muito tempo. No entanto, o Serviço Meteorológico Alemão já alerta novamente para fortes chuvas.

No Vale do Ahr o caos já está instalado. Por toda parte, onde é possível, as equipes de resgate tentam salvar pessoas da inundação. Desde que o estado de catástrofe foi declarado, a Bundeswehr (Forças Armadas Alemãs) e a Polícia Federal também estão ajudando. Muitas pessoas passam a noite nos telhados.

Durante a noite, o nível da água em Altenahr, segundo estimativas do Departamento de Meio Ambiente, está acima de 7,00 metros. “Eram oito ou nove metros? Ninguém pode dizer”, um porta-voz da agência dirá mais tarde. Com informações da população e dados de escoamento de outras estações de medição, o departamento pretende calcular o pico da inundação posteriormente.

22h00: O centro de crise em Bad Neuenahr-Ahrweiler percebe, possivelmente apenas agora, que o nível da água em Altenahr não está mais mudando.

23h09: O distrito de Ahrweiler ativa o nível mais alto de alerta e, com isso, o alarme de catástrofe através do aplicativo Katwarn. A administração convoca uma evacuação parcial:

“Devido aos intensos eventos de chuva, os residentes das cidades de Bad Neuenahr-Ahrweiler, Sinzig e Bad Bodendorf, que moram a 50 metros à direita e à esquerda do rio Ahr, devem deixar suas residências.”

O chamado para evacuação é de longe insuficiente. Em outros lugares também há grandes inundações. Como imagens de satélite mais tarde mostram, até casas em um raio de 250 metros são inundadas.



Dernau, 15 de julho - grandes partes da localidade estão inundadas.

Fonte: Adaptado de Seidel (2021)

Figura 4.3: Reconstrução das ocorrências e ações tomadas durante as inundações no Rio Ahr – 06h39 a 10h27 do dia 15/07/21

15 DE JULHO

Quinta-feira

6h39: O distrito de Ahrweiler envia, através do aplicativo Katwarn, um novo alerta de enchente. Nele, fala-se em escassez de água potável:

“Na localidade de Bad Bodendorf, atualmente, devido à extrema situação de inundação, há grandes restrições no fornecimento de água potável. A população é instada a usar a água potável com extrema economia.”

À luz do dia, as imensas inundações no Vale do Ahr tornam-se claramente mais visíveis. A área de operação estende-se por 40 quilômetros à esquerda e à direita do Ahr.

10h27: A administração do distrito de Ahrweiler informa no Twitter que atualmente há cerca de 1.300 pessoas desaparecidas. Aproximadamente 3.500 pessoas foram acomodadas em instalações de cuidados.

Na parte da manhã, há uma coletiva de imprensa com o administrador do distrito, Pföhler, o Ministro do Interior Lewentz e outros. Durante a coletiva, Pföhler declara:

“Esta inundação é a maior catástrofe no distrito de Ahrweiler desde a Segunda Guerra Mundial.”

Fonte: Adaptado de Seidel (2021)

Diante dessa reconstrução detalhada, pode-se perceber algumas falhas na comunicação durante a situação de risco causada pelas inundações, como emissão de alertas tardios e informações truncadas.

Segundo o relato de Seidel (2021), na tarde do dia 14 de julho, por exemplo, por volta das 18h25, o Departamento de Meio Ambiente reduziu sua previsão de nível de água para quatro metros, que foi precedido por uma previsão de chuva reduzida pelo Serviço Meteorológico Alemão. Essa previsão equivocada fez com que alguns distritos tomassem medidas mais abrangentes de segurança tardiamente. Às 20h45, o medidor em Altenahr já registrava um nível de água de 5,75 metros.

Ainda no referido relato, é mencionado que às 23h09 do dia 14 de julho, o distrito de Ahrweiler ativou o nível mais alto de alerta e emitiu um alarme de catástrofe através do aplicativo Katwarn. Contudo, o chamado para evacuação se mostrou insuficiente. Imagens de satélite mais tarde mostraram que casas em um raio de 250 metros foram inundadas.

Na Alemanha, sistemas de alerta de inundações foram estabelecidos desde a década de 1880. Atualmente, as capacidades e responsabilidades para previsão, alerta e resposta a inundações são distribuídas entre os níveis federal, estadual e local. No nível federal, o serviço meteorológico (*Deutscher Wetterdienst* – DWD) é responsável pela previsão do tempo e pelos alertas de condições meteorológicas severas, como precipitações intensas. No entanto, a previsão e o alerta de inundações são tarefas dos estados federados, organizados de maneira diversa (THIEKEN *et al.*, 2023).

Segundo Thieken *et al.* (2023), desde 2017, os alertas podem ser divulgados na Alemanha por meio do Sistema de Alerta Modular (*Modulares Warnsystem* – MoWaS) hospedado pelo Gabinete Federal de Proteção Civil e Assistência em Catástrofes (*Bundesamt für Bevölkerungsschutz* – BBK) para uma ampla gama de multiplicadores de advertência e canais de divulgação, como operadores de mídia e aplicativos de alerta (por exemplo: Nina e Katwarn). Essa informação vai ao encontro dos relatos descritos por Seidel (2021), em que o aplicativo Katwarn é mencionado diversas vezes. De forma complementar, alguns distritos e municípios usam sirenes ou anúncios de alto-falantes para alertar diretamente sua população.

Para que um sistema de previsão, alerta e resposta a inundações seja eficaz, é essencial que os alertas emitidos pelas autoridades alcancem as pessoas que estão em situação de risco. Existem relatos, apresentados em detalhe no item 4.4.4, de que um percentual importante da população residente em Renânia do Norte-Vestfália e Renânia-Palatinado não foi avisada da inundação que estava por vir.

Tendo em vista o cenário exposto, o presente estudo utiliza o modelo baseado em agentes, chamado LifeSim, para reconstituir o evento, avaliar o risco de mortalidade para indivíduos situados nas proximidades do rio Ahr e investigar se a melhoria na gestão de riscos de inundações poderia ter reduzido o número de fatalidades.

4.4 Materiais e métodos

Para apresentar a simulação da inundação ocorrida na Alemanha e de suas consequências, assim como no estudo de caso anterior, dividiu-se a descrição do estudo em quatro etapas: (i) descrição da área de estudo; (ii) modelagem hidrodinâmica; (iii) cenário de vulnerabilidade e exposição; e (iv) modelagem de perdas de vida.

4.4.1 Descrição da área de estudo

O rio Ahr é um rio afluente do rio Reno e possui comprimento de 85 km. Sua nascente se localiza na cabeceira das montanhas de Eifel, uma região elevada a cerca de 520 m acima do mar, e deságua no rio Reno, em Sinzig, a 53 m em relação ao nível do mar, trecho que apresenta uma inclinação média do curso de água de 0,4%.

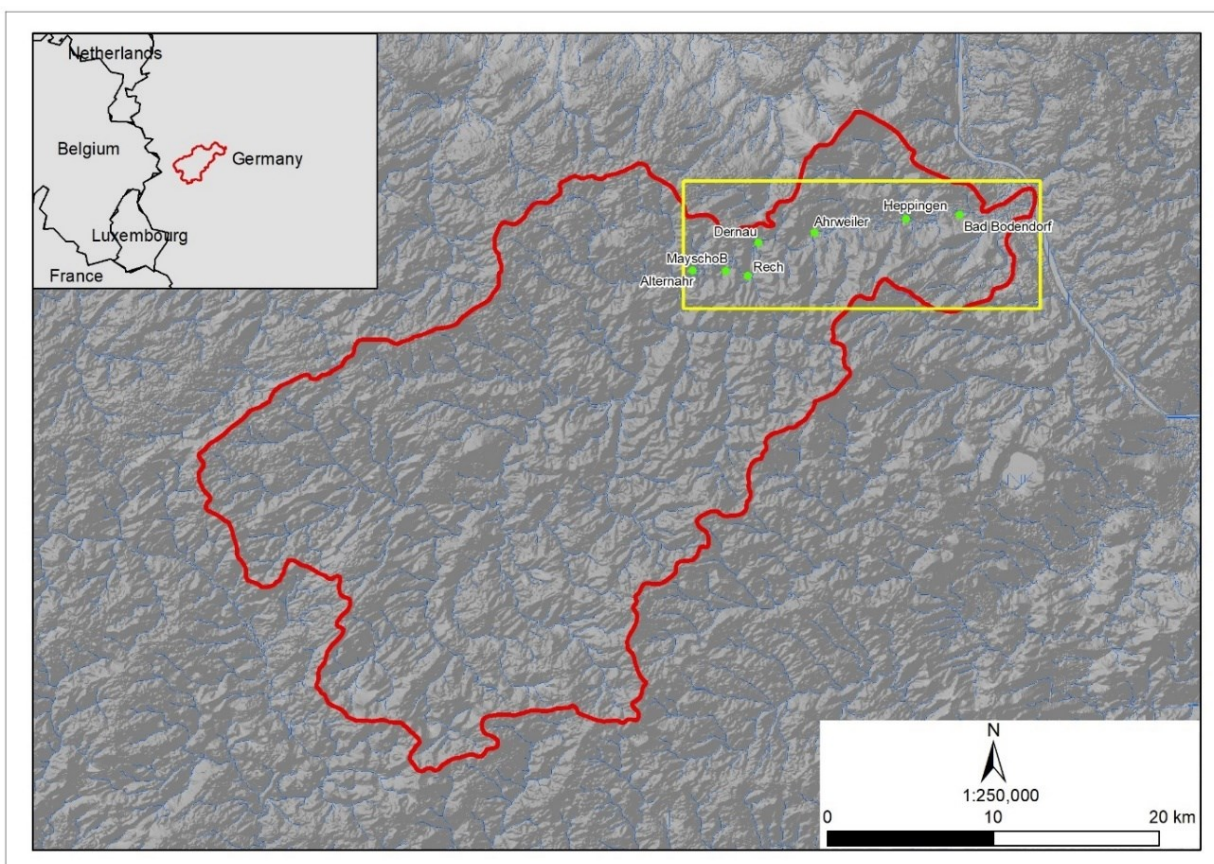
As condições de altitude e relevo tornam toda a área da bacia suscetível à intensificação do escoamento superficial. A bacia de contribuição do rio Ahr possui 897,5 km², e pode ser dividida em duas unidades geomorfológicas distintas. A parte ocidental, entre Ahrbrück e Walporzheim, possui um vale semelhante a um cânion, assim como a maioria das áreas da bacia a montante do Ahr.

A parte leste, a jusante da aldeia de Walporzheim, é formada como um vale fluvial mais amplo e plano, com maior urbanização e impermeabilização, principalmente devido às maiores cidades do vale do Ahr, Bad Neuenahr-Ahrweiler (com aproximadamente 25.000 habitantes) e, mais a jusante, Sinzig (com cerca de 18.000

habitantes). Na parte ocidental, encontram-se cidades consideravelmente menores, com menos de 2.000 habitantes, como Altenahr, Mayschoß, Rech, Dernau e Walporzheim (SZYMCZAK et al., 2022).

Este estudo se concentra na parte mais baixa, entre Ahrbrück e Sinzig, conforme destacado na Figura 4.4.

Figura 4.4: Mapa geral da bacia hidrográfica do rio Ahr indicando a localização das cidades inseridas na área de estudo, estações de medição, afluentes e recorte da região objeto de estudo.



Fonte: autoria própria.

4.4.2 Modelagem hidrodinâmica

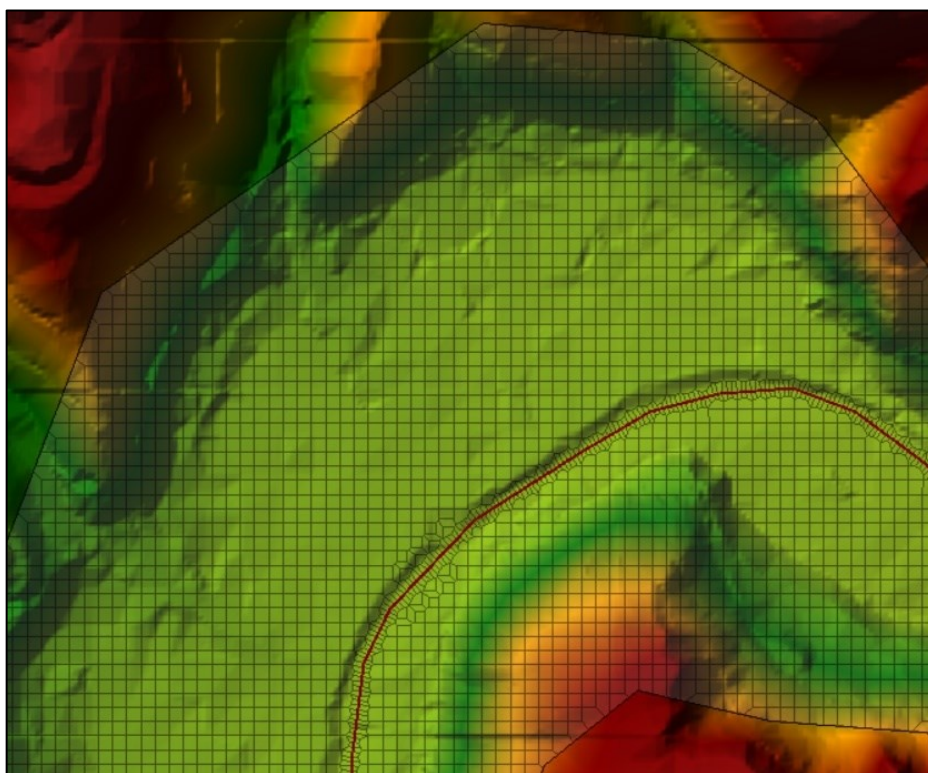
A região definida como objeto de estudo possui aproximadamente 30 km de extensão, abrangendo as cidades de Altenahr, Mayschoß, Rech, Dernau, Ahrweiler, Heppingen e Bed Bodendorf.

A simulação da inundação pelo rio Ahr foi realizada por meio do programa HEC-RAS 6.4, considerando a modelagem de escoamento bidimensional em regime não-

permanente. A escolha se justifica pela gratuidade do modelo e por apresentar interface direta com modelo de estimativa de perdas de vidas LifeSim.

O modelo bidimensional do HEC-RAS é constituído por uma malha 2D (*grid*) ligada ao Modelo Digital de Elevação (MDE), no qual informações de rugosidade e elevação são atribuídas a cada célula do *grid* (USACE, 2018). Para a devida representação geomorfológica da região objeto de estudo, com o intuito de se caracterizar de forma satisfatória a calha principal e a planície de inundação, adotou-se um *grid* com 15 m x 15 m de dimensão, em direção às planícies de inundação, com refinamento de 5 x 5 m no talvegue principal, no qual se fez uso de uma *breakline* (Figura 4.5).

Figura 4.5: Detalhamento da malha 2D do HEC-RAS

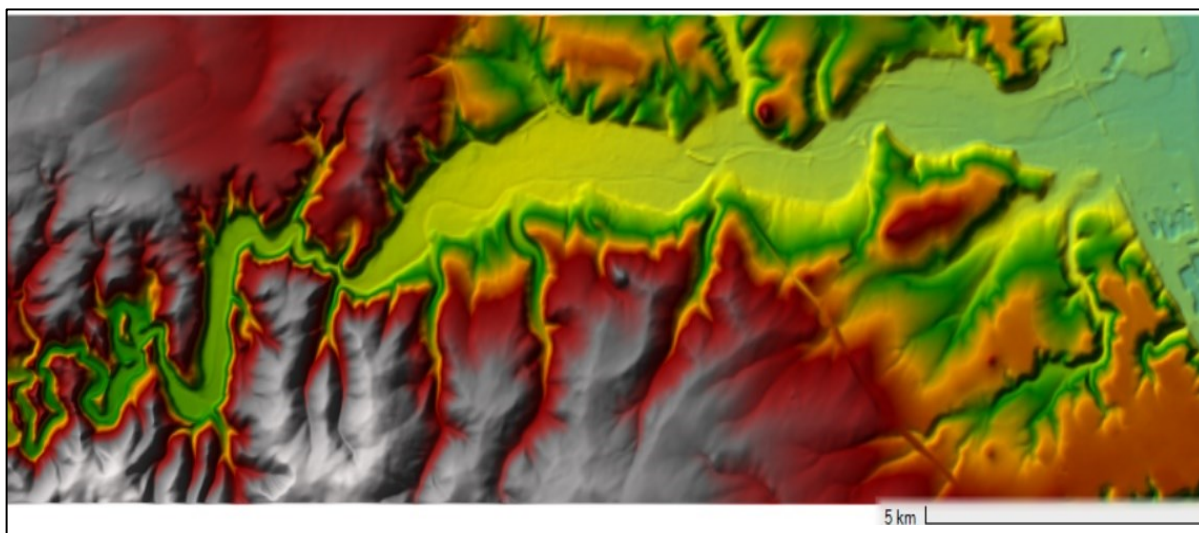


Objetivando a estabilidade do modelo, a condição de Courant foi utilizada para determinação do intervalo computacional.

A base topográfica utilizada, conforme Figura 4.6, foi adquirida por meio do tratamento do MDE proveniente da *Bundesamt für Kartographie und Geodäsie* (BKG), com resolução espacial de 10 metros. Esse MDE é o mesmo utilizado por Apel *et al.* (2022), que desenvolveram uma modelagem hidrodinâmica para simular a inundação ocorrida no rio Ahr. No que diz respeito à qualidade do dado geomorfológico, a partir dos

estudos conduzidos por Apel *et al.* (2022), pode-se notar uma aderência satisfatória da envoltória de inundação máxima obtida ao evento real. Essa constatação indica, entre outros aspectos positivos, que a base topográfica adotada é capaz de refletir com precisão as condições do terreno antes do evento.

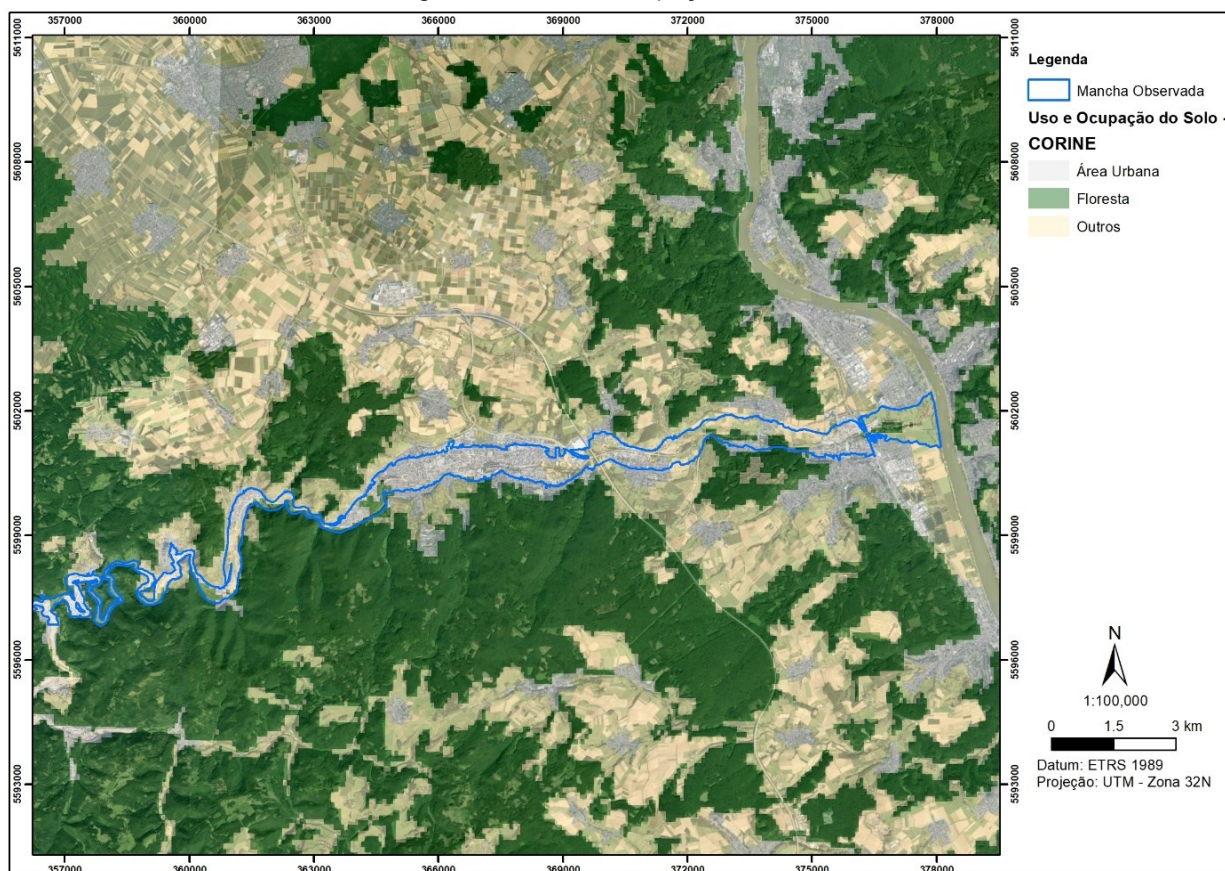
Figura 4.6: Modelo Digital de Elevação (MDE) utilizado



No que diz respeito ao mapeamento de uso e ocupação do solo das áreas de interesse, assim como nos estudos empreendidos por Apel *et al.* (2022), utilizou-se a classificação do uso do solo do CORINE *Land Cover* (CLC) da *European Environmental Agency*, que está disponível abertamente para toda a Europa. O CLC oferece um inventário paneuropeu da cobertura e utilização do solo com 44 classes temáticas. O produto é atualizado com novas camadas de *status* e mudança a cada seis anos, com a atualização mais recente feita em 2018, a qual foi selecionada (CORINE, 2024).

O conjunto de dados *raster* do CLC foi reclassificado em três classes: áreas antropizadas, floresta e todas as outras classes de uso do solo (terras agrícolas, pastagens, corpos d'água etc.) (Figura 4.7). A essas classes foram atribuídos valores de rugosidade de Manning (n): áreas antropizadas: $n = 0,10$; floresta: $n = 0,16$; e todas as outras classes, incluindo o canal do rio e planícies de inundação: $n = 0,05$. Estes valores foram definidos de acordo com as recomendações apresentadas pelo *Natural Resources Conservation Service* (NRCS, 2016).

Figura 4.7: Uso e Ocupação do Solo



Fonte: autoria própria.

Segundo Cieślak *et al.* (2020), por conta dos métodos de interpretação e a depender da natureza detalhada dos dados de entrada, o CLC pode apresentar certas limitações. Em regiões caracterizadas por uma fragmentação significativa do uso e ocupação do solo, os resultados podem ser generalizados para tipos de uso do solo dominantes, o que leva a uma perda de informação. Conforme mostrado na Figura 4.7, os limites provenientes do CLC de cada tipo de uso e ocupação se mostraram coerentes com os limites visuais percebidos pela imagem satélite do *basemap*. As regiões de interface entre classes distintas possuem menor aderência; entretanto, são pouco significativas.

Como condição inicial, utilizou-se o conceito de descarga de margens plenas, definida como a vazão que preenche a calha principal de uma determinada seção fluvial até a cota limiar de extravasamento do escoamento em direção à planície de inundação. Esse nível de água pode ser associado à superfície inundada pelo menos uma vez a cada dois anos (FERNANDEZ, 2003). Segundo Apel *et al.* (2022), para o medidor de

vazão de Altenahr, a profundidade de água de 0,85 m corresponda à profundidade de escoamento com tempo de retorno de 2 anos.

Portanto, como o MDE adotado não contempla a seção principal do rio Ahr, realizou-se o rebaixamento uniforme das células “úmidas”, sob a projeção do espelho de água identificado a partir das imagens satélite do *basemap*. Realizou-se, então, uma simulação com o incremento da vazão correspondente à profundidade 0,85 m na seção de extremo montante do domínio de modelagem, no rio Ahr, e de forma constante no tempo, até que na saída no modelo fosse identificada a mesma vazão de entrada, caracterizando assim um “estado de equilíbrio” em regime “pseudo-permanente”.

A condição de contorno de montante foi definida a partir de três etapas. Primeiramente, obteve-se a curva-chave na seção de montante do domínio do modelo. Para tanto, gerou-se um hidrograma hipotético cuja vazão de pico causasse uma profundidade superior àquela indicada na reconstrução dos níveis de água reais do evento realizada pela Secretaria de Meio Ambiente do Estado Federal Renânia-Palatinado (*Landesumweltamt Rheinland-Pfalz - LfU*), apresentada nos estudos de Apel *et al.* (2022). Essa reconstrução foi necessária porque a estação de Altenahr foi destruída durante o evento. A Figura 4.8 e a Figura 4.9 apresentam a curva-chave e os níveis de água resultantes da reconstrução mencionada, respectivamente.

Figura 4.8: Curva-chave na seção de montante do domínio do modelo

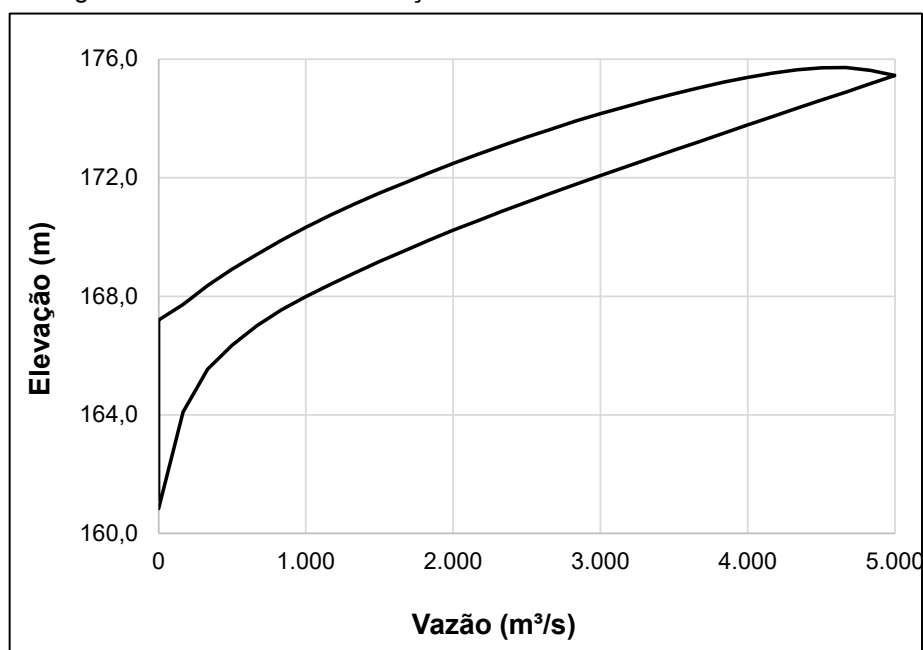
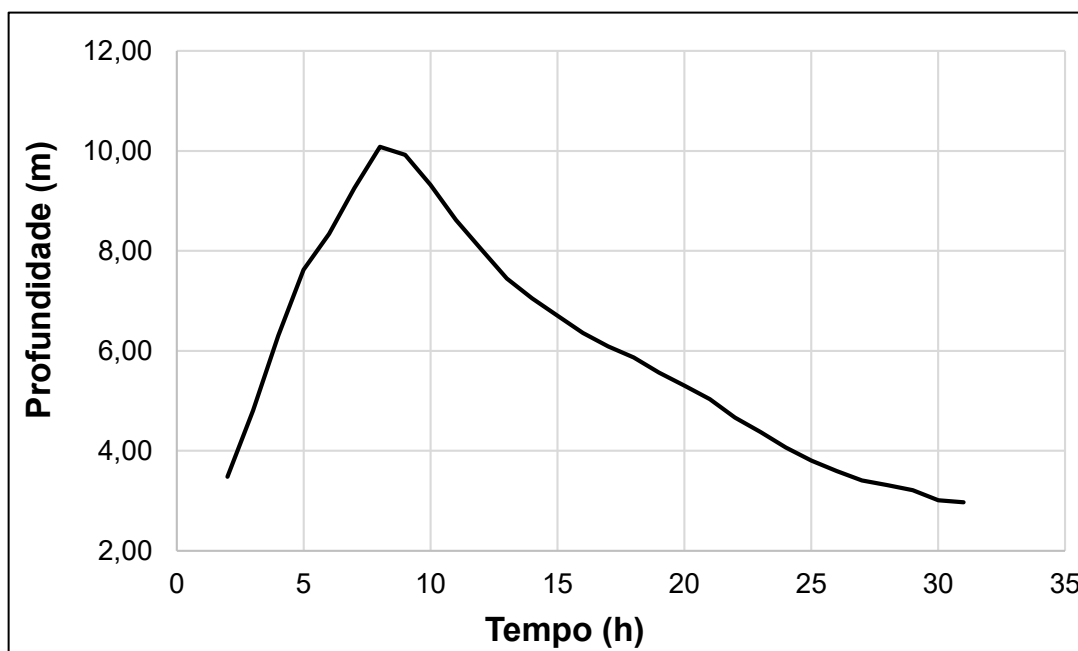


Figura 4.9: Níveis de água resultantes da reconstrução realizada pela Secretaria de Meio Ambiente do Estado Federal Renânia-Palatinado



Como pode-se observar na Figura 4.8, para uma mesma vazão, tem-se dois valores de elevação, em um comportamento que sugere uma curva chave em laço (vazão da cota de cheia diferente da cota de vazante). Diante disso, para o trecho inicial do cotograma, até o pico, foram associadas as elevações às vazões de cheia; e para o trecho final, às vazões de vazante.

Posteriormente, como segunda etapa, os níveis de água apresentados na Figura 4.9 foram transformados em cotas, gerando então um cotagrama (Figura 4.10). Por fim, as vazões correspondentes da curva-chave gerada anteriormente foram associadas ao cotagrama, resultando em um hidrograma com a distribuição de vazões no tempo, conforme apresentado na Figura 4.11.

Figura 4.10: Cotagrama resultante da reconstrução realizada pela Secretaria de Meio Ambiente do Estado Federal Renânia-Palatinado

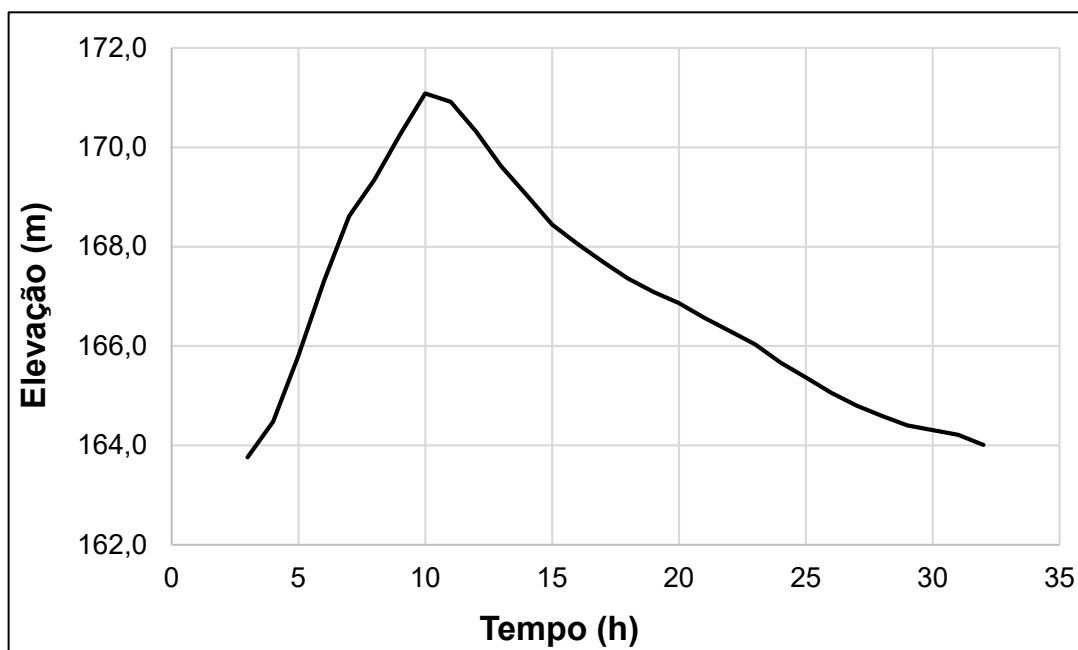
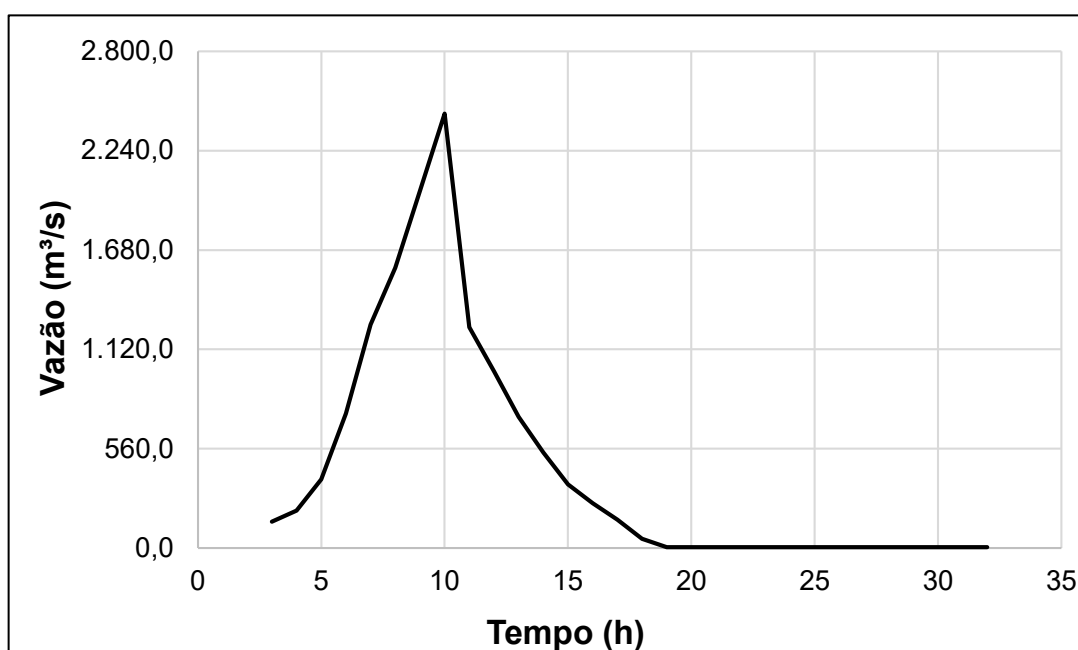


Figura 4.11: Hidrograma resultante da reconstrução realizada pela Secretaria de Meio Ambiente do Estado Federal Renânia-Palatinado



Na extremidade de jusante do modelo, a condição de contorno foi locada a uma distância suficientemente grande da área de interesse, a ponto de se evitar a influência da condição de contorno no escoamento, sendo adotada como a profundidade normal do escoamento.

4.4.3 Cenário de vulnerabilidade e exposição

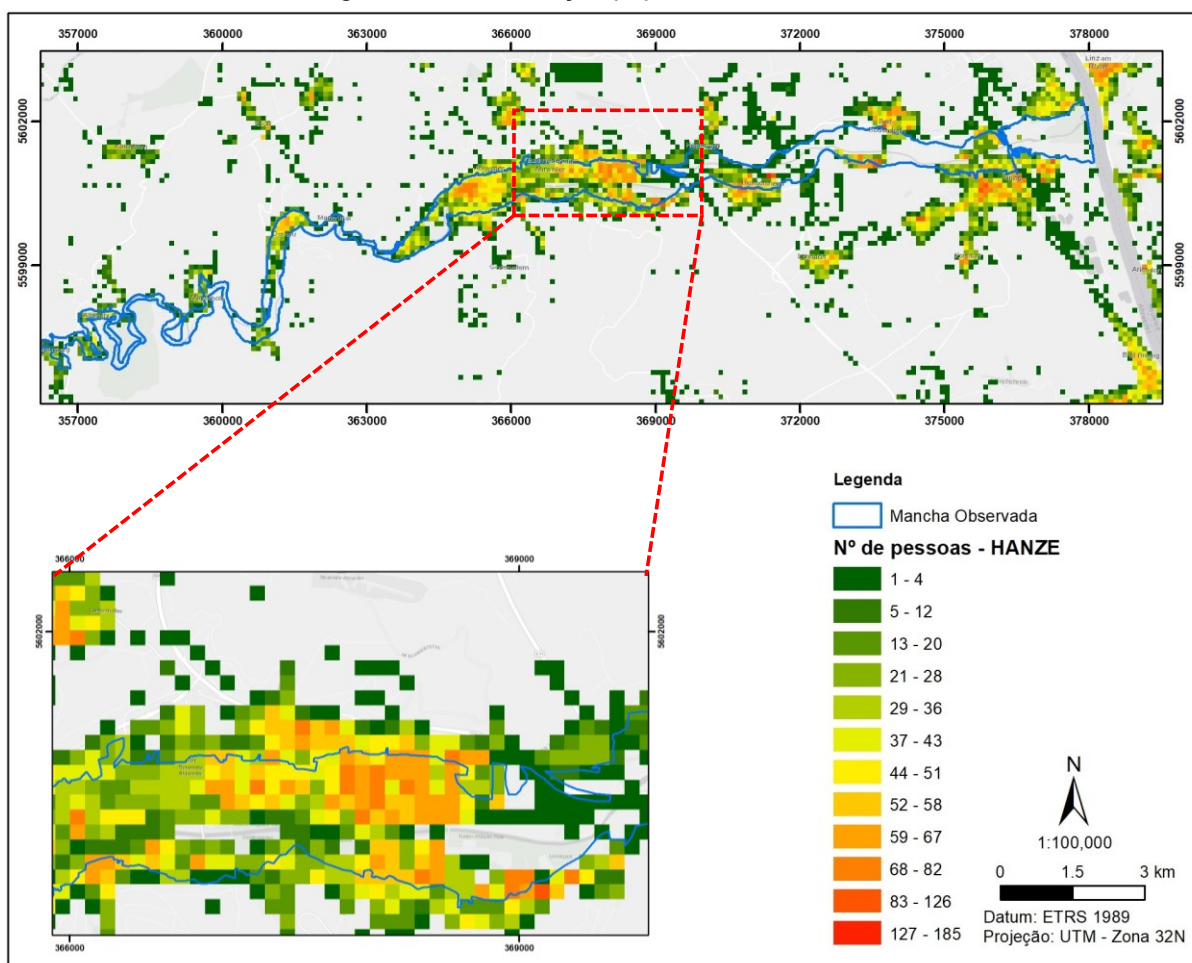
O cenário de vulnerabilidade e exposição foi estabelecido, em suma, com base no cruzamento das informações contidas no conjunto de dados da grade populacional *Historical Analysis of Natural Hazards in Europe* (HANZE) e do levantamento cadastral das edificações da região de interesse pertencentes ao OSM (*OpenStreetMap*).

O HANZE, lançado em 2017, foi o primeiro conjunto de dados de exposição abrangente com resolução correspondente aos mapas de risco de inundações paneuropeus, ou seja, 100 m, cobrindo os anos de 1870 a 2015 com uma projeção de curto prazo para 2020. Foi projetado especificamente para possibilitar a análise da exposição e da mudança de uso da terra dentro das manchas de inundações históricas conhecidas, sendo utilizado em vários estudos subsequentes (PAPROTNY; MENGEL, 2023).

O HANZE fornece informações populacionais para 37 países e territórios europeus, e quantifica a evolução dos principais impulsionadores socioeconômicos na Europa, como: uso da terra, população, atividade econômica e ativos. Consiste em um conjunto de algoritmos capaz de estimar o uso da terra e a população para qualquer ano, tendo como linha de base o ano de 2011, a partir de uma grande coleção de estatísticas históricas subnacionais e nacionais. Os conjuntos de dados *raster* gerados pelo modelo permitem reconstituir a exposição dentro do alcance de qualquer evento extremo, tanto no momento da ocorrência quanto em qualquer momento entre 1870 e 2020 (PAPROTNY *et al.*, 2018; PAPROTNY; MENGEL, 2023).

A Figura 4.12 apresenta a distribuição populacional extraída do HANZE referente ao ano de 2020, utilizada no estudo para o trecho de interesse do rio Ahr.

Figura 4.12: Distribuição populacional do HANZE

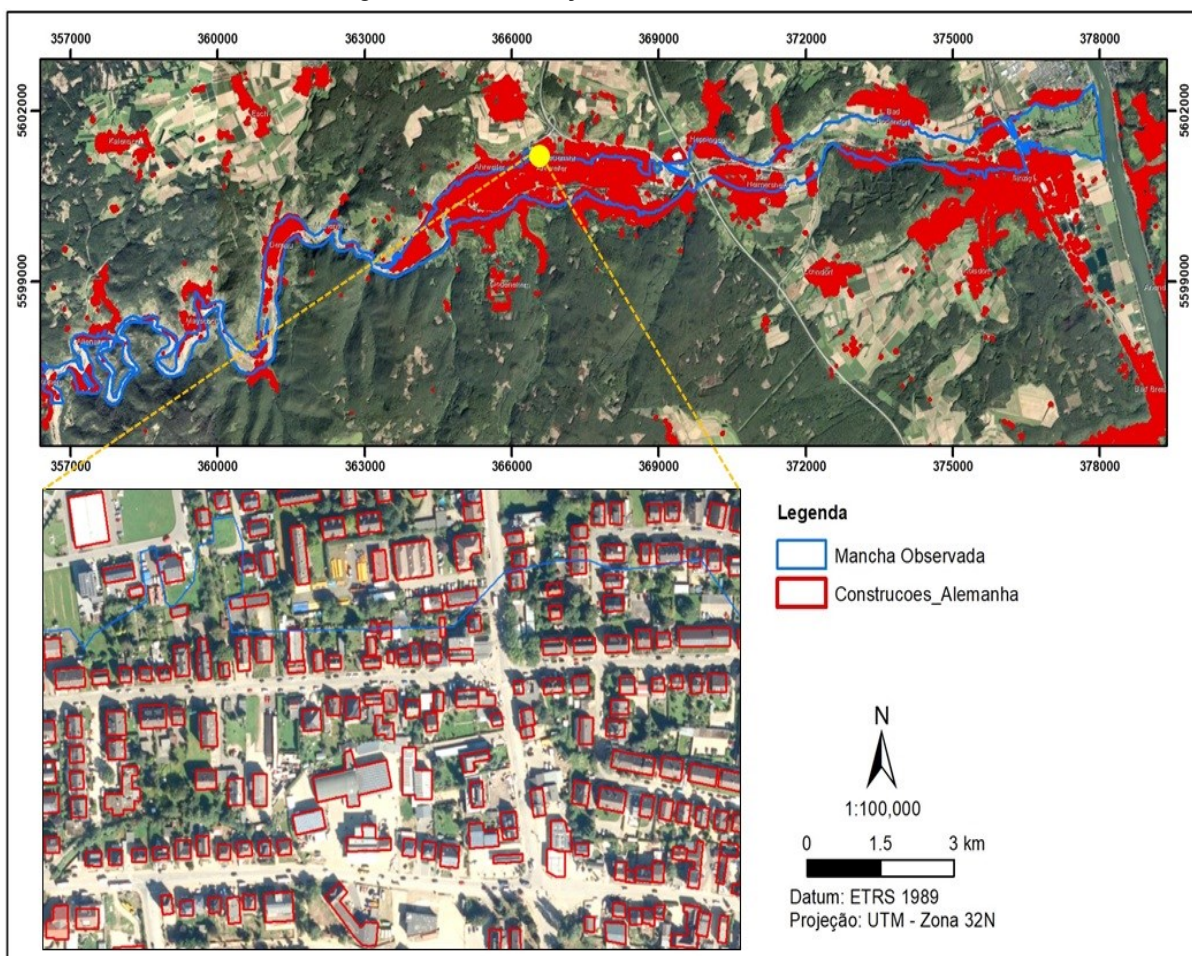


Fonte: autoria própria.

O OSM, por sua vez, é um serviço de mapas editáveis disponibilizados de forma gratuita, constituído pela colaboração da comunidade e criado como uma alternativa às fontes de acesso restrito. Pelo fato de ser composto pela contribuição de voluntários com diferentes habilidades de mapeamento, o detalhamento e a qualidade das informações são heterogêneas em diferentes locais geográficos. Apesar disso, o OSM tem sido amplamente utilizado em várias aplicações nas geociências e ciências ambientais (VARGAS *et al.*, 2021).

O perímetro das edificações cadastradas no OSM para a área atingida pela inundação ocorrida em junho de 2021 é apresentado na Figura 4.13.

Figura 4.13: Edificações cadastradas no OSM



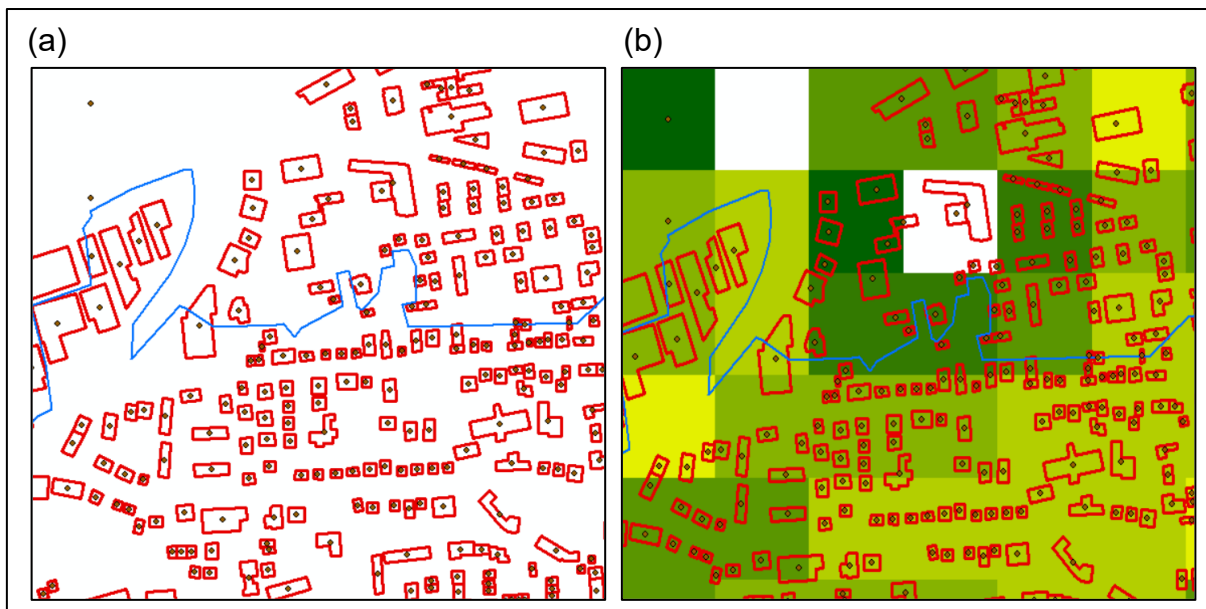
Fonte: autoria própria.

Para o cruzamento das informações, primeiramente, gerou-se para cada área de edificação cadastrada no OSM um único ponto no centroide (Figura 4.14 (a)). Então, dividiu-se o número de pessoas dentro do *grid* do HANZE, com unidades (ou células) retangulares de 100 m x 100 m de dimensão, pelo número de pontos provenientes do OSM em seu interior. O valor obtido foi então arredondado para cima. Por exemplo, um *grid* do HANZE com uma estimativa de 100 pessoas com 15 pontos do OSM contidos dentro de seus limites, resultaria, a partir da divisão, em um total de 6,67 pessoas por edificação, totalizando 7 pessoas por estrutura.

Nesse processo, as células do HANZE, em alguns casos, não apresentaram nenhuma edificação proveniente do OSM em seu interior. O inverso também ocorreu, em que edificações do OSM não estavam associadas a nenhuma unidade do *grid* do HANZE com dados populacionais. Nessas ocorrências, considerou-se zero pessoas nas

edificações não associadas ao *grid*, e pelo menos uma pessoa nas células do HANZE sem estruturas do OSM, situações apresentadas na Figura 4.14.

Figura 4.14: Processo para definição do inventário de construções



Fonte: autoria própria.

4.4.4 Modelagem de perdas de vida

Para a construção da modelagem de perdas de vida no LifeSim, é preciso fornecer as seguintes informações: (i) os resultados do modelo hidrodinâmico do evento que se pretende simular, no caso a inundação ocorrida na Alemanha em junho de 2021 no rio Ahr; (ii) os dados do inventário de estruturas e da população; (iii) o sistema viário a ser utilizado para evacuação, com o deslocamento dos indivíduos para fora das zonas de risco; (iv) os locais seguros, destino almejado por aqueles que estão sob a ameaça das inundações; e (v) a delimitação e o detalhamento da Zona de Planejamento de Emergência (ZPE).

O modelo hidrodinâmico utilizado foi caracterizado no item 4.4.2 e teve início 33 horas antes do perigo iminente para o estabelecimento das condições iniciais. O perigo iminente foi considerado às 17h00 do dia 13/07/2021, momento no qual é identificada uma mudança do comportamento das vazões afluentes, caracterizada por uma curva ascendente do hidrograma afluente.

O inventário de estruturas e populacional foi exibido no item 4.4.3, de vulnerabilidade e exposição. Além das informações contidas nesta seção, é preciso ainda classificar o tipo de construção das edificações de acordo com o LifeSim, modelo de perdas de vida utilizado, conforme apresentado no item 2.3.1. Para tanto, foram associadas as descrições contidas no OSM para cada edificação à classificação do LifeSim. Todas essas informações, somadas à especificação do número de andares de cada estrutura, podem ser vistas no Apêndice A.

Em suma, das 18.883 edificações cadastradas, 17.740 foram consideradas em alvenaria e 145 em concreto, todas dentro do mesmo grupo de critério de estabilidade do LifeSim, denominado alvenaria; dessas, 456 foram consideradas com três andares (ex.: apartamentos e hotéis), 1.023 com um andar (construções térreas) e o restante (17.404) com dois andares (ex.: casas, escolas, escritórios).

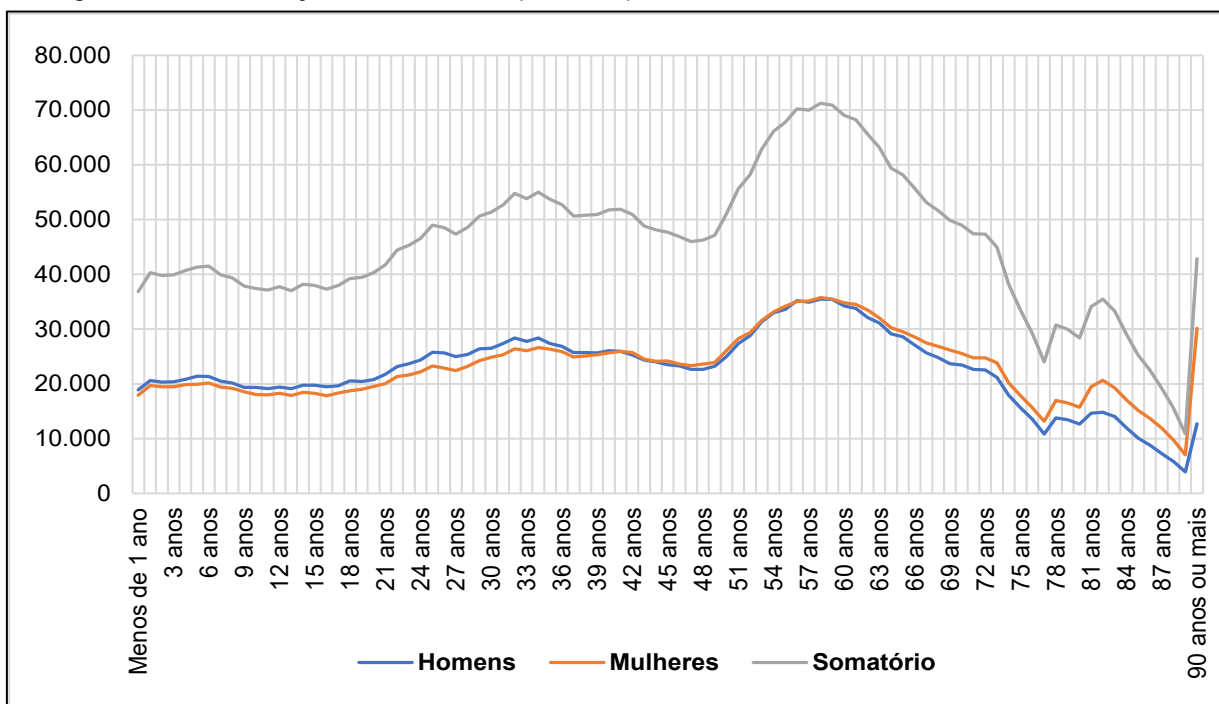
Complementarmente, também é necessário indicar determinadas características das construções para compreender a resistência de cada edificação ao escoamento, como a profundidade da fundação, altura do piso térreo, altura acima do piso térreo e altura do sótão, apresentadas na Tabela 4.1. Os valores utilizados são os padrões considerados pelo LifeSim.

Tabela 4.1: Características das construções

Profundidade da fundação (m) / (pés)	Altura do piso térreo (m) / (pés)	Altura acima do piso térreo (m) / (pés)	Altura do sótão (m) / (pés)
0,30 / 1,00	2,74 / 9,00	2,74 / 9,00	1,83 / 6,00

Com relação à população, de forma a complementar os dados, o Instituto Federal de Estatística da Alemanha (*Destatis*) aponta, em seu levantamento de 2022, que na Renânia-Palatinado aproximadamente 79% da população têm menos de 65 anos e 21% têm mais de 65 anos (DESTATIS, 2024). Essas informações são necessárias para modelagem de perdas de vida no LifeSim, uma vez que a idade avançada penaliza a mobilidade dos indivíduos, que pode ser determinante em uma estimativa mais realista das consequências do evento. O gráfico mostrado na Figura 4.15 mostra a distribuição do número de pessoas por faixa etária e sexo na Renânia-Palatinado.

Figura 4.15: Distribuição do número de pessoas por faixa etária e sexo na Renânia-Palatinado



Fonte: Adaptado de DESTATIS (2024).

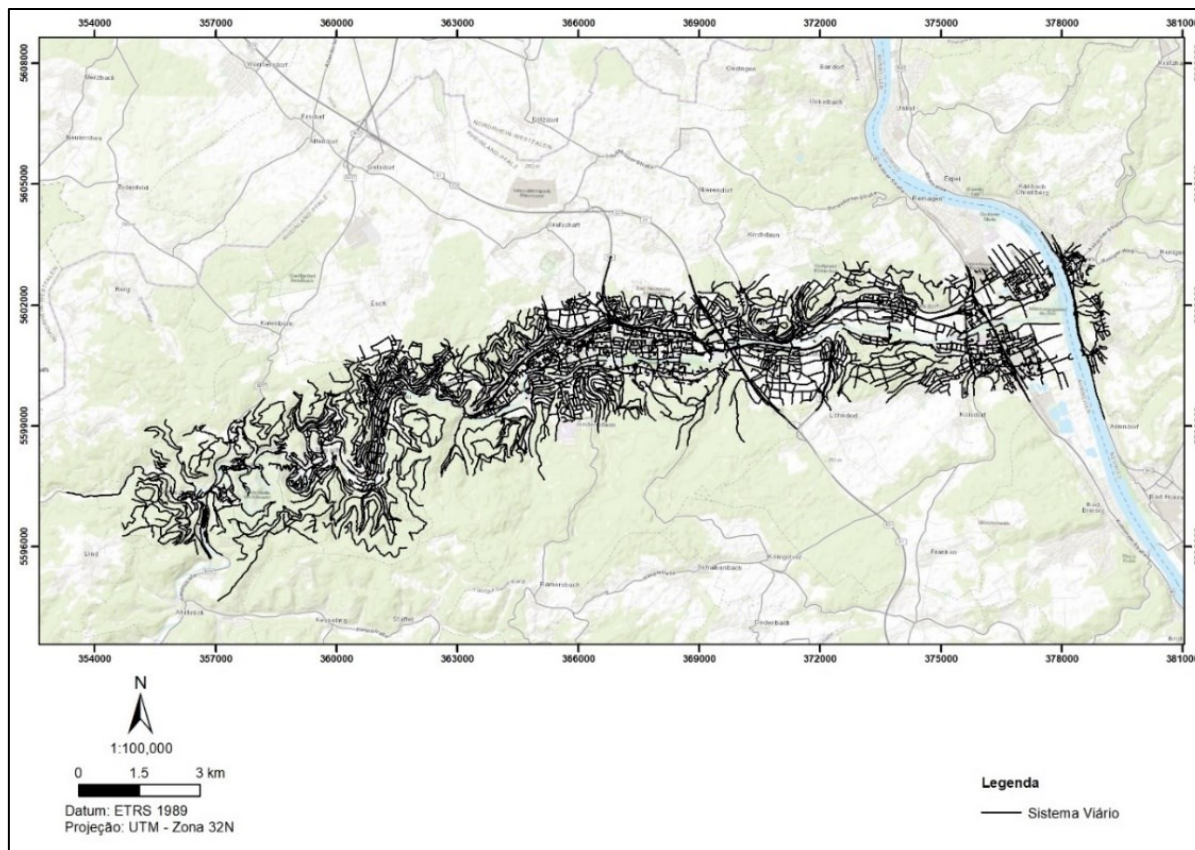
O número de veículos considerado na simulação, que são utilizados na evacuação pelas vias cadastradas no modelo, é determinado pela porcentagem de pessoas que evacuaram por esse meio e pelo número de pessoas médio em cada veículo. Para o presente estudo, variou-se o percentual de pessoas que evacuaram em veículos nos diferentes cenários e considerou-se um número médio de três pessoas por veículo.

Nas situações em que veículos ou pessoas são surpreendidos por inundações durante a evacuação, aplicam-se critérios de estabilidade definidos no *software*, conforme detalhado na seção 2.3.1. De acordo com o especificado nessa mesma seção, para representar a dinâmica da evacuação, o modelo de transporte de Greenshields *et al.* (1935) é empregado para ilustrar os impactos da densidade de tráfego e da capacidade da via na velocidade dos veículos. O sistema viário, por sua vez, foi retirado do OSM (Figura 4.16), considerando um *buffer* de 1.000 m da envoltória de inundação máxima real.

Complementarmente, o LifeSim permite que o usuário altere as seguintes informações: velocidade dos pedestres; fração de veículos baixos vs. altos; fração da população que altera a rota quando o trânsito está congestionado; profundidade a partir da qual as pessoas deixam de evacuar das estruturas que estão; e fração da

população que sabe nadar. Para essas condicionantes, mantiveram-se os valores padrão do *software*, conforme apresentado na Tabela 4.2.

Figura 4.16: Sistema viário considerado



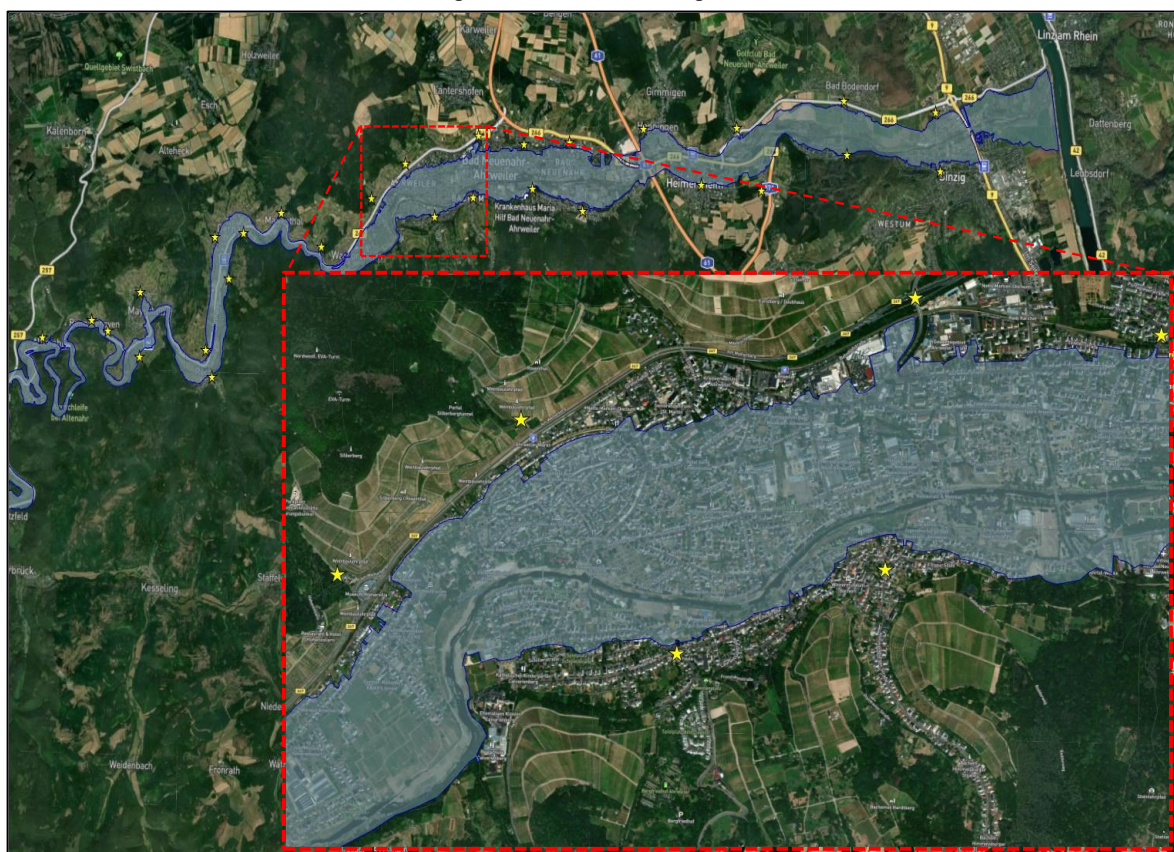
Fonte: autoria própria.

Tabela 4.2: Parâmetros para a evacuação para as simulações do rio Ahr

Condicionante	Unidade	Valor
Velocidade dos pedestres	m/s	0,45
Fração de veículos baixos vs. Altos	%	50,0
Fração da população que altera a rota	%	80,0
Profundidade de não evacuação das estruturas	m	2,0
Fração da população que sabe nadar	%	45,0

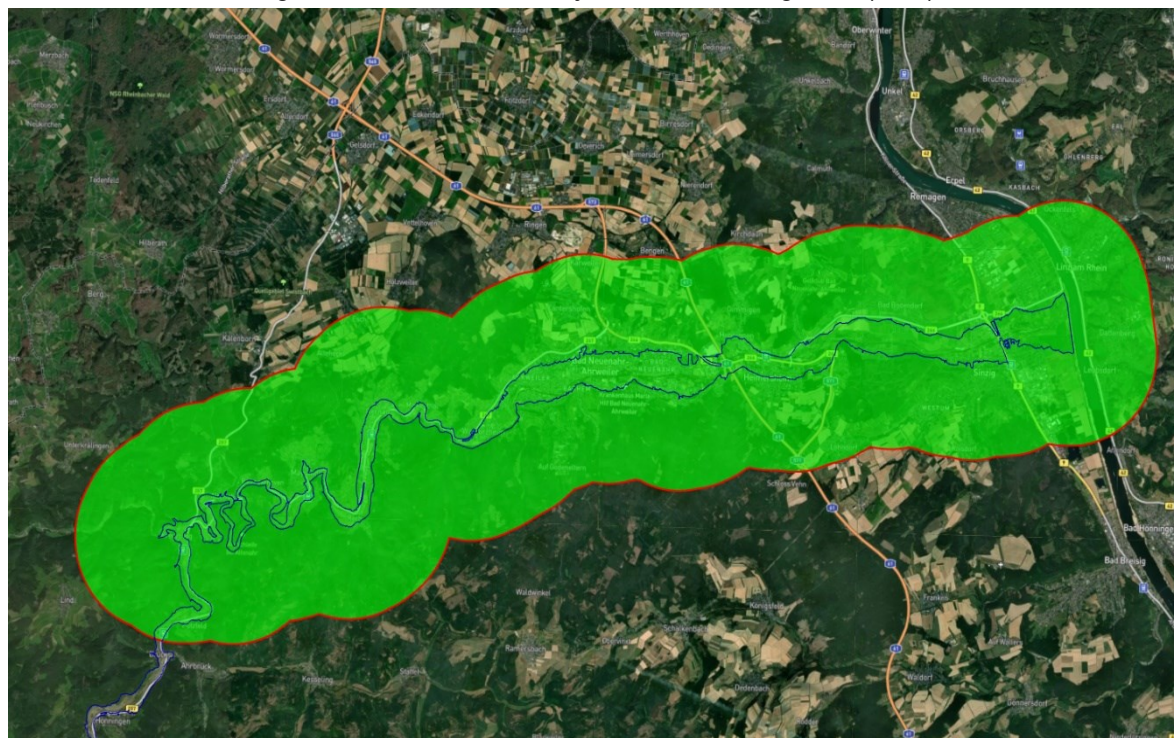
Os locais seguros foram considerados fora da abrangência da mancha de inundação observada, representados por uma simbologia de estrela amarela na Figura 4.17. A ZPE foi definida a partir de um *buffer* de 2.000 m da mancha de inundação observada no evento ocorrido, vista na Figura 4.18.

Figura 4.17: Locais seguros



Fonte: autoria própria.

Figura 4.18: Zona de Planejamento de Emergência (ZPE)



Fonte: autoria própria.

Para se detalhar todo o processo considerado na ZPE, é preciso compreender como se deram: (i) a identificação do perigo iminente; (ii) o tempo para a comunicação do perigo; (iii) a notificação aos órgãos responsáveis; (iv) o tempo para a emissão do alerta; (v) o momento da emissão do alerta para a evacuação da população; (vi) o tempo para a difusão do primeiro alerta; (vii) o momento em que o primeiro alerta foi recebido; (viii) o tempo para o início da evacuação da população; (ix) o momento em que se deu o início da evacuação; e (x) o tempo para a mobilização até que o destino seguro fosse alcançado.

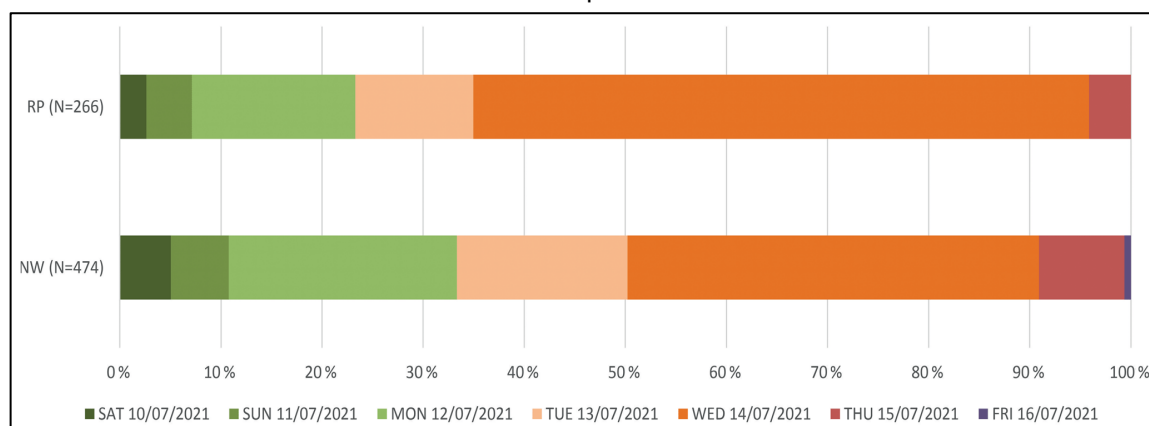
Isso posto, para se caracterizar cada uma dessas fases, é preciso antes “retornar” ao evento ocorrido e buscar extrair tais informações para a elaboração dos cenários de simulação. As informações apresentadas a seguir são baseadas nos estudos conduzidos por Thieken *et al.* (2023).

No que diz respeito ao alerta, uma porcentagem significativa da população afetada pelas inundações na Alemanha em julho de 2021 não recebeu nenhum alerta antes das inundações. Uma entrevista realizada por Thieken *et al.* (2023) após o ocorrido apontou que 35% e 29% dos residentes entrevistados da Renânia do Norte-Vestfália e Renânia-Palatinado, respectivamente, não receberam nenhum alerta.

Em outro questionamento da entrevista, buscou-se compreender a antecedência com que os alertas chegaram às pessoas antes das inundações na Alemanha em julho de 2021. No estado de Renânia do Norte-Vestfália 40% dos respondentes afirmaram que receberam o primeiro alerta no dia 14 de julho de 2021, enquanto na Renânia-Palatinado 61% dos respondentes relataram o mesmo. Além disso, o segundo dia mais frequente de recebimento do primeiro alerta foi o dia 12 de julho de 2021, com 23% em Renânia do Norte-Vestfália e 16% em Renânia-Palatinado.

No total, cerca de 35% dos residentes alertados em Renânia-Palatinado receberam seu primeiro alerta antes de 14 de julho, e essa porcentagem foi de 50% em Renânia do Norte-Vestfália. Até o final do dia 14 de julho de 2021, a soma cumulativa de alertas recebidos pela primeira vez subiu para 95% em Renânia-Palatinado e 90% em Renânia do Norte-Vestfália. Um resumo dessas informações é apresentado na Figura 4.19.

Figura 4.19: Dia em que 740 respondentes da Renânia do Norte-Vestfália e da Renânia-Palatinado receberam um primeiro alerta.



Fonte: Thieken *et al.* (2023)

A mobilização das pessoas em áreas de risco após receberem o alerta foi desafiadora. Embora algumas pessoas tenham recebido os alertas, a compreensão e a credibilidade das mensagens de alerta variaram. Muitos dos residentes afetados não tinham conhecimento situacional sobre como se proteger adequadamente ou mitigar danos, refletindo uma falha na comunicação efetiva da magnitude do evento iminente e das ações de proteção adequadas.

Complementarmente, o artigo de Thieken *et al.* (2023) menciona que as mensagens de alerta oficial continham todas as informações necessárias, mas não foram adaptadas à magnitude da inundação, resultando em recomendações inadequadas para a situação real. Por exemplo, no distrito fortemente afetado de Ahrweiler, um aplicativo de alerta advertiu contra níveis de água superiores a 5 metros em 14 de julho de 2021, excedendo significativamente o nível de inundação de 100 anos, de cerca de 3,7 metros. No entanto, as ações de proteção recomendadas para as pessoas afetadas incluíam somente evitar porões, estacionamentos subterrâneos e dirigir em ruas inundadas, ações insuficientes dada a gravidade da situação.

Mais de 330 pessoas foram resgatadas por helicópteros dos telhados de suas casas ou de árvores, ilustrando a gravidade da situação e a insuficiência das medidas de proteção recomendadas. A declaração de estado de emergência e a solicitação para que as pessoas evacuassem suas casas foram feitas tarde demais, aumentando os riscos e a periculosidade da situação.

Diante o exposto, de forma a não só reconstituir o ocorrido, mas também compreender a influência de uma gestão de risco de inundações adequada sobre o número de fatalidades, foram estabelecidos diferentes cenários, apresentados na Tabela 4.3.

Os cenários da Tabela 4.3 foram divididos em quatro grupos (A, B, C e D), todos considerando o perigo iminente às 17h00 do dia 13/07/21. Devido à dificuldade de se obter informações detalhadas sobre o tempo de notificação aos órgãos responsáveis e o tempo para a emissão do alerta (sexta e sétima colunas da Tabela 4.3), esses tempos não foram detalhados, considerando-se somente o momento em que se identificou o perigo (quinta coluna da Tabela 4.3).

Os tempos para a difusão do primeiro alerta e para a mobilização foram caracterizados pelas curvas propostas por Mileti e Sorensen (2017b, 2017c), conforme descrito no item 2.3.1, e variaram nos diferentes cenários. O modo de evacuação foi variado apenas no Grupo A, no qual foram inclusos evacuação 100% a pé, e evacuação 50% em veículos e 50% a pé. Nos demais, foi considerada a evacuação 100% em veículo (penúltima coluna da Tabela 4.3).

Tabela 4.3: Cenários simulados

Grupo	Descrição	Cenários	Perigo iminente	Perigo iminente identificado	Tempo para a notificação do perigo ao órgão responsável	Tempo para a emissão de alerta	Tempo para a difusão do primeiro alerta	Tempo para a mobilização	Tempo para a evacuação	Faixa etária
A	Restituição do ocorrido	1							100% a pé	
		2	13/07/21 às 17:00	12/07/21 às 23:59	N/A	N/A	Difusão: Lenta	Percepção: baixa Preparação: baixa	50% em veículo e 50% a pé	79% < 65 anos 21% > 65 anos
		3							100% em veículo	
B	Análise de sensibilidade 1	4		N/A			N/A	N/A		
		5	13/07/21 às 17:00	14/07/21 às 00:00	N/A	N/A	Difusão: Lenta	Percepção: baixa Preparação: baixa	100% em veículo	79% < 65 anos 21% > 65 anos
		6		13/07/21 às 17:00						
C	Análise de sensibilidade 2	7	13/07/21 às 17:00	11/07/21 às 23:59	N/A	N/A	Difusão: Lenta	Percepção: baixa Preparação: baixa	100% em veículo	79% < 65 anos 21% > 65 anos
		8		10/07/21 às 23:59						
D	Análise de sensibilidade 3	9		12/07/21 às 23:59						
		10	13/07/21 às 17:00	11/07/21 às 23:59	N/A	N/A	Difusão: Moderada	Percepção: moderada Preparação: moderada	100% em veículo	79% < 65 anos 21% > 65 anos
		11		10/07/21 às 23:59						
E	Análise de sensibilidade 4	12		12/07/21 às 23:59						
		13	13/07/21 às 17:00	11/07/21 às 23:59	N/A	N/A	Difusão: Rápida	Percepção: alta Preparação: alta	100% em veículo	79% < 65 anos 21% > 65 anos
		14		10/07/21 às 23:59						

O LifeSim determina a taxa de pessoas com dificuldade de mobilidade com base na idade populacional e permite apenas duas possibilidades, podendo ser superior a 65 anos, com uma fração de 22,6%, ou inferior a 65 anos, com uma fração de 5,10%. Diante disso, de acordo com as informações levantadas, considerou-se 79% da população com idade inferior a 65 anos e 21% com idade superior a 65 anos (última coluna da Tabela 4.3).

Os cenários 1, 2 e 3, pertencentes ao Grupo A, refletem o ocorrido. Adotou-se, portanto, a identificação do perigo iminente no final do dia 12/07/21 nesses cenários. Essa escolha foi feita porque, de acordo com Thieken *et al.* (2023), o dia 12 foi o segundo dia com maior recebimento de primeiro alerta, atrás somente do dia 14. Dessa forma, a disseminação do alerta ocorre a partir deste instante na simulação.

No Grupo B, os cenários 4, 5 e 6 buscam responder, a partir de uma análise de sensibilidade, qual seria o número máximo de fatalidades no evento. Nesse sentido, o cenário 4 não considera nenhum alerta e nenhuma mobilização durante o evento. Os cenários 5 e 6 consideram a identificação do perigo às 00h00 do dia 14/07/21 (dia mais frequente de recebimento do primeiro alerta) e 17h00 do dia 13/07/21, respectivamente. Para ambos, foram adotadas uma difusão lenta do primeiro alerta e um tempo elevado para a mobilização, por considerar-se baixa a percepção do risco e a preparação da população para emergências.

Os grupos C, D e E têm por objetivo avaliar se o aprimoramento da gestão de emergência de inundações proporcionaria a redução das fatalidades. Para tanto, variaram-se a antecipação da identificação do perigo iminente, a difusão do primeiro alerta e a mobilização, ao elevar a percepção e preparação da população frente ao risco.

Para cada um dos 14 cenários foram realizadas 1.000 interações, seguindo Hill *et al.* (2018), para a representação probabilística do modelo. Destaca-se que o LifeSim emprega a técnica de amostragem de Monte Carlo, selecionando aleatoriamente diferentes valores para os parâmetros do modelo, como a taxa de fatalidade. Assim, o modelo fornece uma estimativa probabilística das fatalidades, conforme discutido no item 4.5.

4.5 Resultados e discussões

4.5.1 Simulação hidrodinâmica do evento

A modelagem hidrodinâmica, desenvolvida considerando o hidrograma resultante da reconstrução dos níveis de água do medidor de Altenahr, foi validada a partir da comparação dos resultados obtidos com o mapeamento das áreas inundadas após o evento.

Conforme Figura 4.20, a qual exibe a envoltória máxima da inundação simulada em comparação ao mapeamento das áreas reais atingidas, obteve-se uma alta concordância entre a simulação e o evento em termos de lateralidade das manchas, o que respalda a confiança nos resultados da simulação.

Para além da análise visual, aplicou-se também a métrica de comparação de padrões binários $F^{(2)}$, também denominada índice de sucesso crítico ou pontuação de ameaça, apresentada por Aronica *et al.* (2002), cuja formulação é apresentada na equação 4.1:

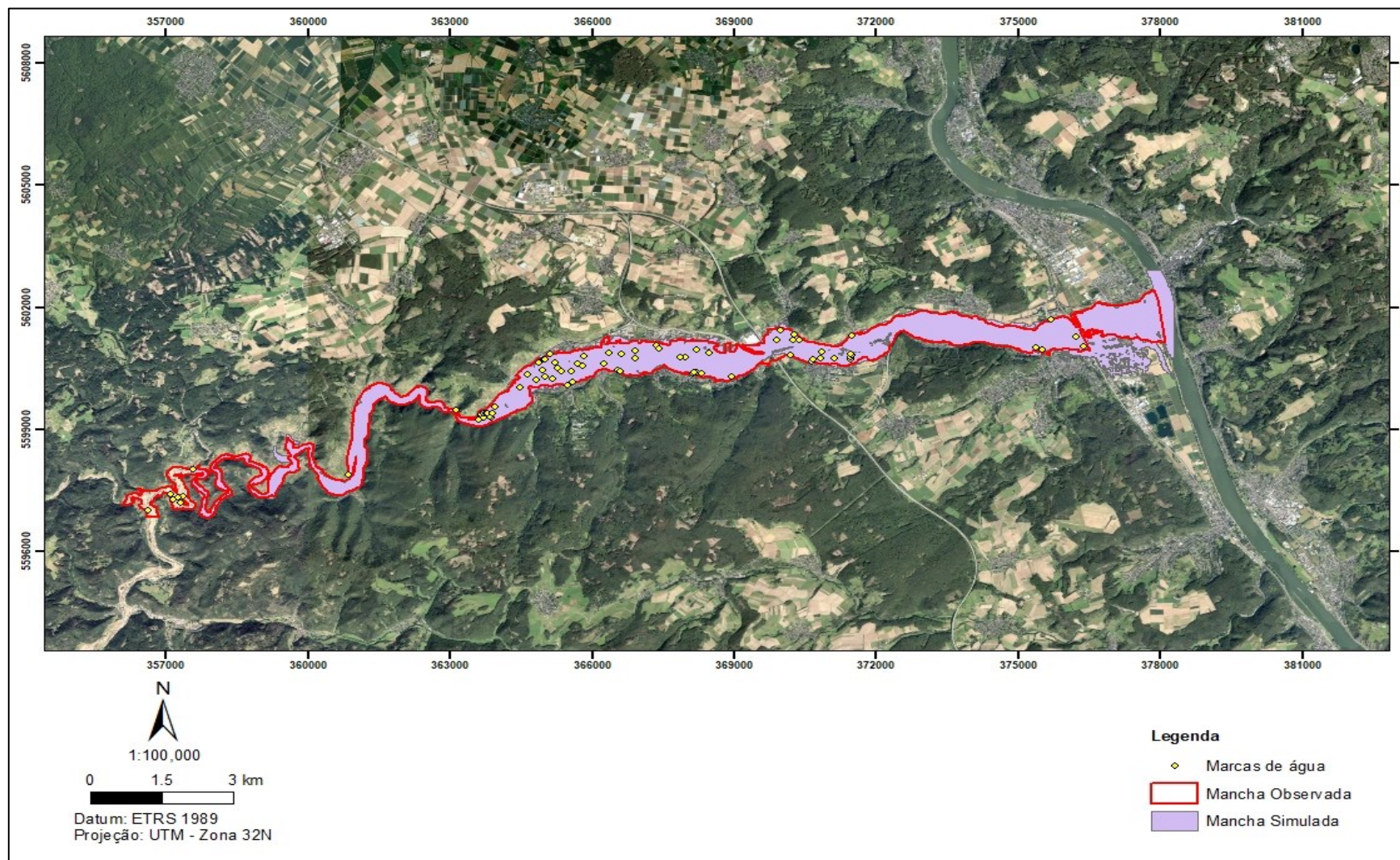
$$F^{(2)} = \frac{A_{obs} \cap A_{mod}}{A_{obs} \cup A_{mod}} \quad 4.1$$

Em que A_{obs} e A_{mod} representam o conjunto de pixels observados inundados e o conjunto de pixels da simulação inundados. O $F^{(2)}$ foi calculado em 0,83 (12,22 km² / 14,72 km²), valor avaliado como de desempenho muito alto para simulações hidrodinâmicas de inundação.

Adicionalmente, utilizou-se das marcas de água nas edificações da região, indicadas por 75 pontos amarelos na Figura 4.21 e reportadas pelos habitantes, para avaliar as profundidades de água simuladas. É importante ressaltar que as profundidades relatadas variam conforme as referências verticais (ex.: ruas e calçadas), as quais foram devidamente tratadas e consideradas na análise. A diferença média entre as profundidades reportadas e as simuladas foram de 0,88 m. Levando em conta a resolução usado do MDE de 10 m e a simulação não calibrada, consideram-se aceitáveis essas discrepâncias.

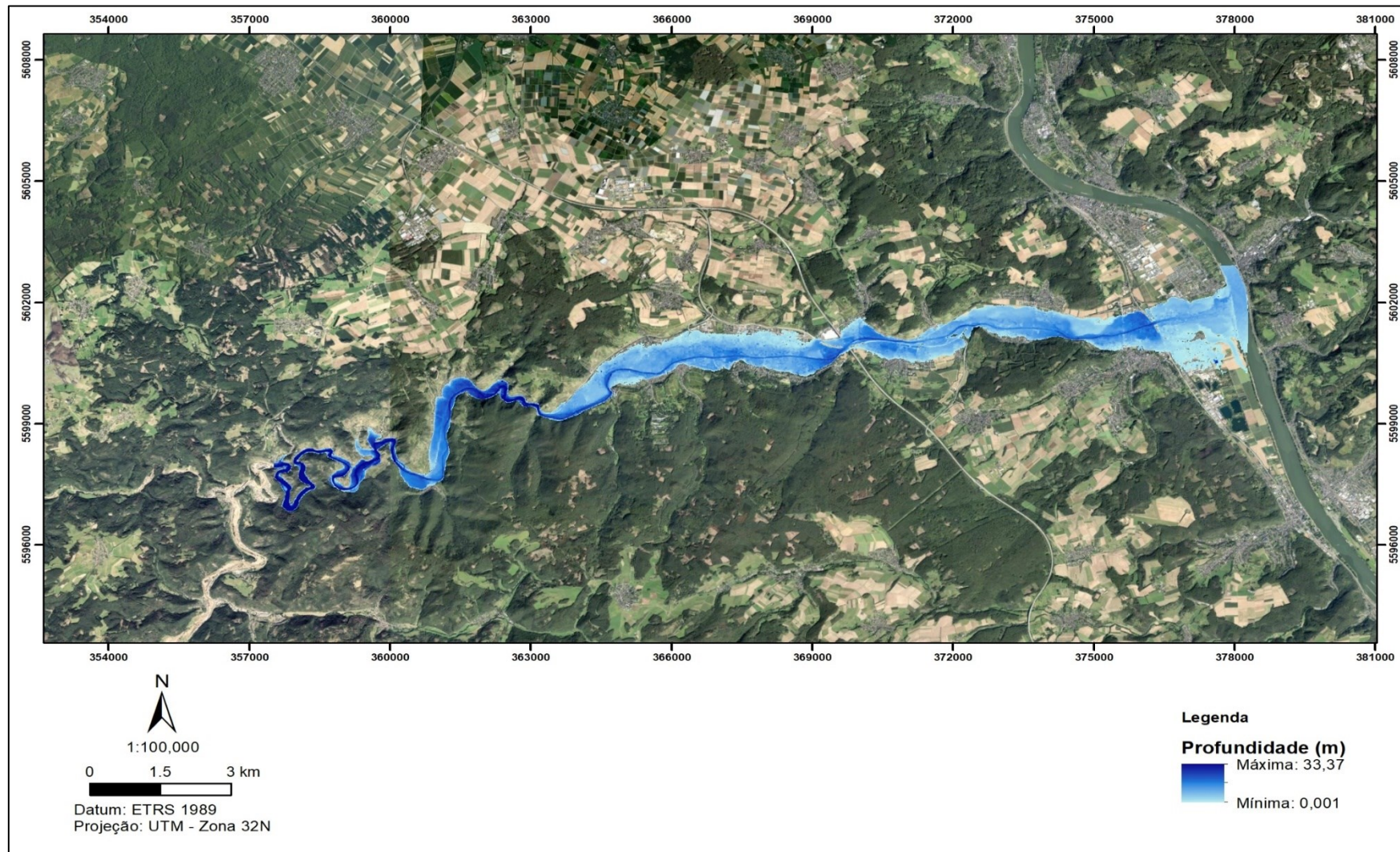
Na Figura 4.22 as velocidades máximas de fluxo simuladas são apresentadas. Essas velocidades são coerentes com as esperadas em um evento dinâmico dessa natureza, variando de 2 a 9 m/s no rio.

Figura 4.20: Envolvória máxima da inundação proveniente da simulação hidrodinâmica do cenário derivado da previsão de Altenahr.



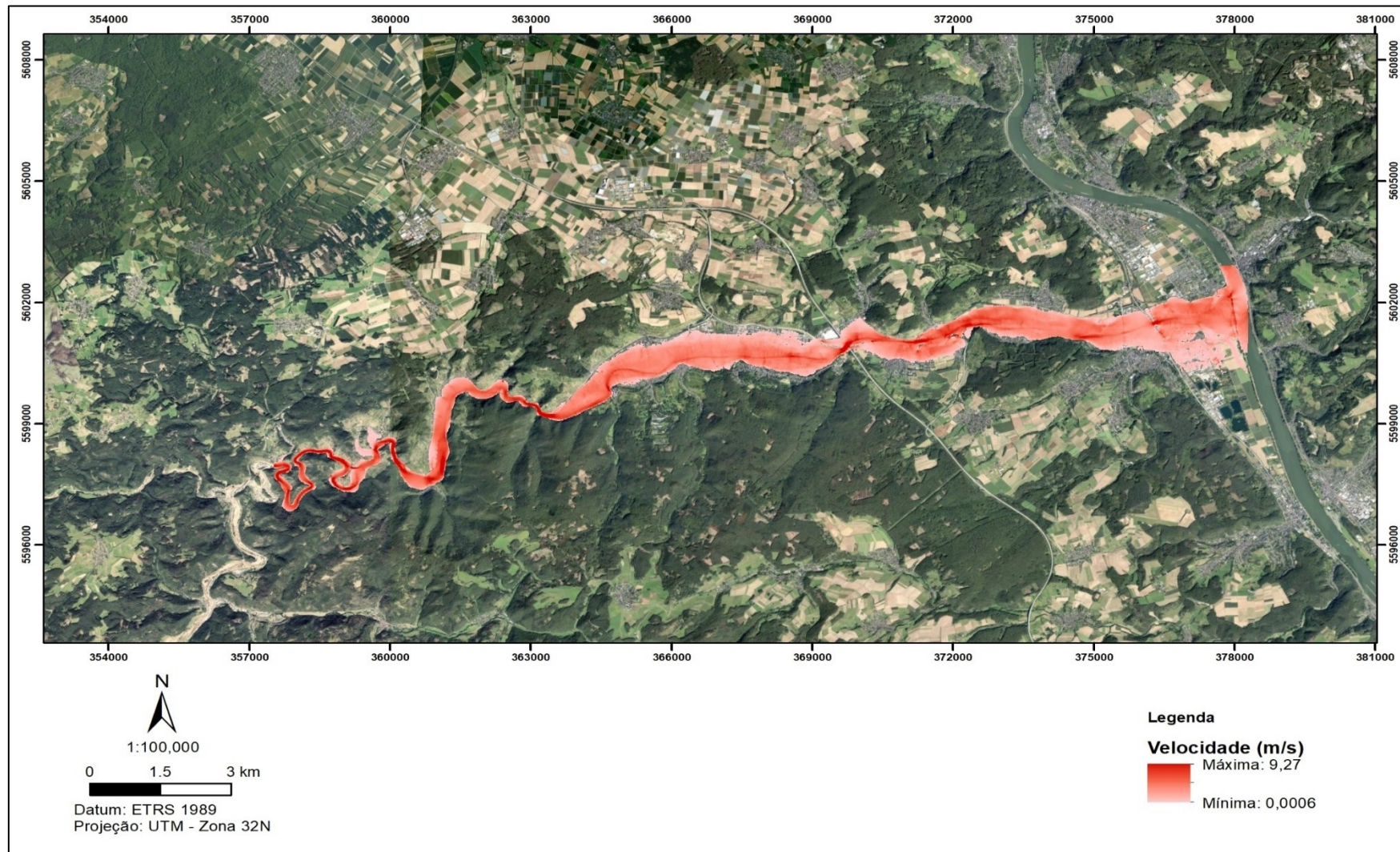
Fonte: autoria própria.

Figura 4.21: Mapa de profundidades proveniente da simulação hidrodinâmica do cenário derivado da previsão de Altenahr.



Fonte: autoria própria.

Figura 4.22: Mapa de velocidades proveniente da simulação hidrodinâmica do cenário derivado da previsão de Altenahr



Fonte: autoria própria.

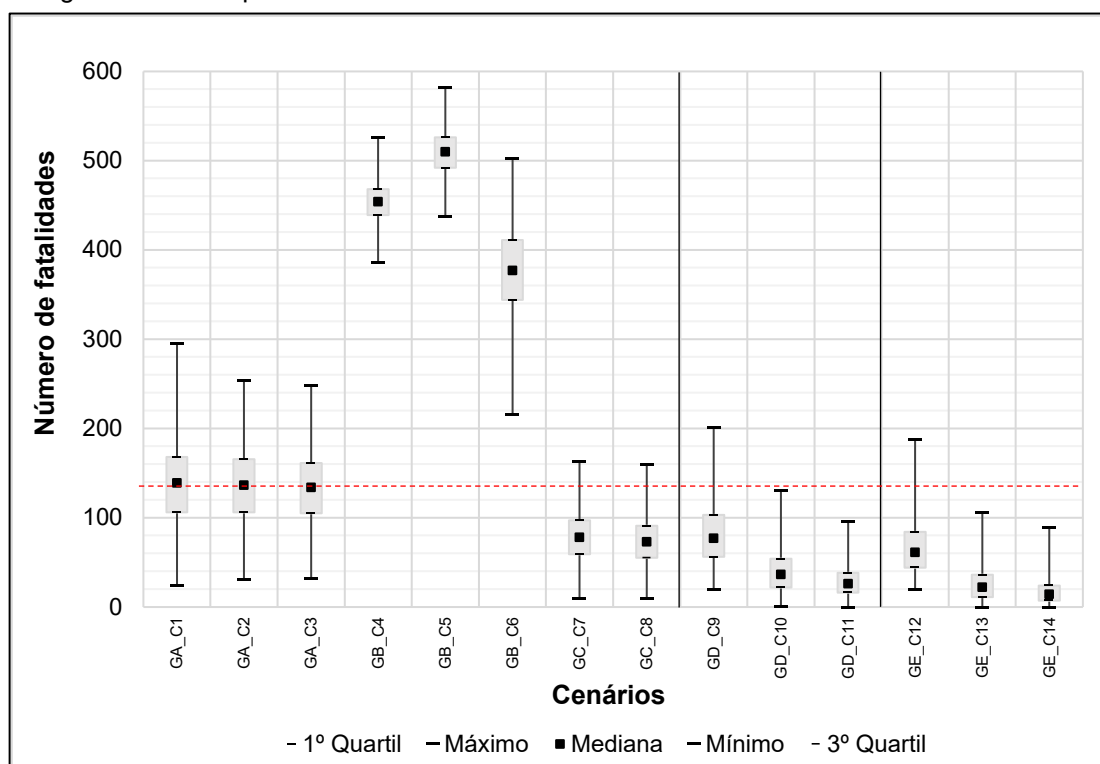
4.5.2 Simulação e análise de perdas de vida

O cenário de vulnerabilidade e exposição contabilizou 16.460 estruturas e 47.771 pessoas, em uma média de aproximadamente três pessoas por edificação. Desse total, 7.962 estruturas foram inundadas nas simulações e 24.954 pessoas contabilizadas em situação de risco. A Tabela 4.4 e a Figura 4.23 apresentam um resumo dos resultados obtidos nos 14 cenários simulados.

Tabela 4.4: Resultados tabelados da estimativa de fatalidades nos cenários simulados

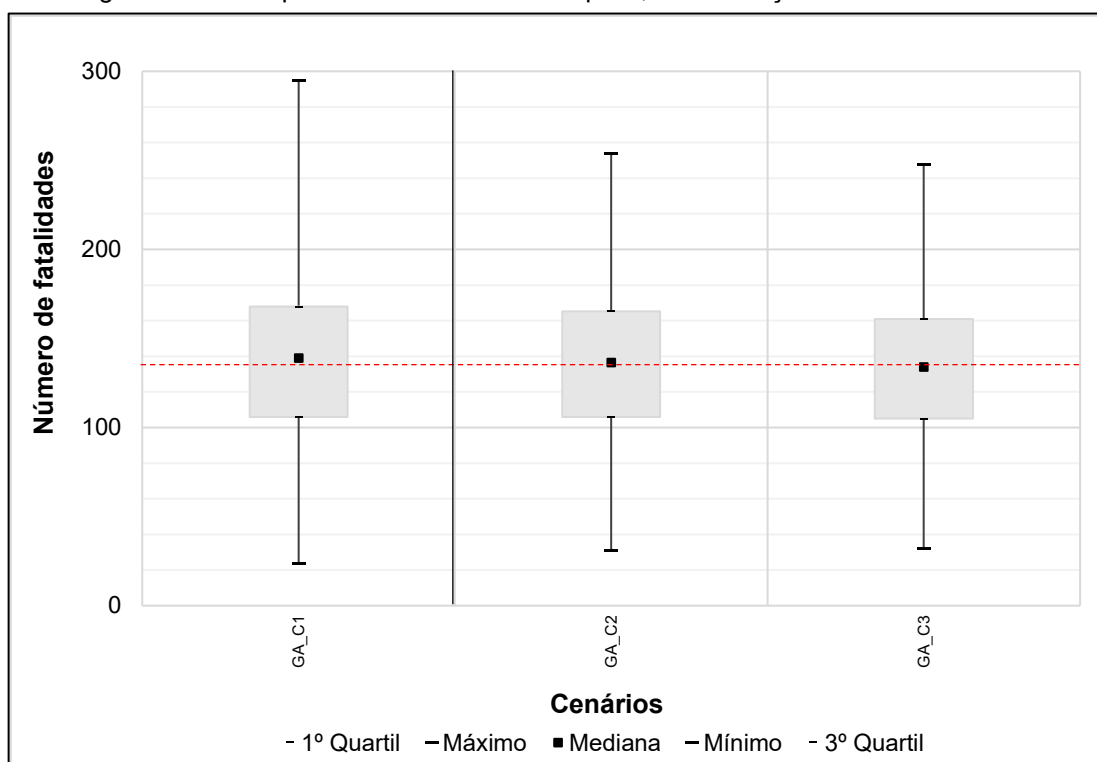
Grupo	Cenário	Nomenclatura	Estimativa de fatalidades				
			Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
A	1	GA_C1	24	106	139	168	295
A	2	GA_C2	31	106	137	165	254
A	3	GA_C3	32	105	134	161	248
B	4	GB_C4	386	439	454	468	526
B	5	GB_C5	437	492	510	526	582
B	6	GB_C6	216	344	377	411	502
C	7	GC_C7	10	59	78	97	163
C	8	GC_C8	10	55	73	91	159
D	9	GD_C9	20	56	77	103	201
D	10	GD_C10	1	22	37	54	130
D	11	GD_C11	0	16	26	38	96
E	12	GE_C12	19	44	61	84	187
E	13	GE_C13	0	11	22	36	106
E	14	GE_C14	0	7	14	24	89

Figura 4.23: Box-plots resultantes das estimativas de fatalidades dos cenários simulados



Os resultados referentes aos cenários do Grupo A, que tiveram o intuito de representar o evento real ocorrido em julho de 2021, são apresentados separadamente na Figura 4.24.

Figura 4.24: Box-plots dos cenários do Grupo A, de restituição do evento ocorrido



Apesar das diferenças detectadas entre os cenários, todos eles apresentam medianas muito próximas ao número real de 135 fatalidades (representada pela linha tracejada vermelha), com uma ligeira vantagem para o cenário "GA_C3", que mostrou a mediana mais próxima do valor real, de 134 mortes. O cenário "GA_C3" não apenas possui a mediana mais próxima do número real de mortes, como também a menor dispersão dos resultados neste cenário (diferença entre o mínimo e o máximo), o que sugere também uma maior consistência nos resultados.

De acordo com a Figura 4.24, os resultados obtidos no Grupo A indicam uma tendência de que os cenários com maior utilização de veículos ("GA_C3") resultam em menos fatalidades em termos de valor máximo, mediana e terceiro quartil, sugerindo que a evacuação por veículos pode ser mais eficaz em reduzir o número de fatalidades em comparação com a evacuação a pé.

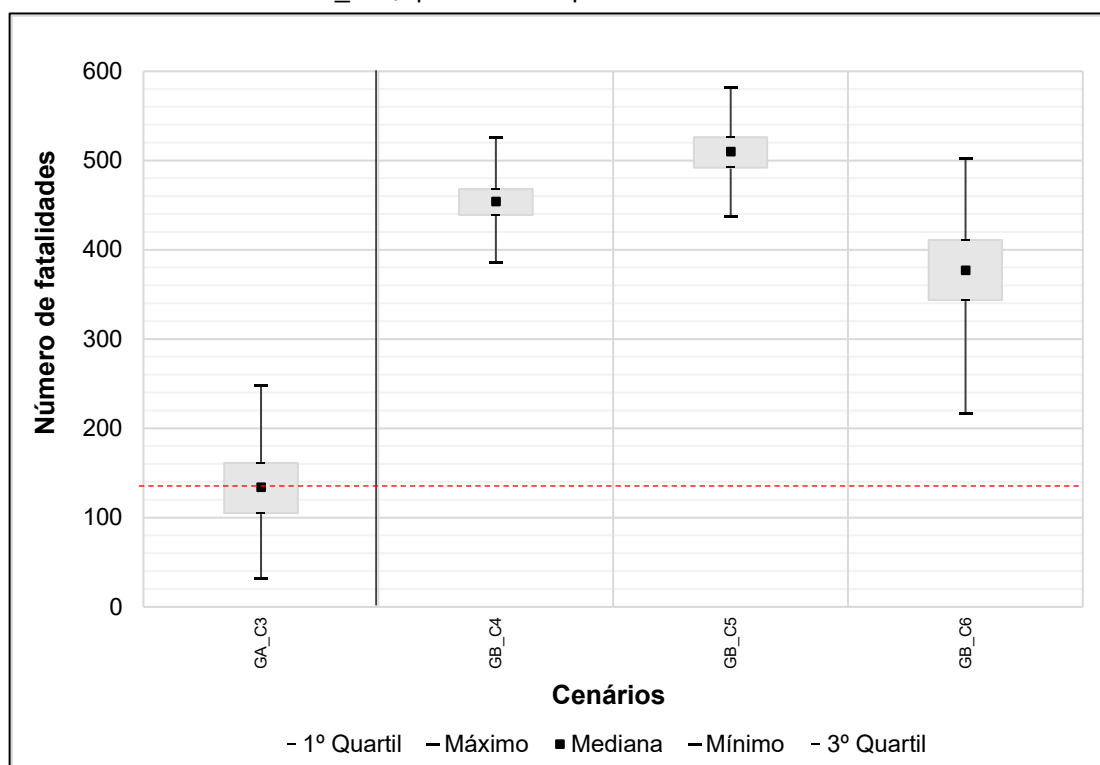
O cenário "GA_C1", que envolve evacuação 100% a pé, apresenta o maior número de fatalidades no valor máximo, indicando uma maior variabilidade e potencial para altas fatalidades se a evacuação for realizada inteiramente a pé. O cenário "GA_C2",

com o equilíbrio entre a evacuação em veículos (50%) e a pé (50%), está posicionado entre os cenários “GA_C1” e “GA_C3”.

Diante da melhor representatividade do evento real obtida com o cenário “GA_C3”, optou-se por utilizá-lo como base de comparação com os demais cenários. Por esse motivo, todos os demais cenários consideraram somente a evacuação 100% em veículos.

Ao comparar-se o cenário “GA_C3” e os cenários do Grupo B, cujo objetivo foi simular o pior caso em relação às perdas de vida, observa-se que todos os cenários do Grupo B têm medianas de fatalidades significativamente maiores do que o número real de fatalidades (135) e do que o cenário “GA_C3” (134) (Figura 4.25).

Figura 4.25: Cenários do Grupo B, de estimativa máxima de fatalidades, em comparação ao “GA_C3”, que melhor representa o evento real



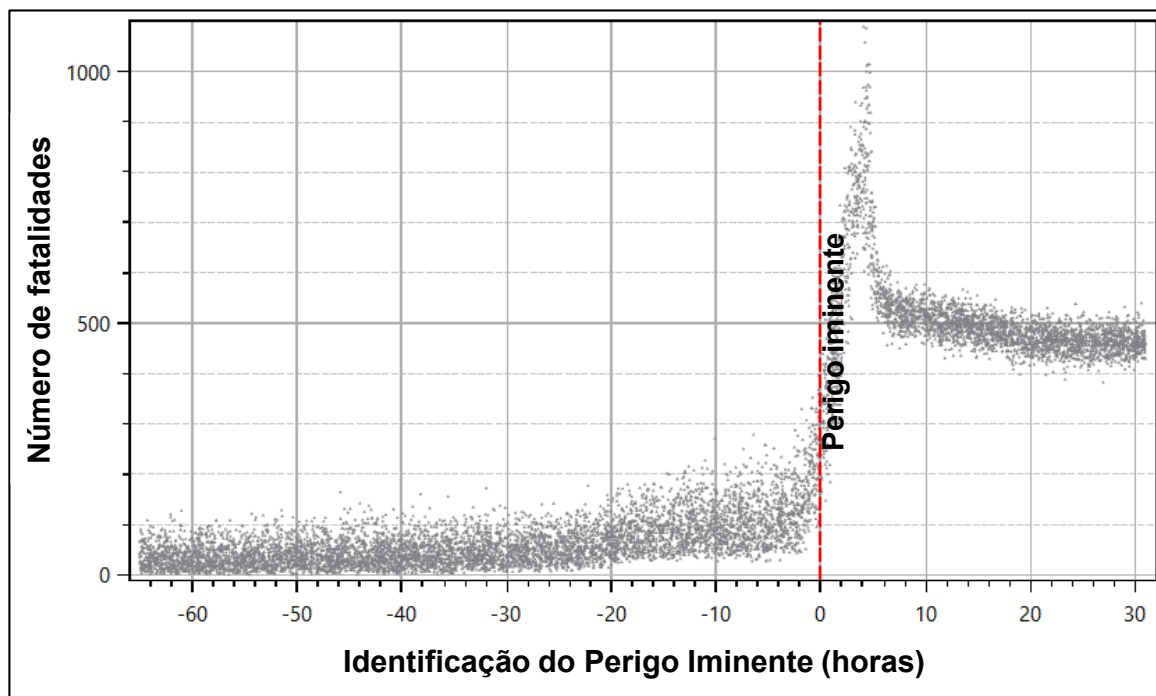
Isso indica que, na realidade, a situação foi gerenciada de maneira relativamente eficaz, evitando os piores resultados previstos nos cenários mais pessimistas. O cenário “GB_C4” mostra que a ausência de qualquer alerta e mobilização eleva significativamente o número de fatalidades, com a mediana mais que triplicando (454)

em comparação ao cenário real. Isso reforça a importância crucial dos sistemas de alerta e da mobilização ativa durante emergências.

Comparando os cenários “GB_C5” e “GB_C6”, com identificação do perigo às 00h00 do dia 14/07/21 e 17h00 do dia 13/07/21, respectivamente, ambos com difusão lenta do primeiro alerta e um tempo elevado para a mobilização, observa-se que, quanto mais cedo o alerta é recebido e divulgado (“GB_C6”), menor é o número de fatalidades, demonstrando a importância da prontidão e rapidez na comunicação dos riscos à população.

Um ponto discrepante obtido nos resultados foi o cenário “GB_C4”, com ausência de qualquer alerta e mobilização, que apresentou um número de fatalidades inferior ao cenário “GB_C5”. Para compreender esses resultados, realizou-se uma simulação adicional, na qual considerou-se uma faixa de variação do tempo de identificação do perigo iminente, de menos (-) 65 horas (23h59 do dia 10/07/21) a mais (+) 31 horas (23h59 do dia 14/07/21), tendo como referência o perigo iminente (17h00 do dia 13/07/21) e considerando as mesmas premissas dos cenários “GB_C5” e “GB_C6”, ou seja, com difusão lenta do primeiro alerta e um tempo elevado para a mobilização. Nesse cenário, foram realizadas 10.000 iterações, conforme Figura 4.26.

Figura 4.26: Cenário adicional de difusão lenta do primeiro alerta e um tempo elevado para a mobilização variando o tempo de identificação do perigo iminente

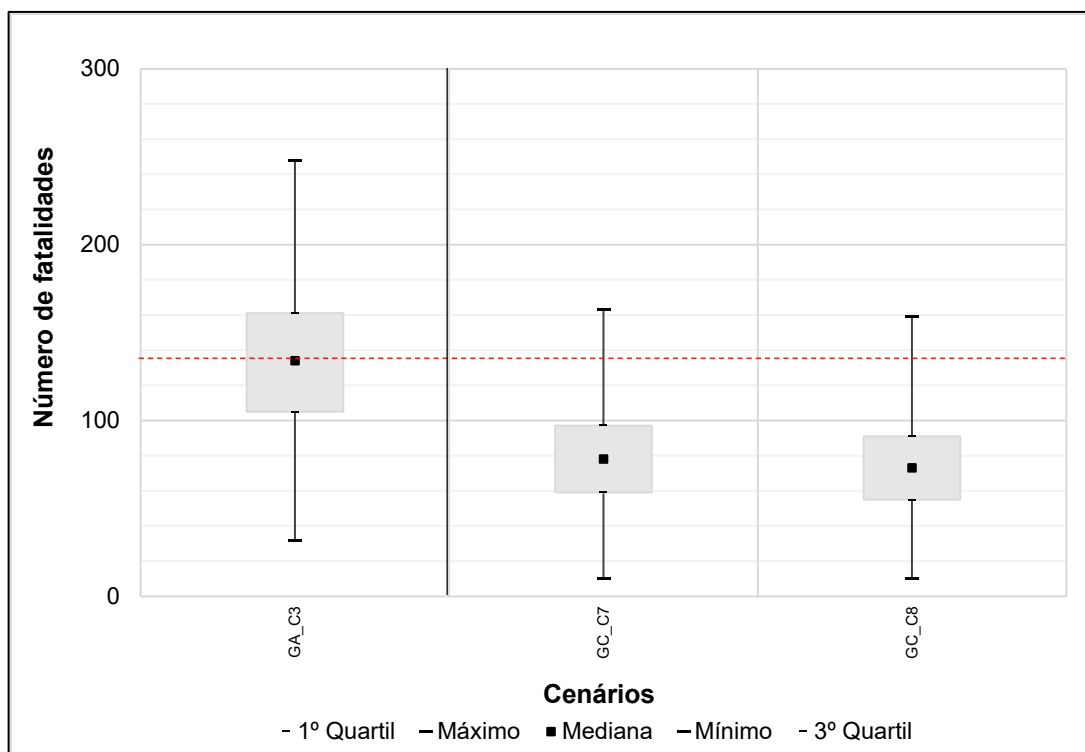


Na Figura 4.26 a identificação do perigo iminente, momento a partir do qual neste estudo foi considerado o início da difusão do alerta, potencializa o número de mortes quando acontece algumas horas após o perigo iminente. O cenário “GB_C5” se enquadra justamente nesse contexto, onde a identificação do perigo iminente foi considerada às 00h00 do dia 14/07/21, ou seja, 7 (sete) horas após o perigo iminente, o que justifica os resultados obtidos.

Pode-se, então, concluir que a convergência do início da evacuação com o momento de maior severidade da inundação pode aumentar consideravelmente o número de fatalidades, podendo superar, inclusive, um cenário em que as pessoas permanecem em suas casas, sem nenhuma mobilização.

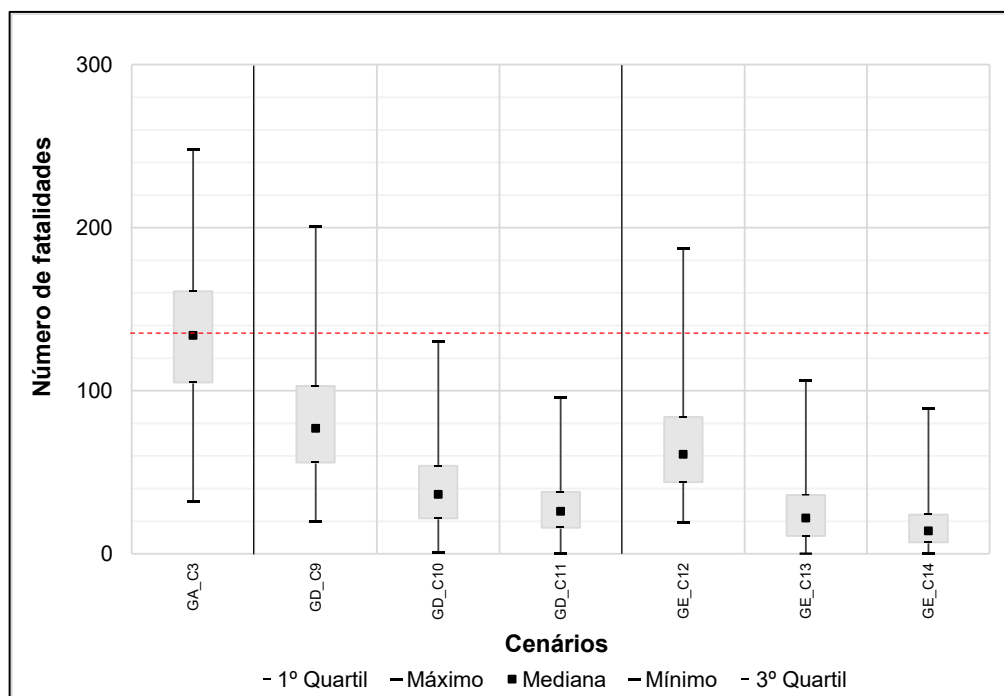
Os resultados dos cenários do Grupo C, apresentados na Figura 4.27, também estão contemplados na avaliação apresentada pela Figura 4.26. Isso porque as premissas dos cenários “GB_C5” e “GB_C6” são as mesmas dos cenários “GC_C7” e “GC_C8”, com a alteração apenas do momento da identificação do perigo iminente, considerado às 23h59 do dia 11/07/21 (“GC_C7”) e às 23h59 do dia 10/07/21 (“GC_C8”).

Figura 4.27: Cenários do Grupo C, de avaliação do aprimoramento da gestão de risco, em comparação ao “GA_C3”, que melhor representa o evento real



Nota-se, como esperado, que a percepção antecipada do perigo iminente (“GC_C7” e “GC_C8”) resulta em uma diminuição importante do número de fatalidades (considerando os valores da mediana), com uma diferença de 56 fatalidades de “GA_C3” (134) para “GC_C7” (78) e de 61 mortes de “GA_C3” (134) para “GC_C8” (73), destacando assim a relevância da agilidade e eficiência na comunicação de riscos para a população. O resultado dos cenários dos Grupos C e D são exibidos na Figura 4.28.

Figura 4.28: Cenários dos Grupo D e E, de avaliação do aprimoramento da gestão de risco, em comparação ao “GA_C3”, que melhor representa o evento real



Os resultados dos Grupos C e D apontam que uma maior rapidez da difusão do alerta e a elevação da percepção e da preparação da população frente ao risco desempenham papel crítico, levando a reduções substanciais nas fatalidades. Os cenários “GA_C3”, “GD_C9” e “GE_C12”, que consideram a difusão do alerta e o tempo para a mobilidade em níveis distintos, com o mesmo tempo de identificação do risco iminente, ilustram isso.

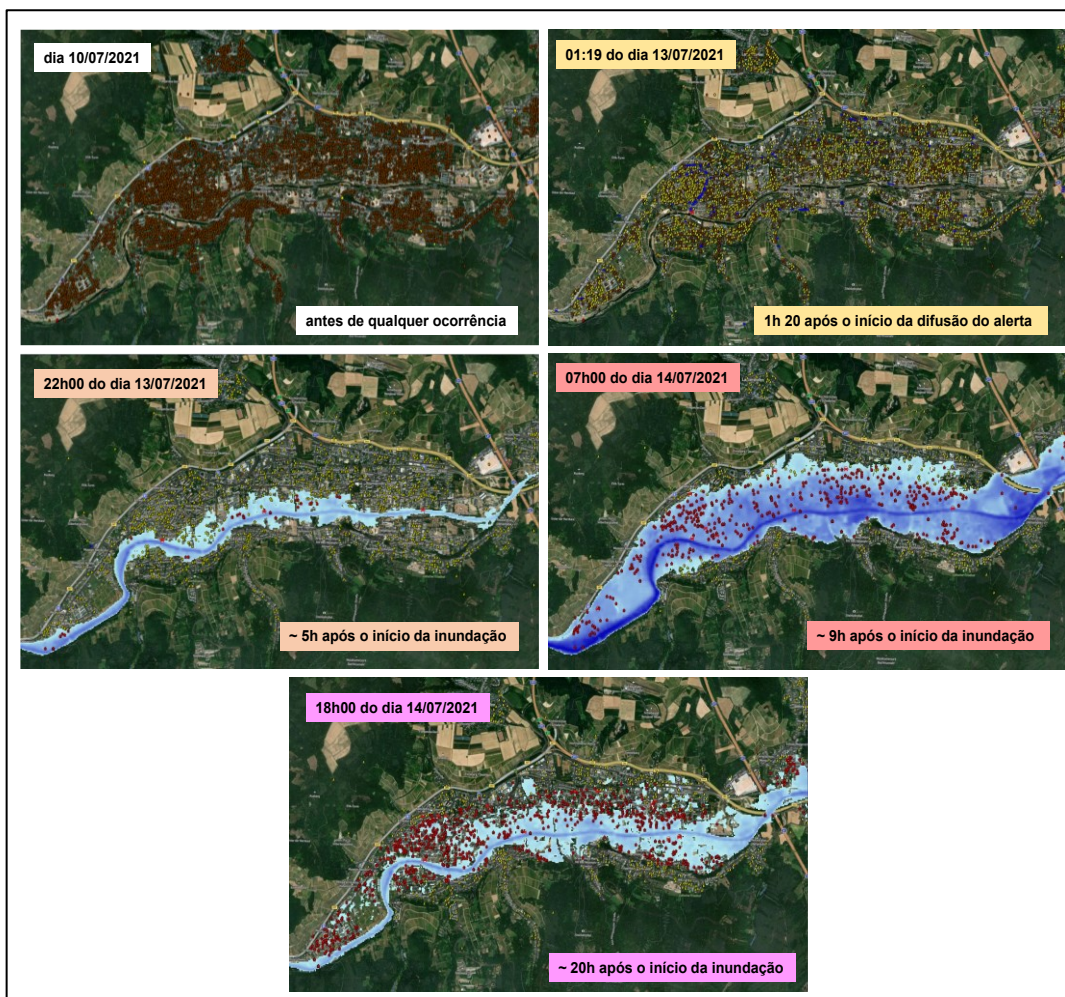
Ao se elevar o nível da difusão do alerta, de lenta para moderada, e a percepção e preparação da população de um nível baixo para moderado, a mediana obtida de fatalidades reduz de forma significativa, de 134 (“GA_C3”) para 77 (“GD_C9”), resultando em um decréscimo de aproximadamente 40%. O mesmo ocorre quando se considera uma difusão do alerta rápida e um aumento da percepção e preparação da população para um nível alto, em que o número de mortes referente à mediana cai para 61, menos da metade do número real de mortes (135) e da mediana do cenário “GA_C3” (134).

A antecipação da identificação do risco iminente, assim como detectado em avaliações anteriores, também desempenha papel importante na redução de mortes. Destaca-se que nos cenários que consideram essa identificação às 23h59 do dia

11/07/21 (“GD_C10” e “GE_13”) e às 23h59 do dia 10/07/21 (“GD_C11” e “GE_14”), os resultados indicam um número mínimo de fatalidades igual a zero. Além disso, percebe-se que a diferença incremental $((t+1) - t)$ de mortes reduz à medida em que o tempo de identificação do perigo iminente reduz. Por exemplo, a diferença entre as fatalidades (mediana) de “GE_14” e “GE_13” é de 8, enquanto de “GE_13” para “GE_12” o valor aumenta para 40.

Por fim, a Figura 4.30 ilustra a dinâmica do modelo de perdas de vidas LifeSim para uma das 1.000 iterações do cenário “GA_C3”, que apresentou um número de mortes igual ao evento real, de 135. Essa iteração apresenta registros da modelagem em tempos distintos, sendo estes: antes de qualquer ocorrência; 1h 20 após o início da difusão do alerta (23:59 do dia 12/07/2021); 5h após o início da inundação (22h00 do dia 13/07/2021); 9h após o início da inundação (07h00 do dia 14/07/2021); e 20h após o início da inundação (18h00 do dia 14/07/2021), onde é possível notar a interação entre a modelagem hidrodinâmica, a partir do avanço da cheia de inundação, e o processo de evacuação, com a notável redução da população em risco na medida em que o alerta é difundido e a população se mobiliza em direção aos pontos seguros.

Figura 4.29: Registros da modelagem de uma das 1.000 do cenário “GA_C3” em tempos distintos



4.6 Conclusões

Os resultados sugerem que a modelagem hidrodinâmica realizada dentro do ambiente do *software* HEC-RAS foi capaz de representar adequadamente a inundação ocorrida na Alemanha em junho de 2021. A lateralidade da mancha e as profundidades obtidas na simulação tiveram uma boa aderência ao evento real, evidenciando a capacidade do modelo em representar eventos dessa natureza.

As modelagens de perdas de vida empreendidas também obtiveram resultados coerentes. Os cenários com o objetivo de reconstituir o evento (Grupo A) apresentaram um número muito próximo ao número de fatalidades contabilizadas em função da inundação ocorrida. A aderência dos modelos aos dados reais reforça a confiança nas simulações como ferramentas precisas para o planejamento de evacuações em emergências.

Para esses cenários, pode-se concluir, ainda, que políticas de evacuação que favoreçam o uso de veículos podem ser mais seguras em termos de redução de fatalidades. A análise dos quartis mostra que, mesmo nos melhores cenários (menos fatalidades), a utilização de veículos apresenta resultados consistentemente mais seguros.

No entanto, cada cenário de inundação requer uma abordagem adaptada às condições locais específicas para maximizar a segurança das pessoas envolvidas. É crucial considerar o contexto específico, como a densidade populacional, a geografia da área, o tempo disponível para evacuação e outros fatores ambientais que podem influenciar a eficácia de diferentes métodos de evacuação. A capacidade de evacuação por veículos pode ser limitada por fatores como a disponibilidade de veículos, condições das estradas e outros fatores logísticos.

Já os cenários cujo objetivo era avaliar se o número de mortes poderia ser maior, representados pelo Grupo B, mostram claramente que a ausência de qualquer alerta e mobilização leva a um número significativamente maior de fatalidades, com a mediana mais que triplicando em comparação ao evento real.

Outro ponto relevante é que, para o cenário em que se considerou o início da difusão do alerta após o início da inundação (GB_C5), ao coincidir o momento de início da evacuação com o momento mais crítico da inundação, tem-se o aumento do número de mortes, sendo esse cenário com maior número de mortes que aquele que não considera nenhuma evacuação (GB_C4).

Por fim, as simulações dos demais grupos, que tiveram como intuito investigar o papel do aprimoramento da gestão de risco de inundações na redução do número de vítimas, servem como um aviso crítico para as autoridades sobre os possíveis resultados de respostas lentas e ineficazes a emergências. Os dados indicam que o investimento em sistemas de alerta precoce e na preparação da população para responder adequadamente a emergências, com a promoção da educação pública e treinamentos para emergências como medidas essenciais na gestão de riscos de desastres naturais, pode salvar um número substancial de vidas. As simulações apontam, inclusive, que o número de mortes poderia chegar a zero.

5 CONCLUSÕES FINAIS

A presente dissertação avaliou o desempenho de modelos de perdas de vida, baseados em agentes, para simular a ocorrência de fatalidades associadas a inundações naturais e tecnológicas, bem como a eficiência de sistemas de alerta e evacuação em reduzi-las. Os modelos analisados foram o LifeSim e o LSM, com foco em dois estudos de caso distintos: um rompimento de barragem e uma inundação natural.

No que tange ao estudo referente à ruptura da Barragem B-I, o HEC-RAS 2D foi capaz de simular com precisão a propagação da onda de cheia, com uma aderência de 96% em área inundada comparada à real. Os tempos de chegada da inundação também foram consistentes com observações e estudos anteriores.

O LifeSim apresentou estimativas de fatalidades muito próximas ao número real de fatalidades (272), apresentando um número de 271 fatalidades para o cenário que considera uma evacuação 100% a pé e uma população com idade inferior a 65 anos. A análise de sensibilidade empreendida apontou que fatores como a faixa etária da população e o modo de evacuação pouco influenciaram nos resultados; por esse motivo, optou-se por analisar detalhadamente os cenários que consideraram população com idade inferior a 65 anos e evacuação 100% a pé.

No LSM, também foi considerada uma evacuação 100% a pé; no entanto, os resultados obtidos superestimaram significativamente as fatalidades, com 449 mortes no cenário sem evacuação e 385 mortes com alerta de 0 minutos. A maioria das mortes foi atribuída ao colapso de edifícios, indicando um impacto estrutural significativo da onda de lama, o que corresponde aos relatos do evento real. No entanto, a quantidade prevista de mortes por colapso (375) é maior do que a observada. Essa distinção detalhada não foi aparente no LifeSim e oferece uma análise pormenorizada das causas de fatalidades.

Ambos os modelos demonstraram que a emissão de alertas antes da ruptura pode reduzir significativamente o número de fatalidades. No LifeSim, a mediana das fatalidades diminuiu de 265 para 40 com um alerta de 72 horas de antecedência, e no LSM, um alerta de 15 minutos reduziu as mortes de 385 para 149.

Os resultados do LSM e do estudo de Lumbroso *et al.* (2021) mostraram inconsistências significativas, indicando que o LSM pode não ser a melhor escolha para todos os cenários de inundações associadas a rupturas de barragem. O LifeSim demonstrou um desempenho mais realista e preciso para o caso da Barragem B-I de Brumadinho.

A construção do modelo no LSM apresentou diversas dificuldades, principalmente devido à sua interface baseada em DOS e à necessidade de manipular arquivos com extensões incomuns. A inserção de dados das edificações e da população em planilhas do Excel complicou a conferência e validação das informações, já que não há visualização no modelo. Além disso, a geração da rede viária, que deveria ser facilitada por uma barra de ferramentas para ArcGIS, tornou-se um processo trabalhoso devido à indisponibilidade dessa ferramenta.

A manipulação de grandes volumes de dados para os inputs hidrodinâmicos também gerou desafios, limitando as simulações a um cenário com apenas 15 minutos de antecedência e inviabilizando cenários mais longos. Os resultados são apresentados em blocos de notas, mas a falta de visualização do processo de simulação limita a compreensão do comportamento dos indivíduos e objetos. Diante dessas limitações e da complexidade do estudo de caso do rio Ahr, decidiu-se não utilizar o LSM para o segundo estudo de caso relacionado a inundações naturais.

Com relação ao estudo de caso da inundação ocorrida no rio Ahr, Alemanha, em julho de 2021, o HEC-RAS representou adequadamente a inundação ocorrida, com alta concordância entre a simulação e o evento real em termos de lateralidade das manchas e profundidades obtidas.

As modelagens de perdas de vida realizadas obtiveram resultados coerentes. Nos cenários cujo objetivo era replicar o evento real, o número de fatalidades foi muito próximo ao registrado durante a inundação (133), sendo o cenário que considerou a evacuação por veículos o que obteve resultado mais próximo da realidade (134).

Os cenários que consideraram a percepção antecipada do perigo iminente e a preparação da população para evacuação mostraram uma redução significativa no número de fatalidades. Alertas emitidos com antecedência suficiente e sua rápida

difusão mostraram-se cruciais para a redução de fatalidades. Cenários com difusão rápida do alerta e preparação elevada da população resultaram em números mínimos de fatalidades, permanecendo próximos de zero.

Por fim, concluiu-se que os modelos de perda de vida, sobretudo o LifeSim, demonstraram ser ferramentas valiosas para o aprimoramento da gestão de risco de inundações. Através da simulação detalhada de cenários de rompimento de barragens e inundações naturais, foi possível verificar a eficácia desses modelos na previsão de fatalidades e na avaliação da eficiência de sistemas de alerta e evacuação.

Os resultados indicam que a integração desses modelos nas estratégias de gestão de riscos permite a identificação precisa de áreas e populações vulneráveis, facilitando o desenvolvimento de sistemas de alerta mais eficientes e planos de evacuação mais seguros. Portanto, a aplicação dos modelos de perda de vida contribui significativamente para a mitigação dos impactos negativos dos desastres, proporcionando uma base sólida para a tomada de decisões e a implementação de políticas públicas mais eficazes na proteção de vidas humanas.

Além disso, a inclusão de modelos de perda de vida nas estratégias de gestão de risco é essencial para que as políticas públicas sejam mais informadas e direcionadas. Esses modelos não apenas ajudam a quantificar o risco, mas também oferecem informações relevantes sobre as dinâmicas sociais e comportamentais durante eventos críticos. Ao integrar essa análise nas políticas, é possível priorizar recursos, melhorar a comunicação de riscos e, em última instância, salvar vidas. A relevância desses modelos se torna ainda mais evidente em um contexto de mudanças climáticas, onde a frequência e a intensidade dos desastres naturais estão aumentando, exigindo uma abordagem proativa e baseada em evidências para a gestão de riscos.

6 RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados obtidos, as seguintes recomendações são propostas para aprimorar as estimativas nos modelos de perda de vida:

- Investir no refinamento dos fatores que influenciam o comportamento da inundação nos modelos hidrodinâmicos. Isso inclui: aprimorar o modelo digital de terreno, o volume mobilizado, o hidrograma de ruptura ou de inundação, os parâmetros reológicos, a resistência ao escoamento (coeficiente de Manning) e o cadastro de estruturas que podem alterar o comportamento das inundações, como pontes, bueiros, entre outros;
- Realizar uma avaliação mais precisa do efeito do escoamento hiperconcentrado, com comportamento não-Newtoniano, nos critérios de estabilidade associados a pessoas, veículos e edificações, conforme sugerido por Correa *et al.* (2021);
- Realizar um levantamento cadastral detalhado das edificações. O material de construção das estruturas e o número de andares impactam significativamente o número de fatalidades contabilizadas pelos modelos, uma vez que o material influencia a capacidade de suporte das edificações às inundações, podendo resistir ou não a determinados esforços. Além disso, o número de andares permite a evacuação vertical, possibilitando que os ocupantes se desloquem para níveis fora do risco de afogamento, por exemplo;
- Realizar um levantamento cadastral detalhado das possíveis rotas de evacuação (vias, rodovias, trilhas, acessos vicinais etc.);
- Investigar mais a fundo o número de pessoas em risco no momento das inundações para estudos de retro análise, a partir de entrevistas com os sobreviventes que vivenciaram o ocorrido e pessoas que possam ter algum tipo de informação;
- Como o ideal é aplicar os modelos de perdas de vida antes da ocorrência das inundações, visando melhorar a gestão de riscos e as medidas de mitigação e resposta, é de suma importância realizar um cadastro populacional detalhado, tanto quantitativo quanto qualitativo. Esse cadastro deve incluir informações relacionadas à mobilidade das pessoas, que pode estar associada à idade e sexo. Em um nível de maior detalhe, pode-se incluir ainda o fator relacionado

à capacidade das pessoas saberem nadar, o que pode reduzir a probabilidade de morte por afogamento;

- Apesar de, nos estudos de caso empreendidos, o modo de evacuação não ter impactado significativamente no número de fatalidades, para melhorar a precisão dos modelos de perda de vida é importante compreender os modos de evacuação mais prováveis para cada contexto e região. Em um nível mais detalhado, é possível ainda incorporar as características dos veículos, que podem influenciar na resistência ao escoamento e na velocidade de evacuação e, assim, impactar o número de mortes;
- Como linha de pesquisa, percebe-se uma possível lacuna associada à inclusão do fluxo de veículos presentes nas vias. Os modelos consideram basicamente pessoas vinculadas às edificações; no entanto, não exploram a quantidade de pessoas em fluxo no momento da inundação. A densidade de veículos antes da inundação pode dificultar o processo de evacuação, causando congestionamentos e reduzindo a velocidade média dos veículos em direção aos pontos seguros, o que pode aumentar o número de pessoas em risco e potencializar o número de fatalidades; e
- Incorporar informações mais detalhadas referentes aos tempos para a identificação do risco, para o acionamento das entidades responsáveis pelos alertas, para a emissão do alerta, para a difusão do primeiro alerta e para o início da evacuação da população. Em regiões suscetíveis a inundações e/ou rupturas de barragem, essas informações podem ser obtidas a partir de simulados com o envolvimento da população e comunidades. Esses tempos podem ser contabilizados e utilizados como *inputs* nos modelos, auxiliando na estimativa de perdas de vida.

Essas recomendações visam melhorar a precisão das simulações de perda de vida e aumentar a eficácia dos sistemas de alerta e evacuação, contribuindo para a redução de fatalidades em futuros eventos de inundação.

REFERÊNCIAS

ABOELATA, M. A.; BOWLES, D. S. LifeSim: a model for estimating dam failure life loss. Instituto de Recursos Hídricos, Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos e Comitê Nacional Australiano de Grandes Barragens, 2005.

ABOELATA, M. A.; BOWLES, D. S.; MCCLELLAND, M. A Model for Estimating Dam Failure Life Loss. In: Proceedings of the Australian Committee on Large Dams Risk Workshop, Launceston, Tasmania, Austrália, 2003.

ABT, S. R.; WITTLER, R. J.; TAYLOR, A.; LOVE, D. J. Human stability in a high hazard flood zone. Water Resources Bulletin, v. 25, n. 4, p. 881-890, ago. 1989.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2022: informe anual. Brasília: ANA, 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Portaria ANM nº 32, de 11 de maio de 2020. ANM, 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Portaria nº 14, de 15 de janeiro de 2016. ANM, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017. ANM, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Portaria nº 130, de 24 de fevereiro de 2023. ANM, 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Portaria nº 416, de 3 de setembro de 2012. ANM, 2012a.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Portaria nº 526, de 6 de setembro de 2012. ANM, 2012b.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Resolução ANM nº 95, de 07 de fevereiro de 2022. ANM, 2022.

ALVAREZ, M.; PUERTAS, J.; PEÑA, E.; BERMUDEZ, M. Two-dimensional dam-break flood analysis in data-scarce regions: the case study of Chipembe Dam, Mozambique. Water, v. 9, n. 6, p. 432, 2017.

APEL, H.; VOROGUSHYN, S.; MERZ, B. Brief communication: Impact forecasting could substantially improve the emergency management of deadly floods: case study July 2021 floods in Germany. Natural Hazards and Earth System Sciences, v. 22, n. 9, p. 3005-3014, 15 set. 2022.

ARONICA, G.; BATES, D.; HORRITT, S. Assessing the uncertainty in distributed model predictions using observed binary pattern information within GLUE. *Hydrological Processes*, v. 16, n. 10, p. 2001-2016, 2002.

ARR - Australian Rainfall and Runoff. Institute of Engineers, Australia, 1997.

ASSELMAN, N. E. M.; JONKMAN, S. N. Consequences of floods: the development of a method to estimate the loss of life. TU Delft, Rijkswaterstaat: Road and Hydraulic Engineering Institute, 2003.

BC HYDRO. BC Hydro Life Safety Model – Formal model Description. British Columbia, Canada: Engineering report E299, 2006.

BIERNATH, A.; COSTA, C.; SOUZA, C. Inundações no Rio Grande do Sul: os gráficos e imagens que mostram a dimensão da tragédia. *BBC News Brasil*, 2024. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/articles/c72p96eqkvxo>. Acesso em: 19 jun. 2024.

BRAZDOVA, M.; RIHA, J. A simple model for the estimation of the number of fatalities due to floods in central Europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 14, n. 7, p. 1663-1676, 2014.

BRASIL. Lei nº 12.340, de 1º de dezembro de 2010. BRASIL, 2010a.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. BRASIL, 2010b.

BRASIL. Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. BRASIL, 2012.

BRASIL. Lei nº 13.575, de 26 de dezembro de 2017. BRASIL, 2017.

BRASIL. Lei nº 14.750, de 12 de dezembro de 2023. BRASIL, 2023.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS (CEMADEN). Inundação. Disponível em: <https://www.gov.br/ceaden/pt-br/paginas/ameacas-naturais/inundacao>. Acesso em: 19 jun. 2024.

CIEŚLAK, I.; BIŁOZOR, A.; SZUNIEWICZ, K. The use of the CORINE land cover (CLC) database for analyzing urban sprawl. *Remote Sensing*, v. 12, n. 2, p. 282, 2020.

CORREA, G.; DE PAULA, G.; NASCIMENTO, M.; BRANDÃO, M.; SA, J. Flood hazard classification for a hyperconcentrated flow. *Tailings and Mine Waste* 2021, 2021.

CORINE. CORINE Land Cover — Copernicus Land Monitoring Service. Disponível em: <https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover>. Acesso em: 19 jun. 2024.

CENTRE FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DISASTERS (CRED). CRED Crunch Newsletter, Issue No. 70 (April 2023) - Disasters Year in Review 2022 – World. ReliefWeb, 2023. Disponível em: <https://reliefweb.int/report/world/cred-crunch-newsletter-issue-no-70-april-2023-disasters-year-review-2022>. Acesso em: 19 jun. 2024.

CPRM. Monitoramento Especial da Bacia do Rio Paraopeba – Relatório 01: Monitoramento Hidrológico e Sedimentométrico. Belo Horizonte, 2019. Disponível em: http://www.cprm.gov.br/sace/conteudo/paraopeba/RT_01_2019_PARAOPEBA.pdf. Acesso em: 02 dez. 2023.

DEFESA CIVIL DO RIO GRANDE DO SUL. Defesa Civil atualiza balanço das enchentes no RS - 27/5, 9h. Disponível em: <https://www.estado.rs.gov.br/defesa-civil-atualiza-balanco-das-enchentes-no-rs-27-5-9h>. Acesso em: 19 jun. 2024.

DEFRA. Flood risks to people – phase 1. R&D Technical Report FD2317, Department for Environment, Food & Rural Affairs (DEFRA) – Flood Management Division, UK, 2003.

DESTATIS. Startseite. Disponível em: https://www.destatis.de/DE/Home/_inhalt.html. Acesso em: 19 jun. 2024.

DEUTSCHLAND.DE. Esperança depois da catástrofe. Disponível em: <https://www.deutschland.de/pt-br/topic/meio-ambiente/catastrofe-de-inundacao-na-alemanha-reconstrucao-no-vale-do-rio-ahr>. Acesso em: 27 abr. 2024.

DIAS, F.; JÚNIOR, J.; PIMENTEL, I. A gestão de risco de inundação no estado do Rio de Janeiro. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2015. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/4/PAP020835.pdf>. Acesso em: 10 de abril de 2023.

DIETZE, M; BELL, R.; OZTURK, U.; COOK, L.; ANDERMANN, C.; BEER, R.; DAMM, B.; LUCIA, A.; FAUER, S.; NISSEN, M.; SIEG, T.; THIEKEN, H. More than heavy rain turning into fast-flowing water—a landscape perspective on the 2021 Eifel floods. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 22, n. 6, p. 1845-1856, 2022.

ESTRATÉGIA INTERNACIONAL PARA A REDUÇÃO DE DESASTRES (EIRD). Marco de Ação de Hyogo 2005-2015. 2019. Disponível em: <https://fld.com.br/publicacao/marco-de-acao-de-hyogo-2005-2015/>. Acesso em: 19 jun. 2024.

EL BILALI, A.; TALEB, I.; AYOUB, N.; TALEB, A. A practical probabilistic approach for simulating life loss in an urban area associated with a dam-break flood. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 76, p. 103011, 2022.

EL BILALI, H.; SOUISSI, M.; EL MESSAOUDI, E. A review of the methodologies for estimating flood fatalities. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 21, p. 2645-2660, 2021.

FEMA. HAZUS user manual. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 1999.

FERNANDEZ, O. Determinação do nível e da descarga de margem plena em cursos fluviais. *Boletim de Geografia*, v. 21, n. 1, p. 97-110, 2003.

FEW, R. Flood Hazards, Vulnerability and Risk Reduction. In: FEW, R.; MATTIES, F. (Eds.). *Flood Hazards and Health: Responding to the Risks of Climate Change*. London: Earthscan, 2006. p. 8-27.

GALLEGOS, H.; SCHUBERT, E.; SANDERS, F. Two-dimensional, high-resolution modeling of urban dam-break flooding: a case study of Baldwin Hills, California. *Advances in Water Resources*, v. 32, n. 8, p. 1323-1335, 2009.

GIBSON, S.; FLOYD, I.; SÁNCHEZ, A.; HEATH, R. Comparing single-phase, non-Newtonian approaches with experimental results: Validating flume-scale mud and debris flow in HEC-RAS. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 46, n. 3, p. 540-553, 2021.

GOULDBY, B. P.; SAYERS, P. B.; PANZERI, M. C.; LANYON, J. E. Development and application of efficient methods for the forward propagation of epistemic uncertainty and sensitivity analysis within complex broad-scale flood risk system models. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 37, n. 7, p. 955-967, 2010.

GRACIOSA, M. C. P. Modelo de seguro para riscos hidrológicos com base em simulação hidráulico-hidrológica como ferramenta de gestão do risco de inundações. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2010.

GRAHAM, W. J. Channel and valley changes resulting from dam failure. In: *CADAM Proceedings, Munich Meeting*, 1998.

GRAHAM, W. J. A Procedure for Estimating Loss of Life Caused by Dam Failure. *Dams Safety Office Report DSO-99-06*, United States Bureau of Reclamation, 1999.

GREENSHIELDS, D.; CHANNING, W.; MILLER, H. A study of traffic capacity. *Anais do Annual Meeting of The Highway Research Board*, Washington DC, v. 14, n. 1, p. 448-447, 1935.

HEWITT, K. *Regions of Risk: A Geographical Introduction to Disasters*. Harlow, UK: Longman, 1ª ed., 1997.

HILL, P.; KAVANAGH, C.; LANG, S.; NORTHFIELD, S. Applications of Simulation Model to Estimate Potential Loss of Life. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON LARGE DAMS, 26, 2018, Viena, Áustria. Anais... Paris, França: Comitê Internacional de Grandes Barragens, 2018.

JOHNSTONE, W. M.; SAKAMOTO, D.; ASSAF, H.; BOURBAN, S. Architecture, modelling framework and validation of BC Hydro's virtual reality life safety model. In: ISSH - Stochastic Hydraulics 2005, 23-24 maio 2005, Nijmegen, The Netherlands.

JONKMAN, S. N.; MAASKANT, B.; KOLEN, B.; NEEDHAM, J. T. J. Loss of life estimation - Review, developments and challenges. In: EUROPEAN CONFERENCE ON FLOOD RISK MANAGEMENT, 3., 2016. Lyon, França. Anais..., Les Ulis, França: E3S Web of Conferences, 2016.

JONKMAN, S. N.; MAASKANT, B.; BOUMA, G.; WEGEREEF, J. Loss of life caused by the flooding of New Orleans after hurricane Katrina: analysis of the relationship between flood characteristics and mortality. Risk Analysis, v. 29, n. 5, p. 676-698, 2009.

JONKMAN, S. N.; VRIJLING, J. K.; VROUWENVELDER, A. C. W. M. Methods for the estimation of loss of life due to floods: a literature review and a proposal for a new method. Natural Hazards, v. 46, p. 353-389, 2008.

JONKMAN, S. N. Loss of life estimation in flood risk assessment; theory and applications. 360f. Tese — Universidade de Tecnologia de Delft, Holanda, 2007.

JOYCE, J. M.; SCOTT, M. S.; COOPERATIVE, E. S. R. G. An assessment of Maryland's vulnerability to flood damage. Baltimore, MD: Maryland Department of the Environment, 2005, 82pp.

JUNGHÄNEL, T.; BISSOLLI, P.; DASSLER, J.; FLECKENSTEIN, R.; IMBERY, F.; JANSSEN, W.; KASPAR, F.; LENGFELD, K.; LEPPERT, T.; RAUTHE, M.; RAUTHE-SCHÖCH, A.; ROCEK, M.; WALAWENDER, E.; WEIGL, E. Hydro-klimatologische Einordnung der Stark- und Dauerniederschläge in Teilen Deutschlands im Zusammenhang mit dem Tiefdruckgebiet „Bernd“ vom 12. bis 19. Juli 2021. 2021.

KALININA, A.; SPADA, M.; BURGHERR, P. Quantitative Assessment of Uncertainties and Sensitivities in the estimation of life loss due to the instantaneous break of a hypothetical dam in Switzerland. Water, v. 13, n. 3414, p. 22, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w13233414>.

KREIENKAMP, F.; PHILIP, S. Y.; TRADOWSKY, J. S.; KEW, S. F.; LORENZ, P.; et al. Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021. Potsdam: Deutscher Wetterdienst (DWD), 2021.

LI, W.; LI, Z.; GE, W.; WU, S. Risk evaluation model of life loss caused by dam-break flood and its application. Water, v. 11, n. 7, p. 1359, 2019.

LIGIER, L. Implementation of non-Newtonian rheological models in TELEMAC-2D. In: TELEMAC-MASCARET User Conference October 2020. Antwerp: International Marine e Dredging Consultants (IMDC), 2020. p. 14-25.

LUMBROSO, D.; DAVISON, M.; BODY, R.; PETKOVSEK, G. Modelling the Brumadinho tailings dam failure, the subsequent loss of life and how it could have been reduced. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 21, n. 1, p. 21–37, 7 jan. 2021.

LUMBROSO, D.; DAVISON, M. Use of an agent-based model and Monte Carlo analysis to estimate the effectiveness of emergency management interventions to reduce loss of life during extreme floods. *Journal of Flood Risk Management*, v. 11, p. S419-S433, 2016.

MARTÍNEZ-ARANDA, S.; GARCÍA, R.; GARCÍA-NAVARRO, P. GPU-Accelerated Developments for the Realistic Simulation of Large-Scale Mud/Debris Flows. *Engineering Geology*, v. 296, p. 106462, 2022.

MARANZONI, A.; D'ORIA, M.; RIZZO, C. Probabilistic mapping of life loss due to dam-break flooding. *Natural Hazards*, v. 120, n. 3, p. 2433-2460, 2024.

MAY, A. D. *Traffic flow fundamentals*. Prentice-Hall, Incorporated, 1990. p. 476.

MCCLELLAND, M.; BOWLES, S. Estimating Life Loss for Dam Safety and Risk Assessment: Lessons from Case Histories. In *Proceedings of the 2000 Annual USCOLD Conference*, U. S. Society on Dams (formerly U. S. Committee on Large Dams), Denver, CO. 2000.

MCCLELLAND, M.; BOWLES, S. Estimating life loss for dam safety risk assessment: A review and new approach. Institute for Water Resources, 2002.

MELO, M. Sensibilidade a parâmetros reológicos na modelagem de fluxo hiperconcentrado proveniente de rupturas de barragens de rejeitos de mineração. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2022.

MERZ, B.; KREIBICH, H.; SCHWARZE, R.; THIEKEN, A. Review article “assessment of economic flood damage”. *Natural Hazards and Earth System Science*, v. 10, n. 8, p. 1697–1724, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1697-2010>.

MILETI, S.; SORENSEN, J. First Alert and/or Warning Issuance Time Estimation for Dam Breaches, Controlled Dam Releases, and Levee Breaches or Overtopping. Prepared for the U.S. Army Corps of Engineers Risk Management Center, Davis, CA. 2017a.

MILETI, S.; SORENSEN, J. First Alert or Warning Diffusion Time Estimation for Dam Breaches, Controlled Dam Releases and Levee Breaches or Overtopping. Prepared for the U.S. Army Corps of Engineers Risk Management Center, Davis, CA. 2017b.

MILETI, S.; SORENSEN, J. Protective Action Initiation Time Estimation for Dam Breaches, Controlled Dam Releases, and Levee Breaches or Overtopping. Prepared for the U.S. Army Corps of Engineers Risk Management Center, Davis, CA. 2017c.

MINAS GERAIS. Pró-Brumadinho - Histórico do rompimento das barragens da Vale na Mina Córrego do Feijão, 2024. Disponível em: <https://www.mg.gov.br/pro-brumadinho/pagina/historico-do-rompimento-das-barragens-da-vale-na-mina-corrego-do-feijao>. Acesso em: 21 maio 2024.

NATIONAL WATER AND CLIMATE CENTER (NRCS). Manning's n values for various land covers to use for dam breach analyses by NRCS in Kansas. 2016. Disponível em: <https://rashms.com/wp-content/uploads/2021/01/Mannings-n-values-NLCD-NRCS.pdf>. Acesso em: 15 maio 2019.

NORKHAIRI, F. F.; HASINI, H.; THIRUCHELVAM, S.; OM, N. I. Loss of life estimation using life safety model for dam breach flood disaster in Malaysia. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, v. 13, n. 4, p. 254-266, 2022.

PAPROTNY, D.; MENGEL, M. Population, land use and economic exposure estimates for Europe at 100 m resolution from 1870 to 2020. *Scientific Data*, v. 10, n. 1, p. 372, 8 jun. 2023.

PAPROTNY, D.; MORALES-NÁPOLES, O.; JONKMAN, S. N. HANZE: a pan-European database of exposure to natural hazards and damaging historical floods since 1870. *Earth System Science Data*, v. 10, n. 1, p. 565–581, 16 mar. 2018.

PARREIRAS, M.; ADLER, M. Colegas dizem que cerca de 200 funcionários da Vale estavam em refeitório atingido pela lama. Estado de Minas, 2019. Disponível em: https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2019/01/25/interna_gerais,1024555/colegas-dizem-que-200-funcionarios-vale-refeitorio-lama.shtml. Acesso em: 21 maio 2024.

PENG, M.; ZHANG, L. M. Dynamic decision making for dam-break emergency management—Part 1: Theoretical framework. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 13, p. 425-437, 2013.

PRANDEL, J. A. Redução de riscos de desastres: métodos e práticas. Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019, 191p.

PRIEST, J.; WILSON, T.; TAPSELL, M.; PENNING-ROWSELL, C.; VIAVATTENE, C.; FERNANDEZ-BILBAO, A. Building a model to estimate risk to life for European flood events – final report. Project report. 2007. European Commission.

RESCDAM. The Use of Physical Models in Dam-Break Flood Analysis. Final Report of Helsinki University of Technology, RESCDAM Project. 2000

RISHER, P.; ACKERMAN, C.; MORRILL-WINTER, J.; FIELDS, W.; NEEDHAM, J. Levee breach consequence model validated by case study in Joso, Japan. In: 2017, San Antonio, United States. X Association of State Dam Safety Conference. San Antonio, United States: Association of State Dam Safety, 2017. p. 13.

ROBERTSON, P.; DE MELO, L.; WILLIAMS, D.; WILSON, G. Ward. Report of the Expert Panel on the Technical Causes of the Failure of Feijão Dam I. Tech. report, Vale S.A. 2019.

RUSSO, B.; GÓMEZ, M.; MACCHIONE, F. Pedestrian hazard criteria for flooded urban areas. *Natural Hazards*, v. 69, p. 251–265, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0702-2>.

SEIDEL, J.; LAY, H.; GÖDDERTZ, M. Ahrtal unter Wasser: Chronik einer Katastrophe. 2021. Disponível em: <https://reportage.wdr.de/chronik-ahrtal-hochwasser-katastrophe#chronik-hochwasser-im-ahrtal>. Acesso em: 27 abr. 2024.

SILVA, A. F. R. Análise da aplicabilidade de modelos de estimativa de perdas de vidas para inundações provenientes de rupturas de barragens de rejeitos. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2020.

SILVA, A. F. R.; ELEUTÉRIO, J. C. Métodos de avaliação de risco de inundação: uma análise crítica. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 24, n. 2, p. 234-246, 2019.

SILVA, A. F. R.; ELEUTÉRIO, J. C. Analysis of flood warning and evacuation efficiency by comparing damage and life-loss estimates with real consequences related to the São Francisco tailings dam failure in Brazil. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 23, n. 9, p. 3095–3110, 2023 a. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/nhess-23-3095-2023>

SINDICATO DOS SERVIDORES PÚBLICOS DO MEIO AMBIENTE NO ESTADO DE MINAS GERAIS (SINDSEMA-MG). Refeitório e pousada foram arrastados por lama em Brumadinho; 60 mortes são confirmadas, 2019. Disponível em: <https://www.sindsemamg.com.br/refeitório-e-pousada-foram-arrastados-por-lama-em-brumadinho-60-mortes-são-confirmadas>. Acesso em: 21 maio 2024.

SIAS, E. Meteorologista Estael Sias e a chuva: “a hora mais dramática”. *MetSul Meteorologia*, 2024. Disponível em: <https://metsul.com/meteorologista-estael-sias-e-a-chuva-a-hora-mais-dramática/>. Acesso em: 27 maio 2024.

SOUZA, C. Análise probabilística e de sensibilidade dos parâmetros de um estudo de rompimento hipotético: Barragem de Terra. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2016.

STERN, N. Stern Review on the Economics of Climate Change. London: The Stationary Office, 2007. Disponível em <https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/publication/the-economics-of-climate-change-the-stern-review/>. Acesso em 22 jun. 2024.

SZYMCAK, S.; BACKENDORF, F.; BOTT, F.; FRICKE, K.; JUNGHÄNEL, T.; WALAWENDER, E. Impacts of heavy and persistent precipitation on railroad infrastructure in July 2021: a case study from the Ahr Valley, Rhineland-Palatinate, Germany. *Atmosphere*, v. 13, n. 7, p. 1118, 2022.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (TRB). *Highway Capacity Manual*. Washington, DC: National Research Council, 2000.

THIEKEN, H.; BUBECK, P.; HEIDENREICH, A.; VON, J.; DILLENARDT, L.; OTTO, A. Performance of the flood warning system in Germany in July 2021—insights from affected residents. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 23, n. 2, p. 973-990, 2023.

TÜV SÜD BUREAU. Revisão periódica de segurança de barragem Mina Córrego Feijão – Barragem I: relatório técnico. Documento nº RC-SP-117/17, Revisão 4. 24 ago. 2018. 83 p.

UNDRO (1979). United Nations Disaster Relief Organization. Natural Disasters and Vulnerability Analysis. Julho de 1979.

UNDRR. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. Sendai Framework Terminology on Disaster Risk Reduction. Disponível em: <https://www.undrr.org/terminology>. Acesso em: 14 de abril de 2023.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). Hydrologic Engineering Center's – Life Loss Estimation – User's Manual. Version 1.0.1. Davis, Califórnia, 2018.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual. Hydrologic Engineering Center (HEC), 2002.

VARGAS, E.; SRIVASTAVA, S.; TUIA, D.; FALCAO, X. OpenStreetMap: Challenges and opportunities in machine learning and remote sensing. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, v. 9, n. 1, p. 184-199, 2021.

VEJA. Ex-Funcionário Da Vale Diz Que Rejeitos Podem Ter Soterrado Toda A Empresa. *Veja*, 2019. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/brasil/ex-funcionario-da-vale-diz-que-rejeitos-podem-ter-soterrado-toda-a-empresa>. Acesso em: 21 maio 2023.

WANG, C.; ZHANG, S.; TAN, Y.; PAN, F.; YAN, L. Life loss estimation based on dam-break flood uncertainties and lack of information in mountainous regions of Western China. Transactions of Tianjin University, v. 23, p. 370-379, 2017.

WORLD INFORMATION SERVICE ON ENERGY URANIUM PROJECT (WISE). Chronology of Major Tailings Dam Failures. 2023. Disponível em: <http://www.wise-uranium.org/mdaf.html>. Acesso em: 12 abr. 2024.

ZARAMELA, L. Chuvas no RS afetam 67% do estado e deixam 75 mortos. Terra, 2024. Disponível em: <https://www.terra.com.br/byte/chuvas-no-rs-afetam-67-do-estado-e-deixam-75-mortos,7225e62878cc6eb119d8997833a48daf95k676j3.html>. Acesso em: 12 abr. 2024.

APÊNDICE A – Classificação das edificações de acordo com o LifeSim

Descrição OSM	Categoria do LifeSim	Tipo de Finalidade do LifeSim	Tipo de Construção do LifeSim	Critério de Estabilidade do LifeSim	Andares	Observação
addition	RES	RES1-2SNB	Alvenaria	Alvenaria	2	"addition" (residências com adições): RES1-2SNB.
apartments	RES	RES3C	Alvenaria	Alvenaria	3	"apartments" (apartamentos): RES3A a RES3F, dependendo do número de unidades. Por exemplo, RES3A para 2 unidades, aumentando até RES3F para mais de 50 unidades. Adotou-se no presente estudo um valor intermediário, de RES3C para 5 a 9 unidades.
bakehouse	COM	COM1	Alvenaria	Alvenaria	1	"bakehouse" (padaria): COM1.
barn	COM	AGR1	Alvenaria	Alvenaria	1	"barn" (celeiros): AGR1.
bridge_pile	RES	RES1-1SNB	Alvenaria	Alvenaria	1	"bridge_pile" (pilha de ponte): Sem correlação identificada. Considerou-se RES1-1SNB.
bungalow	RES	RES1-1SNB	Alvenaria	Alvenaria	1	"bungalow" (bangalô): RES1-1SNB ou RES1-1SWB, dependendo da presença de um porão. Adotou-se o RES1-1SNB.
bunker	IND	IND6	Concreto	Alvenaria	1	"bunker": IND6.
cabin	RES	RES1-1SNB	Alvenaria	Alvenaria	1	"cabin" (cabana): Não há uma categoria específica para cabanas, mas poderia ser considerada como RES1-1SNB ou RES1-1SWB, assumindo que sejam estruturas de um único andar. Considerou-se o RES1-1SNB.
carport	COM	COM10	Alvenaria	Alvenaria	1	"carport" (garagem): COM10.
chapel	RES	RES1-1SNB	Alvenaria	Alvenaria	1	"chapel" (capela): RES1-1SNB.
church	PUB	REL1	Alvenaria	Alvenaria	1	"church" (Igrejas): REL1.
civic	PUB	GOV1	Alvenaria	Alvenaria	1	"civic" (cívico): GOV1, para serviços gerais do governo.
collapsed	RES	RES1-2SNB	Alvenaria	Alvenaria	1	"collapsed" (colapsado): Sem correlação identificada. Considerou-se RES1-2SNB.
commercial	COM	COM1	Alvenaria	Alvenaria	1	"commercial" (comercial, de forma geral): COM1.

Descrição OSM	Categoria do LifeSim	Tipo de Finalidade do LifeSim	Tipo de Construção do LifeSim	Critério de Estabilidade do LifeSim	Andares	Observação
construction	IND	IND4	Concreto	Alvenaria	1	"construction" (construção): IND6.
container	IND	IND6	Concreto	Alvenaria	1	"container" (contêiner, em contextos de armazenamento ou transporte industrial): IND6.
detached	RES	RES1-2SNB	Alvenaria	Alvenaria	2	"detached" (casa isolada): Varia com o número de andares, podendo ser RES1-1SNB/RES1-1SWB para um andar, até RES1-3SNB/RES1-3SWB para três andares. Adotou-se o RES1-2SNB.
farm	COM	AGR1	Alvenaria	Alvenaria	1	"farm" (fazendas): AGR1.
farm_auxiliary	COM	AGR1	Alvenaria	Alvenaria	1	"farm_auxiliary" (celeiro auxiliar de fazenda): AGR1.
fire_station	PUB	GOV1	Alvenaria	Alvenaria	1	"fire_station" (estação de bombeiros): GOV1, para serviços gerais do governo.
garage	COM	COM10	Alvenaria	Alvenaria	1	"garage" (garagem): COM10.
government	PUB	GOV1	Alvenaria	Alvenaria	1	"government" (governamental): GOV1 para serviços gerais do governo.
grandstand	COM	COM1	Alvenaria	Alvenaria	1	"grandstand" (arquibancada): COM8, para estruturas de recreação.
greenhouse	COM	AGR1	Alvenaria	Alvenaria	1	"greenhouse" (estufas): AGR1
hangar	IND	IND2	Concreto	Alvenaria	1	"hangar" (hangar): Pode ser classificado como IND2 (Light industrial) se usado para propósitos industriais além de aeronáutica.
hospital	COM	COM6	Alvenaria	Alvenaria	2	"hospital": COM6.
hotel	RES	RES4	Alvenaria	Alvenaria	3	"hotel": RES4
house	RES	RES1-2SNB	Alvenaria	Alvenaria	2	"house" (casa): Depende do número de andares e se tem porão, variando de RES1-1SNB/RES1-1SWB a RES1-3SNB/RES1-3SWB. Considerou-se o RES1-2SNB.
hut	RES	RES1-1SNB	Alvenaria	Alvenaria	1	"hut" (cabana): Sem correlação identificada. Considerou-se RES1-1SNB.
industrial	IND	IND1	Concreto	Alvenaria	1	"industrial" (industrial, de forma geral): IND1 (Heavy industrial) ou IND2 (Light industrial), dependendo da escala. Considerou-se o IND1.

Descrição OSM	Categoria do LifeSim	Tipo de Finalidade do LifeSim	Tipo de Construção do LifeSim	Critério de Estabilidade do LifeSim	Andares	Observação
kindergarten	PUB	EDU1	Alvenaria	Alvenaria	2	"kindergarten" (jardim de infância): EDU1.
nursing_home	RES	RES1-2SNB	Alvenaria	Alvenaria	2	"nursing_home" (casa de cuidados): RES1-2SNB.
office	COM	COM4	Alvenaria	Alvenaria	2	"office" (escritório): COM4.
parish_home	RES	RES1-2SNB	Alvenaria	Alvenaria	2	"parish_home" (lar paroquial): RES1-2SNB
parking	COM	COM10	Alvenaria	Alvenaria	1	"parking" (estacionamento): COM10
pavilion	IND	IND6	Concreto	Alvenaria	1	"pavilion" (pavilhão):
public	PUB	GOV1	Alvenaria	Alvenaria	1	"public" (público, de forma geral): Pode variar, mas geralmente GOV1 para serviços públicos em geral.
residential	RES	RES1-2SNB	Alvenaria	Alvenaria	2	"residential" (residencial, genericamente): A classificação dependerá das características específicas da habitação, podendo variar amplamente entre RES1 a RES3F. Adotou-se o RES1-2SNB.
retail	COM	COM1	Alvenaria	Alvenaria	1	"retail" (varejo): COM1 (retail trade) é o mais adequado para lojas de varejo.
roof	RES	RES1-2SNB	Alvenaria	Alvenaria	2	"roof" (telhado): Sem correlação identificada. Considerou-se RES1-2SNB.
ruins	RES	RES1-2SNB	Alvenaria	Alvenaria	2	"ruins" (ruínas de residências): RES1-2SNB
school	PUB	EDU1	Alvenaria	Alvenaria	2	"school": EDU1 para escolas e bibliotecas.
semidetached_house	RES	RES2	Alvenaria	Alvenaria	1	"semidetached_house" (casa semi-isolada): Pode ser classificada como RES2, que se destina a habitações duplex ou bifamiliares.
service	PUB	GOV1	Alvenaria	Alvenaria	1	"service" (serviço): GOV1 para serviços gerais do governo.
shed	IND	IND6	Concreto	Alvenaria	1	"shed" (galpão): IND6.
sport_hall	COM	COM8	Alvenaria	Alvenaria	1	"sports_hall" (ginásio de esportes): COM8, para estruturas de recreação.

Descrição OSM	Categoria do LifeSim	Tipo de Finalidade do LifeSim	Tipo de Construção do LifeSim	Critério de Estabilidade do LifeSim	Andares	Observação
stable	COM	AGR1	Alvenaria	Alvenaria	1	"stable" (estábulo): AGR1.
supermarket	COM	COM1	Alvenaria	Alvenaria	1	"supermarket" (supermercado): Pode se enquadrar em COM1 (Retail trade) devido à sua natureza de varejo.
synagogue	PUB	REL1	Alvenaria	Alvenaria	1	"synagogue" (sinagogas): REL1
tent	RES	RES1-1SNB	Alvenaria	Alvenaria	1	"tent" (tenda): Sem correlação identificada. Considerou-se RES1-1SNB.
terrace	RES	RES2	Alvenaria	Alvenaria	1	"terrace" (casa geminada): Não tem uma categoria direta, mas pode ser enquadrada em RES2 ou RES3A se considerada como parte de uma estrutura de múltiplas unidades. Adotou-se o RES2.
toilets	RES	RES1-2SNB	Alvenaria	Alvenaria	2	Sem correlação identificada. Considerou-se RES1-2SNB.
tower	RES	RES1-2SNB	Alvenaria	Alvenaria	2	"tower" (torre):
train_station	PUB	GOV1	Alvenaria	Alvenaria	1	"train_station" (estação de trem): Não há uma classificação direta em "Público" para estações de trem. Considerou-se o GOV1 para serviços públicos em geral.
transformer_tower	COM	COM1	Alvenaria	Alvenaria	1	"transformer_tower" (torre de transformador): Pode indicar serviços ou infraestrutura de suporte. Definido como COM1.
transportation	PUB	GOV1	Alvenaria	Alvenaria	1	"transportation" (transporte): Não há uma classificação direta em "Público" para infraestruturas de transporte. Considerou-se o GOV1 para serviços públicos em geral.
university	PUB	EDU2	Alvenaria	Alvenaria	2	"university" (universidade): EDU2 para instituições de ensino superior.
warehouse	COM	COM2	Alvenaria	Alvenaria	1	"warehouse" (armazém): COM2.
yes	RES	RES1-SNB	Alvenaria	Alvenaria	2	Sem correlação identificada. Considerou-se RES1-2SNB.

APÊNDICE B – Código para transformação dos arquivos shp. de vias, provenientes do OSM, para o formato do LSM

```
# Carregar os pacotes necessários
library(sf)
library(dplyr)
library(writexl)
library(raster)

# Definir o caminho dos arquivos
shapefile_path <- "Roads_31983.shp"
raster_path <- "Terreno.tif"

# Ler o shapefile e o raster
linhas_sf <- st_read(shapefile_path)
elevacao_raster <- raster(raster_path)

# Preparar um vetor para armazenar todas as coordenadas
todas_coordenadas <- matrix(nrow=0, ncol=2)

# Extrair coordenadas de todos os vértices
for (i in 1:nrow(linhas_sf)) {
  coordenadas <- st_coordinates(linhas_sf[i, ])
  todas_coordenadas <- rbind(todas_coordenadas, coordenadas[,1:2])
}

# Extrair valores de elevação para todas as coordenadas
valores_elevacao <- extract(elevacao_raster, todas_coordenadas)

# Inicializar a tabela com a estrutura desejada
tabela_final <- data.frame(
```

```

Key_word = character(),
Index = integer(),
Num_of_Vertices = integer(),
ID = integer(),
Elevation = integer(),
Type = character(),
Status = character(),
Number_of_Lanes = integer(),
Speed_limit = integer(),
Length = numeric(),
Monitoring_Point = integer(),
stringsAsFactors = FALSE
)

```

```

# Índice para acompanhar a posição atual no vetor de elevação
indice_elevacao <- 1

```

```

# Processar cada linha do shapefile novamente para preencher a tabela_final
for (i in 1:nrow(linhas_sf)) {
  if (i == 1) {
    # Cabeçalhos iniciais especiais
    tabela_final <- rbind(tabela_final, c("Instruções iniciais omitidas por brevidade", "",
    "", "", "", "", "", "", "", ""))

    tabela_final <- rbind(tabela_final, c("Key word", "Index", "Num of Vertices", "ID",
    "Elevation", "Type", "Status", "Number of Lanes", "Speed limit", "Length", "Monitoring
    Point"))
  }

  linha <- linhas_sf[i, ]
  num_vertices <- length(st_coordinates(linha)[,1])
  comprimento <- st_length(linha)

```

```

# Adicionar a linha do início do segmento

tabela_final <- rbind(tabela_final, c(":"Segment", i, num_vertices, i, 0, "ROAD",
"Closed", 2, 48, as.numeric(comprimento), -1))

coordenadas <- st_coordinates(linha)
for (j in 1:nrow(coordenadas)) {
  vertex <- coordenadas[j, ]
  elevacao <- valores_elevacao[indice_elevacao]
  indice_elevacao <- indice_elevacao + 1
  tabela_final <- rbind(tabela_final, c("", vertex[1], vertex[2], elevacao, "", "", "", "", "",
"", ""))
}

# Adicionar a linha do fim do segmento

tabela_final <- rbind(tabela_final, c(":"EndSegment", "", "", "", "", "", "", "", "", "", ""))
}

# Salvar a tabela no Excel

write_xlsx(tabela_final, "tabela_vias_marcao_v3.xlsx", col_names = FALSE)

```