

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

**ANÁLISE DA APLICABILIDADE DE MODELOS
DE ESTIMATIVA DE PERDAS DE VIDAS PARA
INUNDAÇÕES PROVENIENTES DE RUPTURAS
DE BARRAGENS DE REJEITOS**

André Felipe Rocha da Silva

Belo Horizonte
2020

André Felipe Rocha da Silva

**ANÁLISE DA APLICABILIDADE DE MODELOS DE
ESTIMATIVA DE PERDAS DE VIDAS PARA
INUNDAÇÕES PROVENIENTES DE RUPTURAS DE
BARRAGENS DE REJEITOS**

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
Escola de Engenharia da UFMG
2020

S586a	<p>Silva, André Felipe Rocha da. Análise da aplicabilidade de modelos de estimativa de perdas de vidas para inundações provenientes de rupturas de barragens de rejeitos [recurso eletrônico] / André Felipe Rocha da Silva. – 2020. 1 recurso online (xvii, 180 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Julian Cardoso Eleutério.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexos e apêndices: f. 154-180</p> <p>Bibliografia: f. 143-153. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Recursos hídricos - Desenvolvimento - Teses. 3. Avaliação de risco - Teses. 4. Barragens de rejeitos - Teses. 5. Desastres ambientais - Teses. 6. Inundações - Teses. I. Eleutério, Julian Cardoso. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 628(043)</p>
-------	---



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

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

Avenida Antônio Carlos, 6627 - 4º andar - 31270-901 - Belo Horizonte – BRASIL

Telefax: 55 (31) 3409-1882 - posgrad@desa.ufmg.br

http://www.smarh.eng.ufmg.br

FOLHA DE APROVAÇÃO

Análise da Aplicabilidade de Modelos de Estimativa de Perdas de Vidas Para Inundações Provenientes de Rupturas de Barragens de Rejeitos

ANDRÉ FELIPE ROCHA DA SILVA

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof. JULIAN CARDOSO ELEUTÉRIO

Julian Cardoso
Eleuterio:0669
7286679

Assinado de forma digital por Julian Cardoso
Eleuterio:06697286679
Dados: 2020.12.28
21:45:35 -03'00'

Prof. NILO DE OLIVEIRA NASCIMENTO

Nilo de Oliveira
Nascimento

Assinado de forma digital por Nilo de Oliveira Nascimento
Dados: 2020.12.28 21:03:49 -03'00'

Prof. LUIZ RAFAEL PALMIER

Luiz Rafael
Palmier:828835
48749

Assinado de forma digital por Luiz Rafael Palmier:82883548749
Dados: 2020.12.29 15:34:57 -03'00'

Prof. EDUARDO MARIO MENDIONDO

Eduardo Mario Mendiondo:88279782087;
Assinado de forma digital por Eduardo Mario Mendiondo: 88279782087. Dados: 2020.12.29 18:59:01-03'00'

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Versão Final aprovada por

Prof. Antonio Teixeira de Matos
Coordenador

Prof. Julian Cardoso Eleutério
Orientador

Belo Horizonte, 04 de março de 2020.

AGRADECIMENTOS

Especialmente a minha família que, mesmo na minha ausência durante esses anos, sempre esteve ao meu lado em todas as decisões e sempre forneceu total apoio de diversas maneiras.

Ao meu orientador, professor Julian, pelo auxílio concedido durante a pesquisa, desde a escolha e direcionamento do tema do trabalho até as correções e revisões finais.

A Helena que, além do auxílio em várias situações durante a realização deste trabalho, me trouxe muito carinho, amor, compreensão e companheirismo nesse período.

Aos companheiros de república de Belo Horizonte, que, por final, se tornaram meus amigos pelos momentos compartilhados.

Aos colegas do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos por todas ideias e sugestões e pelas horas compartilhadas na realização das atividades de disciplinas cursadas.

Aos amigos de Cataguases, Juiz de Fora e demais lugares que, de alguma maneira, contribuíram para minha trajetória.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo amparo concedido para o desenvolvimento das pesquisas relacionadas ao tema.

RESUMO

Entre os impactos diretos e indiretos decorrentes de inundações tanto naturais quanto tecnológicas, as fatalidades humanas constituem as consequências mais nefastas. Por meio de modelagens matemáticas e de simulações computacionais, estimativas de perdas de vidas são resultados que, quando concebidos de forma prospectiva com base na comparação de diferentes cenários de alerta de cheias passíveis de serem implementados, fornecem importantes subsídios à elaboração de alertas mais robustos e ao planejamento de emergência mais eficaz. No Brasil, os últimos acidentes com grandes impactos e fatalidades ocorreram devido a rupturas de barragens de rejeitos de mineração nos municípios de Mariana e Brumadinho. Mesmo apresentando alta fragilidade por diversos fatores, tais acidentes não são considerados nos modelos de estimativa de perdas de vidas existentes na literatura. Em geral, a elaboração e a aplicação desses modelos são destinadas às inundações naturais ou provenientes de rupturas de estruturas com propósito de represamento de água. Neste contexto, visando inserir uma nova variável na verificação da qualidade e da eficácia dos sistemas de alerta propostos no planejamento de emergência, este trabalho possui como objetivo avaliar a aplicabilidade de dois modelos de estimativa de perdas de vidas com princípios diferentes, RCEM e HEC-LifeSim, em inundações causadas por rompimentos de barragens de rejeitos por meio da análise de dois casos de ruptura ocorridos em barragens em Minas Gerais: São Francisco (Miraí) e Fundão (Mariana). Para desenvolvimento do trabalho, foi realizada a propagação da onda de inundação pelo software HEC-RAS para obtenção de parâmetros hidráulicos e para delimitação da região afetada, que foi caracterizada por meio de uma análise de vulnerabilidade e exposição detalhada por meio de dados censitários. Posteriormente, foi determinado um cenário base para cada modelo de estimativa de perdas de vidas, vistas as características reais dos eventos. Por fim, foi realizada uma análise de sensibilidade dos principais parâmetros de cada modelo que, juntamente aos valores reais de fatalidades ocorridos, auxiliou na verificação da aplicabilidade e na discussão das incertezas presentes na modelagem. Para o caso de Miraí, foi observada a convergência de ambos os modelos. Já para Mariana, foi verificada uma superestimação. Em relação à aplicabilidade dos modelos, verificou-se que o modelo RCEM possui alta subjetividade na determinação do risco hidrodinâmico (DV) e da taxa de fatalidade e que o modelo HEC-LifeSim apresentou limitações em relação à caracterização da evacuação em casos de inundações com tempo de chegada da onda muito curto.

Palavras-chave: Avaliação de risco; Fatalidades; HEC-LifeSim; RCEM.

ABSTRACT

Among the direct and indirect impacts resulting from both natural and technological floods, human fatalities are the most harmful consequences. Using mathematical modeling and computer simulations, life loss estimates are results that, when prospectively designed based on the comparison of different flood alert scenarios that can be implemented, provide important insights for the elaboration of more robust alerts and to the most effective emergency planning. In Brazil, the last accidents with major impacts and fatalities occurred due to the rupture of mining tailings dams in the municipalities of Mariana and Brumadinho. Even though such accidents present high fragility due to several factors, the existing literature is still scant. In general, the application of models that estimates life loss is destined to assess natural floods or floods due to ruptures of structures with the purpose of damming water. In this context, aiming to insert a new variable in the verification of the quality and effectiveness of the warning systems proposed in emergency planning, the purpose of this work is to evaluate the applicability of two models of estimating life loss with different principles, RCEM and HEC-LifeSim, in floods caused by ruptures of tailings dams through the analysis of two cases of ruptures that occurred in dams in Minas Gerais: São Francisco (Miraí) and Fundão (Mariana). For the development of the work, the spread of the flood wave was carried out by the HEC-RAS software to obtain hydraulic parameters and to delimit the affected region, which was characterized through vulnerability and exposure analysis using census data. Subsequently, a base scenario was determined for each model of life loss estimation, considering the real characteristics of the events. Finally, a sensitivity analysis of the main parameters of each model was carried out, which, together with the actual values of fatalities that occurred, helped to verify the applicability and to discuss the uncertainties existing in the modeling. For the case of Miraí, we observed the convergence of both models. For Mariana, overestimation was verified. Regarding the applicability of the models, it was found that the RCEM model has high subjectivity in determining the flood severity (DV) and the fatality rate and that HEC-LifeSim model had limitations regarding the characterization of the evacuation, in cases of flooding with very short wave arrival time.

Keywords: Risk assessment; Fatalities; HEC-LifeSim; RCEM

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Métodos construtivos aplicados em barragens de rejeitos.....	28
Figura 3.2: Eventos de rupturas de barragens de rejeitos de mineração ao longo do tempo ..	29
Figura 3.3: Erosão e inundação causada pela onda inicial de inundação em Mount Polley (Canadá) – 2015	31
Figura 3.4: Cone de depressão de rejeitos liquefeitos causado pela ruptura da barragem de Kolontár (Hungria) – 2010	32
Figura 3.5: Direções das células da grade: a) ortogonal, b) não ortogonal	34
Figura 3.6: Modelo de placas paralelas utilizado por Newton para explicar a viscosidade de um líquido.....	35
Figura 3.7: Curvas reológicas generalizadas para os tipos de fluidos citados	36
Figura 3.8: Curva de quantificação do risco.....	41
Figura 3.9: Evacuação simulada por modelo baseado em agentes: a) sem pilar; b) com pilar após 10 segundos; e c) com pilar após 20 segundos.	43
Figura 3.10: Taxa de fatalidade em função da profundidade e da taxa de subida do nível d'água considerada no modelo de HKV (2000).....	46
Figura 3.11: Zonas de perigo proposta por Jonkman <i>et al.</i> (2008) para estimativa de perdas de vidas.....	49
Figura 3.12: Área de aplicação das funções de fatalidade de Jonkman <i>et al.</i> (2008) em função da profundidade, taxa de subida do nível d'água e velocidade	50
Figura 3.13: Rede Bayesiana utilizada no modelo de estimativa de perdas de vidas proposto por Peng e Zhang (2012)	54
Figura 3.14: Taxa de fatalidade vs. DV para pouco ou sem alerta - RCEM.....	56
Figura 3.15: Taxa de fatalidade vs. DV para alerta adequado - RCEM.....	57
Figura 3.16: Critérios utilizados no HEC-LifeSim para danos em construções residenciais unifamiliares de alvenaria com um andar.....	63
Figura 3.17: Linha do tempo do alerta e evacuação utilizada no HEC-LifeSim	63
Figura 3.18: Distribuições de probabilidades - curvas de planejamento de atraso na emissão do alerta	66
Figura 3.19: Curvas simuladas para os quatros modelos de difusão do alerta - dia e noite....	68
Figura 3.20: Curvas de mobilização da população em risco alertada	70
Figura 3.21: Curva de mobilização para evacuação a pé ou vertical	71
Figura 3.22: Modelo modificado de Greenshields <i>et al.</i> (1935) utilizado no HEC-LifeSim..	73

Figura 3.23: Distribuições de probabilidade de taxas de fatalidade utilizados no HEC-LifeSim para cada zona de inundação	74
Figura 3.24: Esquema da abordagem de estimativa de perdas de vidas do HEC-LifeSim	75
Figura 3.25: Estimativa de perdas de vidas obtidas por Lang (2011) para a barragem A	78
Figura 3.26: Estimativa de perdas de vidas obtidas por Lang (2011) para a barragem B.....	78
Figura 3.27: Comparação entre taxas de fatalidade de Graham e RCEM para casos de pouco ou sem alerta.....	81
Figura 3.28: Comparação entre taxas de fatalidade de Graham e RCEM para casos de alerta adequado.....	81
Figura 3.29: Exemplo de população que deverá entrar na área de inundação durante o processo de evacuação.....	83
Figura 3.30: Redução percentual das perdas de vidas provocadas pela inundação proveniente da ruptura da barragem de Fundão para os cenários 2, 3, 4 e 5 em relação ao cenário base, considerando-se os valores médios e de limite inferior e superior, às 4:00 am. e às 4:00 pm.	84
Figura 4.1: Parâmetro de formação da brecha de ruptura	86
Figura 4.2: Perfil longitudinal do rio extraído do MDE, apresentando dados originais (vermelho), da linha de água com correção dos ruídos (cinza) e nível estimado do fundo do rio (preto).	88
Figura 4.3: Relação entre a largura do rio, a resolução especial e os erros nos dados MDE devido aos efeitos da vegetação e do nível da água	88
Figura 4.4: Demonstração da correção dos ruídos. a) o perfil de longitudinal sem correção dos ruídos; b) o perfil longitudinal pós correção	89
Figura 4.5: Curvas reológicas obtidas por Machado (2017) no acidente de Mariana.....	91
Figura 4.6: Árvore de decisão para escolha da abordagem e da técnica de desagregação aplicada na alocação dos domicílios e da população na <i>grade estatística</i>	94
Figura 4.7: Recorte do mapa de um setor censitário de Mirai-MG.....	95
Figura 4.8: Relação da linha do tempo da inundação e da evacuação	100
Figura 5.1: Localização do município de Mirai em Minas Gerais.....	102
Figura 5.2: Vista da crista e do talude a jusante do reservatório São Francisco	103
Figura 5.3: Região de interesse atingida pela inundação causada pela ruptura da barragem de São Francisco, Mirai - MG	103
Figura 5.4: Hietograma e hidrograma afluente ao reservatório de São Francisco	104
Figura 5.5: Hidrograma de ruptura e deplecionamento do reservatório de São Francisco ...	105

Figura 5.6: Topografia utilizada na modelagem em Mirai.....	106
Figura 5.7: Classificação do uso e ocupação do solo da região afetada de Mirai com base em dados do Landsat de 15/10/2005	106
Figura 5.8: Envoltória da mancha de inundação simulada com HEC-RAS e observada causada pela ruptura da barragem de São Francisco	107
Figura 5.9: Regiões de interseção, superestimação e subestimação da mancha inundação simulada em relação à observada para ruptura da barragem de São Francisco.....	108
Figura 5.10: Seções utilizadas para análise hidráulica dos resultados obtidos pela simulação da propagação da onda de inundação causada pela ruptura da barragem de São Francisco ..	108
Figura 5.11: Propagação do hidrograma de cheia segundo a modelagem da ruptura da barragem de São Francisco.....	109
Figura 5.12: Progressão da onda de inundação obtida pela simulação da ruptura da barragem de São Francisco	112
Figura 5.13: Análise de vulnerabilidade e exposição da região afetada pela onda de inundação simulada durante o período da noite em Mirai.....	114
Figura 5.14: Fator DV (risco hidrodinâmico) e construções atingidas pela inundação simulada em Mirai	115
Figura 5.15: Intervalo do gráfico do RCEM adotado no cenário base de estimativa de perdas de vidas em Mirai	115
Figura 5.16: Dados de vias, construções e destinos utilizados para estimativa de perdas de vidas no HEC-LifeSim em Mirai	116
Figura 5.17: Intervalo de curvas de difusão do alerta segundo hipóteses adotadas para o cenário de base de evacuação em Mirai	118
Figura 5.18: Intervalo de curvas de mobilização da população hipóteses adotadas para o cenário de base de evacuação em Mirai	119
Figura 5.19: Trechos utilizados da mancha de inundação simulada para obtenção do parâmetro DV em Mirai por meio da proposta de USBR (2015).....	121
Figura 5.20: Análise de sensibilidade do período do dia na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Mirai	122
Figura 5.21: Análise de sensibilidade do modo de evacuação na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Mirai	123
Figura 5.22: Análise de sensibilidade do tempo de identificação da ameaça na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Mirai.....	124

Figura 5.23: Comparação dos resultados das análises de sensibilidade das curvas de atraso de emissão, difusão e mobilização na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Mirai	126
Figura 5.24: Localização do município de Mariana em Minas Gerais	127
Figura 5.25: Esquema do corte do projeto da barragem de Fundão.....	128
Figura 5.26: Região de interesse atingida pela inundação causada pela ruptura da barragem de Fundão, Mariana - MG	128
Figura 5.27: Brecha de ruptura de Fundão	130
Figura 5.28: Hidrograma de ruptura de Fundão e de Santarém	130
Figura 5.29: Topografia obtida pelo tratamento do MDE ALOS e utilizada na modelagem da ruptura de barragem de Fundão	131
Figura 5.30: Classificação do uso e ocupação do solo da região afetada de Mariana com base em dados do Landsat de 25/09/2015	132
Figura 5.31: Envoltória da mancha de inundação simulada com HEC-RAS e observada causada pela ruptura da barragem de Fundão.....	133
Figura 5.32: Seções utilizadas para análise hidráulica dos resultados obtidos pela simulação da propagação da onda de inundação causada pela ruptura da barragem de Fundão.....	134
Figura 5.33: Propagação do hidrograma de cheia segundo a modelagem da ruptura da barragem de Fundão	134
Figura 5.34: Progressão da onda de inundação obtida pela simulação da ruptura da barragem de Fundão	137
Figura 5.35: Análise de vulnerabilidade e exposição da região afetada pela onda de inundação simulada durante o período da tarde em Bento Rodrigues	138
Figura 5.36: Fator DV (risco hidrodinâmico) e construções atingidas pela inundação simulada em Bento Rodrigues.....	139
Figura 5.37: Intervalo do gráfico do RCEM adotado no cenário base de estimativa de perdas de vidas em Bento Rodrigues	140
Figura 5.38: Dados de vias, construções e destinos utilizados para estimativa de perdas de vidas no HEC-LifeSim na região afetada pela ruptura da barragem de Fundão	141
Figura 5.39: Intervalo de curvas de difusão do alerta segundo hipóteses adotadas para o cenário de base de evacuação em Bento Rodrigues	142
Figura 5.40: Intervalo de curvas de mobilização da população segundo hipóteses adotadas para o cenário de base de evacuação em Bento Rodrigues	143

Figura 5.41: Relação entre número de fatalidades e o intervalo de curvas de mobilização adotado no cenário base em Bento Rodrigues.....	145
Figura 5.42: Trechos utilizados da mancha de inundação simulada para obtenção do parâmetro DV em Bento Rodrigues por meio da proposta de USBR (2015).....	146
Figura 5.43: Análise de sensibilidade do período do dia na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Bento Rodrigues.....	148
Figura 5.44: Análise de sensibilidade do modo de evacuação na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Bento Rodrigues.....	149
Figura 5.45: Análise de sensibilidade do tempo de identificação da ameaça na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Bento Rodrigues.....	150
Figura 5.46: Comparação dos resultados das análises de sensibilidade das curvas de atraso de emissão, difusão e mobilização na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Bento Rodrigues	152

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Eventos de rupturas de barragens de rejeitos de mineração na década de 2010 ..	30
Tabela 3.2: Taxas de fatalidades recomendadas por Graham (1999) para estimativa de perdas de vidas causadas por ruptura de barragem	52
Tabela 3.3: Modelos de estimativa de perdas de vidas apresentados neste trabalho.....	55
Tabela 3.4: Limiares de submersão utilizado para residenciais unifamiliar com um andar considerados no HEC-LifeSim para cada zona de inundação existente.....	62
Tabela 3.5: Coeficientes utilizados nas curvas de planejamento de atraso na emissão do alerta	65
Tabela 3.6: Valores dos coeficientes de eficácia do alerta direto e indireto para cada tipo de curva de difusão do alerta proposta	68
Tabela 3.7: Critérios de estabilidade em inundações propostos por Aboelata & Bowles (2005) e utilizados no HEC-LifeSim	73
Tabela 3.8: Fatalidades calculadas por Jonkman <i>et al.</i> (2002) para uma inundação na Holanda	77
Tabela 3.9: Número e local das fatalidades estimadas Di Mauro <i>et al.</i> (2012) em <i>Canvey Island</i> devido à inundação de 1953 ocorrida na Holanda.....	79
Tabela 3.10: Resultados do evento observado e simulado por Risher <i>et al.</i> (2017)	82
Tabela 4.1: Coeficientes de <i>Manning</i> para as classes de uso e ocupação do solo adotadas....	90
Tabela 4.2: Fração amostral dos domicílios visitados e número de municípios, segundo as classes de tamanho da população dos municípios em 1º de julho de 2009	95
Tabela 4.3: Tipos de ocupação utilizados para caracterização dos domicílios	96
Tabela 5.1: Comparação dos resultados da propagação da onda de cheia em Mirai obtidos pela simulação e por Rocha (2015)	110
Tabela 5.2: Comparação dos resultados da propagação da onda de cheia em Mirai obtidos pela simulação com <i>Manning</i> igual 0,15 para toda planície de inundação e por Rocha (2015)	111
Tabela 5.3: Dados obtidos por meio da análise dos microdados do censo demográfico de 2010 em relação aos domicílios na região atingida em Mirai	113
Tabela 5.4: Dados obtidos por meio da análise dos microdados do censo demográfico de 2010 em relação à população na região atingida em Mirai	113

Tabela 5.5: Dados obtidos por meio da análise dos microdados do censo demográfico de 2010 em relação à população em outras tipologias de ocupações no período da tarde na região atingida em Mirai	113
Tabela 5.6: Quartis de estimativa de perdas de vidas para o cenário base em Mirai - HEC-LifeSim	119
Tabela 5.7: Relação entre fatalidades e número de interações realizadas no HEC-LifeSim para o cenário base de Mirai	120
Tabela 5.8: Estimativa de fatalidades em Mirai utilizando outras faixas do RCEM	120
Tabela 5.9: Determinação do DV nos trechos adotados da mancha de inundação simulada em Mirai	121
Tabela 5.10: Estimativa de fatalidades pelo modelo RCEM em cada trecho adotado da mancha de inundação simulada em Mirai	122
Tabela 5.11: Valores da análise de sensibilidade do tempo de identificação da ameaça na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Mirai	124
Tabela 5.12: Valores da análise de sensibilidade das curvas de atraso na emissão do alerta na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Mirai	125
Tabela 5.13: Valores da análise de sensibilidade nas curvas de atraso da difusão do alerta na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Mirai	125
Tabela 5.14: Valores da análise de sensibilidade nas curvas de atraso de mobilização da população na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Mirai	125
Tabela 5.15: Resultados da propagação da onda de cheia segundo a modelagem da ruptura da barragem de Fundão	135
Tabela 5.16: Dados obtidos por meio da análise dos microdados do censo demográfico de 2010 em relação aos domicílios na região atingida em Bento Rodrigues	137
Tabela 5.17: Dados obtidos por meio da análise dos microdados do censo demográfico de 2010 em relação à população na região atingida em Bento Rodrigues	137
Tabela 5.18: Dados obtidos por meio da análise dos microdados do censo demográfico de 2010 em relação à população presente na escola e na igreja no período da tarde na região atingida em Bento Rodrigues	138
Tabela 5.19: Estimativa de perdas de vidas para o cenário base em Bento Rodrigues - HEC-LifeSim	143
Tabela 5.20: Porcentagem da população mobilizada no cenário base em Bento Rodrigues - HEC-LifeSim	144

Tabela 5.21: Estimativa de fatalidades em Bento Rodrigues utilizando outras faixas do RCEM.....	146
Tabela 5.22: Determinação do DV nos trechos adotados da mancha de inundação simulada em Bento Rodrigues	147
Tabela 5.23: Estimativa de fatalidades pelo modelo RCEM em cada trecho adotado da mancha de inundação simulada em Bento Rodrigues	147
Tabela 5.24: Valores da análise de sensibilidade do período do dia na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Bento Rodrigues.....	148
Tabela 5.25: Valores da análise de sensibilidade do modo de evacuação na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Bento Rodrigues.....	149
Tabela 5.26: Valores da análise de sensibilidade do tempo de identificação da ameaça na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Bento Rodrigues	150
Tabela 5.27: Valores da análise de sensibilidade das curvas de atraso na emissão do alerta na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Bento Rodrigues	151
Tabela 5.28: Valores da análise de sensibilidade nas curvas de atraso da difusão do alerta na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Bento Rodrigues	151
Tabela 5.29: Valores da análise de sensibilidade nas curvas de atraso de mobilização da população na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Bento Rodrigues	151

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

2D	Bidimensional
A	Área
a	Coefficiente Específico para Ajuste dos Dados Empíricos
α	Fator de Material
AGM	Área de Gerenciamento de Emergência
a_m	Coefficiente Relacionado à Velocidade da Mobilização
ALOS	Advanced Land Observing Satellite
b	Coefficiente Específico para Ajuste dos Dados Empíricos
B_{ave}	Largura Média da Brecha
Bd	Dano em Construções
b_m	Coefficiente Relacionado ao Tempo Médio para Mobilização
Bt	Coefficiente Relacionado à Eficácia do Sistema de Alerta Direto
ANM	Agência Nacional de Mineração
C	Número de Courant
c	Coefficiente de Contração ou Expansão
$\dot{\gamma}$	Tensão de Cisalhamento
CN	Curva Índice
Ct	Coefficiente Relacionado à Eficácia do Alerta Indireto
c_t	Coefficiente de Atrito do Fundo do Canal/Planície de Inundação
Desc.	Desconhecido
DF	Fator de Detritos
DV	Risco Hidrodinâmico
dv/dx	Diferença de velocidade
ΔT	Intervalo Computacional
ΔX	Dimensão Média da Célula
ε	Erro Aleatório
η	Viscosidade
F	Força
f	Parâmetro de Coriolis
F_D	Taxa de Fatalidade
F_{DB}	Taxa de Fatalidade na Zona da Brecha

$F_D(h)$	Taxa de Fatalidade por Afogamento
F_{DR}	Taxa de Fatalidade na Zona Restante
F_{DRW}	Taxa de Fatalidade na Zona de Taxa de Subida da Água Rápida
$F_D(u)$	Taxa de Fatalidade em Função da Velocidade do Escoamento
F_E	Taxa de Evacuação
$F_E(T_A)$	Probabilidade de Sucesso de Evacuação
Φ_N	Distribuição Normal da Variável x
g	Aceleração Gravitacional
H	Nível da Superfície de Água
h	Profundidade da Água
h_b	Altura Final da Brecha
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center's River Analysis System
H_{veg}	Altura Efetiva da Vegetação
h_w	Altura do Volume Armazenado no Reservatório no Início da Ruptura
HR	Classificação do Evento
∇H	Gradiente de Elevação da Superfície da Água
IBAMA	Instituto Brasileiro de Meio Ambiente
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Imp.	Improvável
μ	Viscosidade Dinâmica
MDE	Modelo Digital de Elevação
Mín.	Mínimo
Mod.	Moderado
Mod.Rap.	Moderadamente Rápido
N	Estimativa de Perdas de Vidas
n	Coefficiente de Rugosidade de Manning
ν	Viscosidade Cinemática
NB	Número de Construções Atingidas
$N(I)$	Número de Feridos
N_{PAR}	Número de Pessoas em Risco
NRCS	Natural Resources Conservation Service
NSI	National Structure Inventory
p	Probabilidade de Atraso na Decisão

PAE	Plano de Ações Emergenciais
PAEBM	Plano de Ações Emergenciais para Barragens de Mineração
PALSAR	Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar
P_B	Probabilidade de Falha de um Dique Próximo a uma Área Residencial
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
Prof.	Profundidade
Prov.	Provável
P_S	Probabilidade de um Tipo de Tempestade
PSB	Plano de Segurança da Barragem
Pu_t	População que não foi Alertada
P_t	Probabilidade Acumulativa de ser Mobilizado
q	Termo de Fluxo
R	Raio Hidráulico
r	Fator de Abrigo
ρ	Massa Específica
RES1	Residencial Unifamiliar
RES4	Alojamento Temporário
RES5	Dormitório Institucionais
RES6	Asilo ou Orfanato
RCEM	Reclamation's Consequence Estimating Methodology
S	Função de Fatalidade Empírica
σ	Taxa de Cisalhamento
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
t	Tempo de Evacuação Disponível
t_f	Tempo de Formação Total da Brecha
u	Velocidade do Fluxo
USACE	United States Army Corps of Engineers
USBR	United States Bureau of Reclamation
USDHS	United State Department of Homeland Security
USSD	United States Society on Dams
V	Velocidade Vetorial

v	Componente da velocidade na Direção y
Veíc.	Veículo
$V:H$	Coefficientes de Declividade Lateral
V_o	Velocidade da Onda de Inundação
VP	Vulnerabilidade da Área em Função da Efetividade do Alerta e Tipo de Construções
VP	Vulnerabilidade da População em Função do Número de Pessoas muito Idosas
v_t	Coefficiente de Viscosidade Turbulento
V_w	Volume de Água no Instante Inicial da Ruptura
W	População Alertada
w	Taxa de Subida do Nível da Água
$\frac{\Delta W}{\Delta t}$	Taxa de População Alertada
WT	Tempo de Alerta
Y	Distância entre duas placas paralelas
z_0	Cota de Fundo do Rio
ZAS	Zona de Autossalvamento
Z_{MDE}	Elevação do MDE

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	OBJETIVOS	27
2.1	OBJETIVO GERAL	27
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
3	REVISÃO DA LITERATURA	28
3.1	RUPTURA DE BARRAGENS DE REJEITOS	28
3.1.1	<i>Características e vulnerabilidade de barragens de rejeitos</i>	28
3.1.2	<i>Abordagens para estudo da propagação da onda de rejeitos</i>	31
3.1.2.1	Modelo HEC-RAS 2D	32
3.1.2.2	Resistência do fluxo de rejeitos	34
3.2	MODELOS DE ESTIMATIVA DE PERDAS DE VIDAS	40
3.2.1	<i>Generalidades</i>	40
3.2.2	<i>Modelos de estimativa de perdas de vidas existentes na literatura</i>	44
3.2.2.1	Inundações ribeirinhas e costeiras	44
3.2.2.2	Inundações causadas por ruptura de barragens	50
3.2.2.3	RCEM	55
3.2.2.4	HEC-LifeSim	60
3.2.3	<i>Aplicações de modelos de estimativa de perdas de vidas</i>	76
4	MATERIAIS E MÉTODOS	85
4.1	ESCOLHA DOS ESTUDOS DE CASOS	85
4.2	MODELAGEM HIDRODINÂMICA	85
4.2.1	<i>Hidrograma de ruptura</i>	86
4.2.2	<i>Caracterização topográfica</i>	87
4.2.3	<i>Uso e ocupação do solo – coeficientes de rugosidade</i>	90
4.2.4	<i>Propagação da onda de rejeitos</i>	91
4.3	ANÁLISE DE VULNERABILIDADE E EXPOSIÇÃO	92
4.3.1	<i>Recortes estatísticos</i>	92
4.3.2	<i>Microdados</i>	95
4.3.2.1	Amostra de domicílios	96
4.3.2.2	Amostra de pessoas	96
4.4	MODELAGEM DE PERDAS DE VIDAS	97
4.4.1	RCEM	97
4.4.2	HEC-LifeSim	98
4.5	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	100
5	ESTUDOS DE CASO	102

5.1	BARRAGEM DE SÃO FRANCISCO – MIRAI/MG	102
5.1.1	<i>Modelagem hidrodinâmica</i>	104
5.1.2	<i>Análise de vulnerabilidade e exposição</i>	112
5.1.3	<i>Modelagem de perdas de vidas com o RCEM</i>	114
5.1.4	<i>Modelagem de perdas de vidas com o HEC-LifeSim</i>	116
5.1.5	<i>Análise de sensibilidade do modelo RCEM</i>	120
5.1.6	<i>Análise de sensibilidade do modelo HEC-LifeSim</i>	122
5.2	BARRAGEM DE FUNDÃO – MARIANA/MG	127
5.2.1	<i>Modelagem hidrodinâmica</i>	129
5.2.2	<i>Análise de vulnerabilidade e exposição</i>	137
5.2.3	<i>Modelagem de perdas de vidas com RCEM</i>	139
5.2.4	<i>Modelagem de perdas de vidas com HEC-LifeSim</i>	140
5.2.5	<i>Análise de sensibilidade do modelo RCEM</i>	145
5.2.6	<i>Análise de sensibilidade do modelo HEC-LifeSim</i>	147
6	DISCUSSÕES DOS RESULTADOS	153
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	158
	REFERÊNCIAS	163
	APÊNDICE A	174
	APÊNDICE B	176
	ANEXO A	189
	ANEXO B	198

1 INTRODUÇÃO

As inundações são caracterizadas por eventos que resultam na presença de água em áreas geralmente secas como consequência de águas superficiais que extrapolam seus limites normais (JONKMAN, 2007). Os fatores que provocam uma inundação são diversos e inter-relacionados. Esses fatores podem ser classificados em climáticos e humanos. O primeiro envolve situações como precipitação, derretimento de geleiras e ciclones. O segundo inclui rupturas de obras hidráulicas, existência de sistemas de drenagem inadequados e alteração do uso e cobertura do solo (DOOCY *et al.*, 2013).

Os grandes impactos causados por inundações estão relacionados ao processo histórico de envolvimento e ocupação da população nas planícies dos rios. Quando há ocorrência dessa tipologia de evento, são observados os seguintes impactos sobre a região afetada: danos à propriedade física, comprometendo as lavouras, lavando o solo, danificando ou destruindo as estruturas, destruindo os pertences domésticos e causando deterioração da propriedade de inúmeras outras maneiras; interrupção da produção de bens e serviços; fatalidades ou prejuízos à vida humana; e remoção e reocupação das áreas atingidas (WHITE, 1945).

Entre os potenciais impactos, a perda de vidas humanas é o mais significativo. Recentes acelerações no crescimento populacional e alterações nos padrões de uso e ocupação da terra aumentaram a vulnerabilidade humana. Foram registradas no mundo, entre o período de 1980 a 2009, 539.811 fatalidades causadas por 4.093 inundações (DOOCY *et al.*, 2013). Já no Brasil, das 3.462 fatalidades por desastres naturais durante o período de 1991 e 2012, 2.504 (72%) foram relacionadas a inundações (BRASIL, 2013).

Ainda no contexto nacional, os últimos eventos de inundações com grandes consequências observadas estão relacionados às rupturas de barragens de rejeitos de mineração (Fundão em Mariana e Córrego do Feijão em Brumadinho). No Brasil, já foram registrados 10 acidentes com estruturas dessa tipologia com 280 fatalidades e 17 desaparecimentos desde 1960 até 2019 (WISE, 2020).

Os benefícios fornecidos à sociedade pela construção de barragens de diferentes tipologias e finalidades são inegáveis. Entretanto essas estruturas, mesmo que com baixa probabilidade de ocorrência, podem romper, representando assim um alto potencial a causar danos no vale a

jusante pelo fato do elevado volume de material propagado. Essa situação é ainda mais agravante em barragens de rejeitos, as quais, na maioria das vezes, além da maior fragilidade da estrutura por causa dos métodos construtivos empregados e gerenciamento inadequado do risco, apresentam um impacto muito mais significativo para o meio ambiente devido às características físico-químicas do material armazenado.

A verificação pelo Governo Federal Brasileiro da necessidade de atuação de forma mais eficaz em relação à segurança em barragens ocorreu após as consequências provenientes da ruptura das barragens de rejeitos de mineração do Rio Verde, em 2001, e de rejeitos da indústria de Papel Cataguases em 2003. No mesmo ano de 2003, foi criado o Projeto de Lei nº 11.821/2003 (BRASIL, 2003), que estabelecia a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e propunha a criação o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). Ocorreram ainda, os acidentes com as barragens de acumulação de água em Camará, em 2004, e de mineração Rio Pomba Cataguases, em 2007. Esses acidentes obtiveram grande destaque na mídia resultando no requerimento da população por mais compromisso das autoridades e dos proprietários das barragens. Porém, apenas em 2010 a PNSB entrou em vigor.

A Lei nº 12.334/2010 estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens e criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (BRASIL, 2010). Essa lei é destinada para barragens de acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, que possuem uma ou mais características que a definem como de risco considerável. Uma dessas características concerne o dano potencial associado à sua falha potencial, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas.

O dano potencial associado é compreendido como o dano que pode ocorrer devido a rompimento, vazamento, infiltração no solo ou mau funcionamento de uma barragem, independentemente da sua probabilidade de ocorrência, podendo ser graduado de acordo com as perdas de vidas humanas e impactos sociais, econômicos e ambientais.

A determinação da categoria do dano potencial associado é realizada com base nos critérios definidos e apresentados na Resolução nº 143/2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), que estabelece critérios para classificação de barragens (BRASIL, 2012a), um dos instrumentos da PNSB. São analisados os seguintes critérios: volume do reservatório, existência

de população a jusante, impacto ambiental e impacto econômico e social decorrentes da ruptura da barragem.

Em cada critério e para cada tipologia de barragem (acumulação de água ou disposição de resíduos e rejeitos), são definidos valores que dependem das características do barramento e da área a jusante. A classificação é determinada pelo somatório desses valores, em que, intervalos desse somatório indicam a classificação do dano potencial associado em baixo, médio ou alto.

Além da categoria de dano potencial associado, a classificação também é definida para categoria de risco, que considera aspectos da própria barragem que possam influenciar na possibilidade de ocorrência de acidente. São considerados as características técnicas, o estado de conservação e o Plano de Segurança da Barragem (PSB).

O PSB, assim como sistema de classificação de barragens, também é um instrumento da PNSB. A critério do órgão fiscalizador, pode ser exigido, em agregação ao PSB, a elaboração do Plano de Ações Emergenciais (PAE) em função da categoria de risco e do dano potencial associado à barragem. O PAE deve conter as ações a serem executadas pelo responsável do empreendimento em situações de emergências e as definições dos agentes envolvidos para essa ocorrência. Logo, para sua elaboração, são necessários levantamentos de dados por meio de uma série de estudos que envolvem análise da propagação da cheia, mapas de inundação do vale a jusante do barramento e estimativas de riscos impactos associados à falha.

Para barragens de rejeitos de mineração, a autarquia que fiscaliza os empreendimentos é a Agência Nacional de Mineração (ANM). O conteúdo mínimo do PAE é embasado pela Portaria nº 70.389/2017 do extinto Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) (BRASIL, 2017), que atualmente foi retificada pela Resolução nº 13/2019 da ANM após o acidente de Brumadinho em janeiro de 2019 (BRASIL, 2019). Nessa Portaria, o PAE é renomeado como Plano de Ações Emergenciais para Barragens de Mineração (PAEBM) e é exigido quando o dano potencial associado for classificado como alto ou quando for médio e quando o critério de existência de população a jusante atingir o valor máximo ou o critério impacto ambiental também atingir o valor máximo.

Segundo a Portaria nº 70.389/2017, o PAEBM deve conter um estudo de inundação capaz de caracterizar adequadamente o potencial impacto decorrido em virtude do processo de ruptura ou mau funcionamento da estrutura. Além disso, é indicado a necessidade da instalação de um

sistema de alerta, contemplando sirenes e outros mecanismos de aviso adequados nas comunidades inseridas na zona de autossalvamento (ZAS), que são regiões as quais o empreendedor é responsável pelo alerta à população e que se deve adotar a maior das seguintes distâncias para a sua delimitação: a distância que corresponda a um tempo de chegada da onda de inundação igual a 30 minutos ou 10 quilômetros.

Estudos de ruptura de barragens possibilitam a realização de análises de vulnerabilidade, exposição e riscos que permitem a quantificação dos danos causados por esses acidentes. Essa quantificação de danos envolve, inclusive, a estimativa do número de fatalidades.

A análise prospectiva de estimativa de fatalidades com base na comparação de diferentes cenários de alerta em cheias passíveis de serem implementados pode fornecer importantes subsídios à elaboração de sistemas de alertas mais robustos e de PAEBMs mais eficazes. Além disso, a aplicação de modelos de estimativas de perdas de vidas pode ser estendida e direcionada para o auxílio na implementação de medidas necessárias à redução dos riscos de desastres regulamentadas na Lei nº12.608, que estabelece a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (BRASIL, 2012b).

Há na literatura diversos modelos de estimativa de perdas de vidas, nos quais a estimativa é obtida com base nas características da inundação, do sistema de alerta e da população em risco. Porém, a elaboração e aplicação desses modelos de estimativa de perdas de vidas estão restritas às inundações naturais ou em falhas de estruturas de acumulação de água. Para que esses modelos possam ser utilizados em situações em que há uma maior resistência no fluxo da inundação, como é caso de uma onda de rejeitos, é necessária a verificação da aplicabilidade por meio da comparação de análises prospectivas com casos que já ocorreram.

Em um contexto de recentes acidentes com grandes impactos e em que há 219 barragens de rejeitos de mineração classificadas com dano potencial associado alto (ANM, 2019) e que, logo, necessitam de elaboração ou revisão periódica do PAEBM, o presente trabalho buscou avaliar a aplicabilidade de modelos de estimativa de perdas de vidas em situações de inundações causadas por rupturas de barragens de rejeitos de mineração com intuito de introduzir um nova variável para agregar na qualidade e na eficácia da elaboração do planejamento de emergência.

A metodologia empregada neste trabalho objetivou a verificação da aplicabilidade de dois modelos de estimativas de perdas de vidas que possuem diferentes abordagens. O modelo

empírico RCEM (*Reclamation's Consequence Estimating Methodology*) e o modelo baseado em agentes HEC-LifeSim.

O RCEM é uma atualização do modelo Graham (1999), que foi amplamente utilizado na literatura. Atualmente, a aplicação do RCEM é direcionada aos casos em que só há o objetivo da obtenção de uma ordem de grandeza das fatalidades e em locais onde não há quantidade e qualidade suficiente dos dados de entrada exigidos modelos baseados em agentes.

O HEC-LifeSim incorpora de maneira completa o modelo LifeSim. O modelo é o mais utilizado em consultorias e seguradoras americanas e possui a aplicação crescente em outros países por ainda apresentar alguns impedimentos face à grande quantidade e qualidade dos dados de entrada. O HEC-LifeSim, vista a abordagem baseado em agentes, fornece informações detalhadas em relação às fatalidades, sendo assim, altamente aplicável no intuito de elaboração do planejamento de emergência.

Foram analisados dois casos de rupturas de barragens de rejeitos de mineração que já ocorreram, a barragem de São Francisco (Mirai – MG) e a barragem de Fundão (Mariana – MG) que ocorreram em 2007 e 2015, respectivamente.

Para realização do trabalho, primeiramente, foram obtidas as características da propagação da onda de rejeitos por meio da modelagem hidrodinâmica com a adoção da técnica de coeficiente de resistência combinada (pseudo *Manning*) para simulação da resistência de fluxo dos rejeitos. Após, foi realizada uma análise de vulnerabilidade e exposição com a caracterização das construções e da população presente na área atingida pela inundação. A partir dos resultados da modelagem hidrodinâmica e da análise de vulnerabilidade e exposição, foram utilizados os dois modelos de estimativa de perdas de vidas para verificação das fatalidades. Por fim, foi realizada uma análise de sensibilidade nos principais parâmetros de cada modelo para auxiliar na análise de aplicabilidade e no entendimento das incertezas existentes nesses modelos de estimativa perdas de vidas.

Esta dissertação está estruturada por oito capítulos: O presente capítulo refere-se à **INTRODUÇÃO**, que contextualiza e apresenta as motivações para realização desta pesquisa. O Capítulo 2, **OBJETIVOS**, descreve o objetivo geral e os objetivos específicos que guiam o trabalho. No Capítulo 3, **REVISÃO DA LITERATURA**, são detalhadas as características, as fragilidades e as abordagens para estudo da propagação da onda de cheia em situações de

ruptura de barragem de rejeitos. Além disso, são descritos os conceitos da modelagem de estimativa de perdas de vidas juntamente à apresentação dos modelos existentes, com detalhamento do RCEM e do HEC-LifeSim, e de exemplos de aplicações realizadas. O Capítulo 4, **MATERIAIS E MÉTODOS**, descreve todos os tópicos da metodologia aplicada para realização do trabalho, destacando as etapas essenciais para execução dos modelos de estimativa de perdas de vidas e a posterior análise da influência dos principais parâmetros na modelagem. No Capítulo 5, **ESTUDOS DE CASO**, há a descrição dos casos ocorridos e a apresentação dos resultados obtidos pela aplicação da metodologia definida nos casos de rompimentos das barragens de rejeitos de mineração de Mirai e de Mariana. No Capítulo 6, **DISCUSSÕES DOS RESULTADOS**, é realizada uma análise mais crítica dos resultados obtidos no capítulo anterior por meio de comparações, indicando a qualidade desses resultados e as incertezas existentes nas etapas executadas da metodologia. Por fim, o Capítulo 7, **CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**, detalha as conclusões finais com a verificação da aplicabilidade e as considerações indicadas na utilização de modelos de estimativas de perdas em inundações causadas por rupturas de barragens de rejeitos e apresenta potenciais estudos futuros por meio das lacunas obtidas após a realização do trabalho.

2 OBJETIVOS

2.1 *Objetivo geral*

O objetivo geral deste trabalho é analisar a aplicabilidade de dois modelos de estimativas de perdas de vidas, RCEM e HEC-LifeSim, para determinação de fatalidades diretas causadas por inundações provenientes de rupturas de barragens de rejeitos por meio de modelagem e análise de casos já ocorridos.

2.2 *Objetivos específicos*

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- construir cenários de propagação da onda de inundação de rejeitos para determinação das regiões afetadas e dos parâmetros hidráulicos dos eventos analisados;
- realizar a análise de vulnerabilidade e exposição por meio de dados censitários para caracterizar as construções e populações em risco nas regiões afetadas pelas inundações estudadas; e
- compreender a sensibilidade das etapas de emissão do alerta, difusão do alerta e mobilização presentes no processo de evacuação na estimativa de perdas de vidas do HEC-LifeSim.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Ruptura de barragens de rejeitos

3.1.1 Características e vulnerabilidade de barragens de rejeitos

A demanda por produtos das indústrias de mineração é cada vez maior. Com isso, a extração de recursos minerais resulta na produção simultânea de um volume significativo de material residual, incluindo rejeitos, que frequentemente contêm contaminantes potencialmente perigosos. A prática aceita para destinação desses rejeitos é o armazenamento em represas isoladas sob água para evitar alterações físicas e químicas dos rejeitos e para impedi-los de extravasarem em caminhos de águas subterrâneas, rios, lagos. No entanto, essas barragens possuem uma probabilidade de rompimento, o que causa uma descarga de enorme quantidade desse material em bacias fluviais. Esses acidentes representam uma séria ameaça à saúde animal e humana e são motivo de preocupação para as indústrias mineração e a comunidade em geral (KOSSOFF *et al.*; 2014).

Geralmente, as barragens de rejeitos são construídas a partir de materiais locais e pelo próprio rejeito. Ao invés da construção inicial considerar a capacidade total, estruturas intermediárias são erguidas e ampliadas à medida que a demanda por armazenamento aumenta. Essas estruturas intermediárias podem ser alteadas a montante, vertical (linha central) ou a jusante (Figura 3.1) (KOSSOFF *et al.*, 2014).

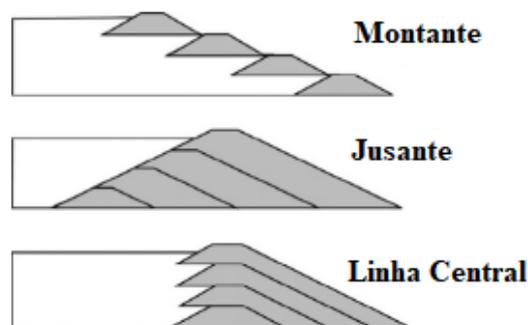


Figura 3.1: Métodos construtivos aplicados em barragens de rejeitos

Fonte: Adaptado de Kossoff *et al.*, 2014.

O alteamento a montante é obtido pela colocação do novo material dentro do reservatório existente; o alteamento jusante descreve a elevação da barragem, alocando o novo material fora da estrutura; enquanto o alteamento da linha central é realizado colocando o novo material

diretamente sobre a estrutura existente. Entre os três métodos descritos, o alteamento a montante é o de menor custo, logo, é o mais aplicado, por necessitar de menor quantidade de material para construção (KOSSOFF *et al.*, 2014).

Estruturas que possuem essa finalidade apresentam maior fragilidade em comparação à barragens destinadas à acumulação de água por: possuir, em grande maioria, essa elevação em múltiplos estágios da barragem para lidar com o aumento de material armazenado; faltar regulamentação sobre critérios específicos para construção; faltar monitoramento e controle contínuos para verificação de estabilidade; e possuir alto custo de trabalho de remediação após o encerramento das atividades de mineração (RICO *et al.*, 2008).

A frequência de acidentes dessas estruturas pode estar relacionada ao período denominado super-ciclo, o qual é caracterizado pelo aumento de preço de *commodities* por vários anos sucessivos (BOWKER & CHAMBERS, 2017). Esse aumento de preço resulta em um aumento da produção das empresas mineração, que muitas das vezes ocasiona projetos e construções inadequadas de barragens de rejeitos (MARSHALL, 2018).

De 1910 a 2010, foram relatados acidentes em 1,2% da totalidade de 18.401 empreendimentos existentes mundialmente (AZAM & LI, 2010). Tal taxa é superior em duas ordens de grandeza em comparação ao valor de 0,01% relatado para barragens convencionais (ICOLD, 2001). Azam & Li (2010) observaram que o pico, com cerca de 50 eventos de ruptura por década, ocorreu entre 1960 e 1990, com queda para cerca de 20 eventos por década entre 1990 e 2010 (Figura 3.2).

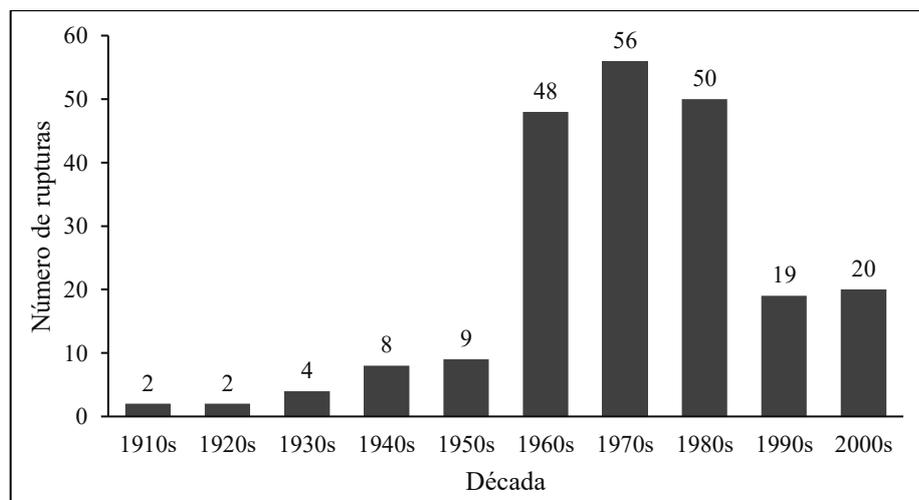


Figura 3.2: Eventos de rupturas de barragens de rejeitos de mineração ao longo do tempo

Fonte: Adaptado de AZAM & LI, 2010.

Azam & Li (2010) ainda relataram que a maior incidência desses acidentes alterou recentemente do ponto de vista geográfico, de países desenvolvidos para países em desenvolvimento. As principais razões para os rompimentos nas barragens são eventos extremos de chuva e mau gerenciamento. As rupturas ocorreram predominantemente em barragens de tamanho pequeno a médio com até 30 metros de altura e com volume máximo de rejeitos de cinco milhões de metros cúbicos. Os autores ainda observaram que a poluição ambiental e danos à infraestrutura podem ser gerenciados em acidentes considerados intermediários, que as perdas de vidas e os problemas de saúde estão associados a grandes casos catastróficos e que tais acidentes podem ser minimizados empregando padrões adequados de engenharia e evitando a técnica de construção de alteamento a montante.

Para a década de 2010, o número de acidentes foi maior comparado às duas últimas décadas. Foram registrados 31 eventos, os quais são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Eventos de rupturas de barragens de rejeitos de mineração na década de 2010

Ano	Local	Ano	Local
2011	Bloom Lake, Canadá	2016	Antamok, Filipinas
2011	Mianyang, China	2016	Satemu, Mianmar
2012	Padcal, Filipinas	2017	Tonglvshan, China
2012	Sotkamo, Finlândia	2017	Mishor Rotem, Israel
2012	Gullbridge, Canadá	2017	Kokoya Gold, Libéria
2013	Obed Mountain, Canadá	2018	Barcarená, Brasil
2013	Kajaran, Armênia	2018	Huancapatí, Peru
2014	Dan River, Estados Unidos	2018	Cadia, Austrália
2014	Mount Polley, Canadá	2018	Cieneguita, México
2014	Buenavista, México	2019	Córrego de Feijão, Brasil
2014	Herculano, Brasil	2019	Machadinho d'Oeste, Brasil
2015	Fundão, Brasil	2019	Muri, Índia
2015	San Kat Kuu, Mianmar	2019	Hpakant, Mianmar
2015	Lamaungkone, Mianmar	2019	Cobriza, Peru
2016	Dahegou, China	2019	Nossa Senhora do Livramento, Brasil
2016	New Wales, Estados Unidos		

Fonte: Adaptado de WISE, 2020.

3.1.2 Abordagens para estudo da propagação da onda de rejeitos

As análises de ruptura de barragens de rejeitos são requeridas para auxílio no processo de avaliação de risco. Porém, as diretrizes existentes foram originalmente desenvolvidas para estruturas destinadas ao armazenamento de água, as quais a ruptura resulta na descarga de todo o volume de água represada acima da brecha de ruptura e a vazão tem um conteúdo de sólidos relativamente baixo. Em contraste, uma ruptura de uma barragem de rejeitos muitas vezes resulta na descarga de todo o volume do tanque de sobrenadante, mas não resulta consistentemente na descarga total do volume de rejeitos acumulado. No entanto, o fluxo de saída tem uma alta concentração volumétrica de sólidos devido à mobilização de rejeitos armazenados (MARTIN & AKKERMAN, 2017).

Esse mecanismo de descarga em rupturas de barragens de rejeitos ocorre em duas etapas subsequentes. A primeira etapa é definida como onda inicial de inundação (Figura 3.3), em que a água livre dentro da lagoa do sobrenadante da barragem descarrega e mobiliza os rejeitos do barramento e dos materiais de construção da estrutura. A onda de inundação se propaga a jusante, causando erosão significativa e inundando o ambiente a jusante. As extensões da inundação são impulsionadas pelo tamanho do represamento, pela taxa de desenvolvimento de ruptura, pela vazão de pico e pela topografia a jusante, com consequências potencialmente se estendendo por dezenas ou centenas de quilômetros a jusante (MARTIN *et al.*, 2015).



Figura 3.3: Erosão e inundação causada pela onda inicial de inundação em Mount Polley (Canadá) – 2015

Fonte: Martin *et al.*, 2015.

A segunda é nomeada fluxo de rejeitos liquefeitos (Figura 3.4), em que uma porção da massa de rejeitos passa por liquefação estática resultante da perda de confinamento e do aumento de

inclinação local das encostas criadas pela vazão inicial. Os rejeitos que não são mobilizados na onda de inundação inicial podem escoar através da ruptura em uma forma de pasta até que a massa de rejeitos se estabilize a jusante. A extensão da inundação do fluxo de rejeitos liquefeitos é consideravelmente menor comparada à onda de inundação inicial (MARTIN *et al.*, 2015).



Figura 3.4: Cone de depressão de rejeitos liquefeitos causado pela ruptura da barragem de Kolontár (Hungria) – 2010

Fonte: Martin *et al.*, 2015.

A onda inicial de inundação é a etapa do mecanismo de descarga que possui foco principal da maioria das análises de rupturas de barragens e estudos de inundação por representar o maior risco para a segurança da população e por ter o maior potencial de causar danos físicos ao ambiente a jusante. Geralmente, essa etapa é modelada como água, ou como um fluido aquoso, que é uma suposição simplificadora que resulta em velocidades de escoamento e vazões altas, e alcance das inundações mais longos (MARTIN *et al.*, 2015).

A seguir é apresentado o modelo mais utilizado atualmente para propagação da onda de cheia adotando o fluxo aquoso, HEC-RAS com escoamento bidimensional (2D); e são detalhadas considerações sobre a resistência do fluxo de rejeitos.

3.1.2.1 Modelo HEC-RAS 2D

A simulação bidimensional da propagação da onda de cheia no modelo HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center's River Analysis System*) ocorre pela solução das equações de conservação de massa (Equação 3.1) e conservação de momento (Equações 3.2 e 3.3) de *Saint-Venant* (USACE, 2016b).

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial x} + q = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_t v + f v \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_t v + f u \quad (3.3)$$

na qual: H é o nível da superfície de água; t é o tempo; h é a profundidade da água; u e v são as componentes da velocidade na direção x e y , respectivamente; q é um termo de fluxo; g é a aceleração gravitacional; v_t é coeficiente de viscosidade turbulento; c_t é o coeficiente de atrito do fundo do canal/planície de inundação; e f é o parâmetro de Coriolis.

A equação de conservação de massa é aplicável considerando o fluxo incompressível. O lado esquerdo da equação de conservação do momento contém os termos relacionados à aceleração e o lado direito representa as forças internas ou externas que atuam no fluido (USACE, 2016b).

Para solução das equações, o canal e a planície de inundação devem ser subdivididos em células não sobrepostas para formar uma grade. Essa grade pode ser estruturada por células de qualquer formato com no máximo oito faces. Essas células podem ser ortogonais ou não; no entanto, se a ortogonalidade existe em toda ou parte da grade, a solução do método numérico aplicado apresenta vantagem em relação à velocidade computacional (USACE, 2016b).

Um esquema de discretização híbrida que combina diferenças finitas e volumes finitos é usado para soluções das Equações 3.1, 3.2 e 3.3. Quando há a ortogonalidade entre duas células, como visto no esquema a) da Figura 3.5, o método numérico de diferenças finitas é suficiente para solução e determinação da superfície de água nas células. Quando as células não são ortogonais, como visto no esquema b) da Figura 3.5 com direção n diferente da direção n' , a solução ocorre por meio da mescla de diferenças finitas e volumes finitos (USACE, 2016b).

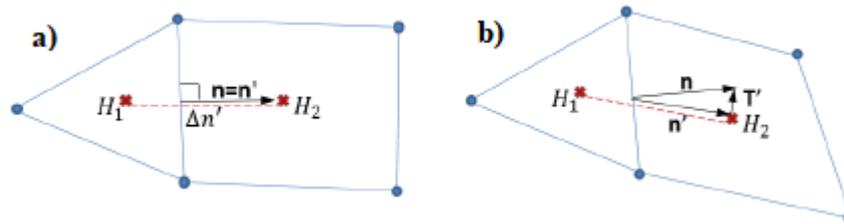


Figura 3.5: Direções das células da grade: a) ortogonal, b) não ortogonal

Fonte: USACE, 2016b.

O modelo HEC-RAS 2D permite a simplificação nas equações de conservação de momento possibilitando vantagens ao diminuir o tempo computacional. A simplificação resulta na equação nomeada onda difusiva, cuja forma vetorial é apresentada na equação a seguir (USACE, 2016b):

$$V = \frac{-(RH)^{2/3}}{n} \frac{\nabla H}{|\nabla H|^{1/2}} \quad (3.4)$$

na qual: V é a velocidade vetorial; RH é o raio hidráulico; e ∇H é o gradiente de elevação da superfície da água.

O intervalo computacional utilizado para solução das equações de *Saint-Venant*, visando o alcance da estabilidade do modelo, é baseado na condição de *Courant*, que é apresentada a seguir (USACE, 2016b):

$$C = \frac{V_o \Delta T}{\Delta X} < 1,0 \quad \text{ou} \quad \Delta T \leq \frac{\Delta X}{V_o} \quad (\text{com } C = 1,0) \quad (3.5)$$

na qual: C é o número de *Courant*; V_o é a velocidade da onda de inundação ($[L]/s$); ΔT é o intervalo computacional (s); e ΔX é a dimensão média da célula ($[L]$).

3.1.2.2 Resistência do fluxo de rejeitos

Os fluidos que geram os escoamentos aquosos são classificados como fluidos newtonianos, os quais apresentam uma relação linear entre a taxa de cisalhamento (σ) e a tensão de cisalhamento ($\dot{\gamma}$), obedecendo a teoria de Newton (Equação 3.6) com a viscosidade (η) constante com a variação na taxa de cisalhamento (FERREIRA *et al.*, 2005).

$$\eta = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} \quad (3.6)$$

De acordo com o modelo proposto por Newton, a força requerida por unidade de área (F/A) para manter uma diferença de velocidade (dv/dy) entre duas placas paralelas e separadas por uma distância (Y) (Figura 3.6) é diretamente proporcional ao gradiente de velocidade através do líquido (FERREIRA *et al.*, 2005).

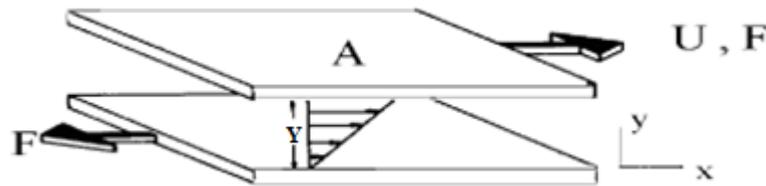


Figura 3.6: Modelo de placas paralelas utilizado por Newton para explicar a viscosidade de um líquido

Fonte: Barnes *et al.*, 1989.

Desse modo, o coeficiente de proporcionalidade é igual à viscosidade. A força por unidade de área é conhecida como tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade é conhecido como taxa de cisalhamento (FERREIRA *et al.*, 2005), relacionadas pela equação a seguir:

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dy} \quad (3.7)$$

Escoamentos com alta concentração volumétrica de sólidos, como em situações de fluxos de rejeitos, não são definidos como aquosos. O'Brien & Julien (1985) sugerem uma classificação dos escoamentos em função dessa concentração volumétrica de sólidos. Escoamentos aquosos são aqueles com concentração volumétrica sólidos abaixo de 20%. A enchente de lama (*Mudflood*) possui propriedade diferente do escoamento aquoso, com uma maior viscosidade e densidade, variando sua concentração volumétrica entre 20% e 45%. O fluxo de lama (*Mudflow*) é de alta viscosidade, que resulta em baixas velocidades, sendo a sua concentração volumétrica definida pelo intervalo de 45% e 55%. Por fim, ainda é definido o escorregamento, com concentração volumétrica de sólidos entre 55% e 80%, onde não há escoamento ou há deformações internas e movimento lento devido às tensões.

Esses escoamentos com concentração volumétrica acima de 20% ocorrem em fluidos classificados como não-newtonianos, que são aqueles onde não há essa relação linear entre a

tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento. Sendo assim, há uma variação da viscosidade com a variação na taxa de cisalhamento (FERREIRA *et al.*, 2005).

Segundo Ferreira *et al.* (2005), quando há diminuição no valor da viscosidade com aumento da taxa de cisalhamento, o fluido possui comportamento pseudoplástico. Já quando é observado o aumento da viscosidade com aumento da taxa de cisalhamento, o comportamento é caracterizado como dilatante.

Há ainda outras tipologias de fluidos não-newtonianos classificados como plástico de *Bingham*. Esse tipo de fluido necessita de uma tensão finita, conhecida como tensão de escoamento, para que haja movimento (FERREIRA *et al.*, 2005). Ou seja, o material se comporta como sólido até que a tensão mínima de escoamento seja excedida, iniciando assim o movimento. A partir desse início de movimento, a relação é linear entre a tensão e a taxa de cisalhamento, na qual o escoamento apresenta comportamento semelhante ao fluido newtoniano (MACHADO, 2017).

A Figura 3.7 apresenta os tipos de fluidos citados com suas respectivas características em relação à alteração da taxa de cisalhamento.

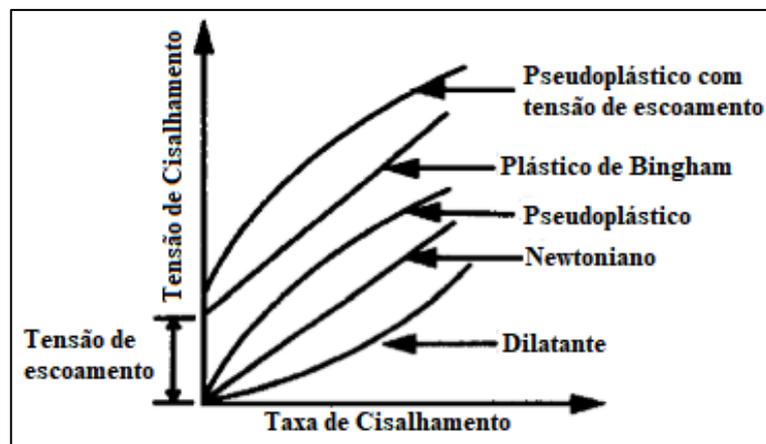


Figura 3.7: Curvas reológicas generalizadas para os tipos de fluidos citados

Fonte: Adaptado de Kawatra & Bakshi, 1996.

Como visto, a água altamente carregada de sedimentos é um fluido não-newtoniano, mas a modelagem desse tipo de fluido, requer conhecimento da reologia (viscosidade e tensão de escoamento), que, na maioria das vezes, é impraticável de se conhecer (STRAUSS *et al.*, 2016).

Existem abordagens simplificadores para modelagem desses fluidos não-newtonianos. Uma das primeiras abordagens foi proposta por Lucia (1981), que, por meio de 14 casos de ruptura em

barragens de rejeitos, elaborou um modelo para previsão do alcance da inundação de rejeitos, baseado na lei de equilíbrio estático, sendo as forças em duas dimensões, conceituando-se um modelo essencialmente geotécnico.

Jeyapalan *et al.* (1983a) afirmam que os rejeitos se comportam como fluido do tipo *Bingham-Plástico* apresentando viscosidade plástica e resistência ao cisalhamento. Os autores apresentaram um modelo com equações e gráficos para determinação das configurações de fluxo, velocidade e distância de uma inundação proveniente de uma ruptura de barragem de rejeitos. Por fim, os autores, utilizando um exemplo de uma barragem para diferentes tipologias de vales prismáticos, resolveram as equações do modelo pelo programa TFLOW. Tal modelo foi verificado por Jeyapalan *et al.* (1983b) por meio de análises de laboratório e de retroanálises de rupturas de barragens de rejeitos. Em ambos os casos, os resultados do modelo foram considerados satisfatórios comparados aos das análises.

Rico *et al.* (2008), com base em 28 casos históricos de ruptura de barragens de rejeitos, desenvolveram equações empíricas correlacionando os parâmetros volume de rejeitos derramado e volume total da barragem, com um coeficiente de determinação de 0,86, e os parâmetros volume de rejeitos derramado e a distância percorrida pelos rejeitos, com um coeficiente de determinação de 0,57. Os autores atentam que as equações de regressão descritas para fins de previsão precisam ser tratadas com cautela e com o apoio de medições e observações no local, face às grandes incertezas contidas e considerando os altos erros padrão dessas.

Concha Larrauri & Lall (2018), por meio de um conjunto de 35 casos de rupturas de barragens de rejeito, atualizaram as equações de regressão de Rico *et al.* (2008) e caracterizaram a incerteza associada à previsão. Os autores enfatizam que essas equações de regressão empíricas possuem incertezas significativas, destacando que essas incertezas devem ser consideradas nas estimativas para derivar uma medida probabilística do risco.

Há também técnicas para modelar a resistência do fluxo de rejeitos. Jin & Fread (1999) desenvolveram três técnicas para modelar o comportamento especial de resistência dos fluxos de detritos: a técnica viscoplástica, a técnica de deslizamento granular e a técnica de coeficiente de resistência combinada (*pseudo Manning*). As técnicas foram aplicadas em quatro casos de retroanálise e os autores concluíram que todas apresentaram desempenho satisfatório, sendo que

a técnica de coeficiente de resistência combinada foi determinada como a mais robusta com a sua aplicação sendo indicada quando não for possível obter dados necessários para aplicações das outras técnicas.

A modelagem da onda de rejeitos ainda pode ser realizada por modelos capazes de simular o fluxo não-Newtoniano. O *United States Society on Dams* (USSD) indica os modelos usualmente utilizados para análise de ruptura de barragens considerando a tipologia do fluxo. Para fluxo newtoniano, são indicados os modelos HEC-RAS, HEC-HMS, MIKE e SMPDBK; já para fluxo não-newtoniano, são citados os modelos RiverFlow2D, DAMBRK, DAM-W, FLO-2D e FLDWAV. A escolha do modelo adequado para executar a simulação deve ser baseada no problema específico a ser modelado e nas informações de entrada disponíveis (USSD, 2013).

Dentre as opções para modelagem da resistência de fluido não-newtoniano existentes, alguns trabalhos analisaram a aplicabilidade dessas. Bernerdo *et al.* (2011) compararam, para uma mesma estrutura de armazenamento de rejeitos, uma modelagem de ruptura hipotética adotando o fluido como água e uma considerando o fluido como não-newtoniano. Os valores de vazão de pico e profundidade para o caso de fluxo Newtoniano excederam no máximo de 5% e 15%, respectivamente, em comparação para o caso considerando fluido como não-newtoniano. Os autores concluíram que as características de fluxo de rejeitos são semelhantes às da água para o estudo de caso, devido à inclinação acentuada do canal e à grande profundidade de fluxo que poderia ocorrer por intermédio de uma potencial ruptura da barragem.

Travis *et al.* (2012) afirmaram que o problema mais significativo com a reologia de fluxo volumoso é que essa abordagem possivelmente esteja errada. Os autores apresentaram trabalhos que discutem e argumentam que os fluxos reais de rejeitos são governados por características de fluxo e atrito, em vez de sua reologia, já que existem maneiras que a reologia é inconsistente com fluxos de rejeitos observados, na qual uma revisão completa desse debate é apresentada por Ancey (2007). Os autores ainda citaram que, mesmo sendo codificadas as propriedades físicas da água e, portanto, não podendo ser reconfiguradas para explicar diretamente as diferentes propriedades dos fluxos rejeitos, o HEC-RAS parece ser apropriado para a modelagem de fluxos da tipologia se os coeficientes de expansão e contração e de *Manning* forem modificados pelas relações recomendadas pelos próprios autores conforme as equações a seguir:

$$c_{fluxo-rejeitos} = (v_{aquoso}/v_{fluxo-rejeitos})^{2/3} c_{aquoso} \quad (3.8)$$

$$n_{fluxo-rejeitos} = (v_{fluxo-rejeitos}/v_{aquoso})^{1/9} n_{aquoso} \quad (3.9)$$

na qual: $c_{fluxo-rejeitos}$ é o coeficiente de contração ou expansão do fluxo de rejeitos; c_{aquoso} é o coeficiente de contração ou expansão do fluxo aquoso; v_{aquoso} é a viscosidade cinemática da água limpa ($[L^2]/[t]$); $v_{fluxo-rejeitos}$ é a viscosidade cinemática do fluido composto por rejeitos ($[L^2]/[t]$); $n_{fluxo-rejeitos}$ é o coeficiente de rugosidade de *Manning* adotado para o fluxo de rejeitos; e n_{aquoso} é o coeficiente de rugosidade de *Manning* adotado para o fluxo aquoso.

Melo (2013) aplicou os modelos de *Saint-Venant*, *Puls* modificado, Lucia (1981) e Jeyapalan *et al.* (1983a) para análise de ruptura hipotética da barragem de rejeitos Tico-Tico - MG. O autor concluiu que o modelo *Saint-Venant* incorporado ao programa HEC-RAS é a melhor ferramenta para prognóstico de inundações em barragens de rejeitos.

Melo (2013) ainda verificou que o modelo *Puls* Modificado, apenas quando a extensão da inundação é demandada, pode ser utilizado, desde que respeitadas as semelhanças com a área e a escala desse estudo de caso. As abordagens simplificadas de Lucia (1981) e Jeyapalan *et al.* (1983a), além de apresentarem somente o perfil da inundação, desconsideram a superfície do terreno, resultando em volumes do estado de equilíbrio frequentemente maiores do que os volumes liberados pelo reservatório. Sendo assim, esses dois últimos modelos não apresentaram resultados coerentes com a realidade e não foram recomendadas pelo autor para essa tipologia de estudo.

Rocha (2015) realizou um estudo de retroanálise da barragem de rejeitos de São Francisco – Mirai - MG utilizando os modelos HEC-RAS e FLO-2D com intuito de comparação entre a modelagem unidimensional e bidimensional. Foi observado um melhor ajuste do HEC-RAS na zona rural e do FLO-2D em zonas urbanas. Tal resultado do HEC-RAS se justifica pelo fato de a zona rural possuir um vale encaixado com tipologia de escoamento unidimensional. O autor destaca que houve diversos problemas devido à baixa resolução espacial do modelo digital de elevação; por isso, é recomendado o uso do FLO-2D somente em casos de dados de topografia de alta precisão.

Machado (2017) realizou a retroanálise da ruptura da barragem de rejeitos do Fundão – Mariana – MG comparando os modelos HEC-RAS e FLO-2D, com intuito de avaliar a influência de escoamento uni e bidimensionais e o tipo de fluido (aquoso ou hiperconcentrado) na modelagem hidráulica. Foi observada uma menor área de inundação do fluido aquoso comparado ao hiperconcentrado e uma maior área de inundação do escoamento bidimensional em comparação ao unidimensional. Por fim, a autora afirmou que, de maneira geral, observa-se que os valores de falsos positivos (refere-se a mancha que foi simulada, mas não foi observada no real) são maiores em percentual do que os falsos negativos (refere-se à locais nos quais foram observadas inundações, entretanto o modelo não acusou), ou seja, a partir dos diferentes programas e cenários, seriam geradas manchas que mais superestimam a inundação do que subestimam, considerando todas as premissas adotadas, não sendo possível a generalização para todas as simulações de ondas de rejeitos.

Por fim, os erros associados à suposição de que o fluido de rejeito liberado escoar como newtoniano estão bem dentro da precisão da modelagem, considerando a incerteza inerente a todas as suposições e simplificações exigidas no processo de modelagem. Além disso, potencialmente, pode haver pouco a ser ganho utilizando um método não-newtoniano. No entanto, ainda são necessárias mais pesquisas nessa área (MARTIN *et al.*, 2015).

3.2 Modelos de estimativa de perdas de vidas

3.2.1 Generalidades

A avaliação de risco de inundações por uma abordagem prospectiva se apresenta como uma ferramenta necessária para o gerenciamento de risco e auxílio na tomada de decisões por permitir a avaliação da vulnerabilidade, o mapeamento de risco, a otimização de decisão para medidas de mitigação, a análise de risco comparativa e as avaliações financeiras para o setor de seguros e durante e imediatamente após a inundação (MERZ *et al.*, 2010).

Nas ciências físicas e engenharia, o risco é definido como um produto entre a probabilidade de ocorrência de um evento e suas respectivas consequências. A quantificação desse risco constitui a base para a avaliação de risco e tomada de decisões. Por meio dessa quantificação, podem ser produzidas as chamadas curvas de risco (Figura 3.8), as quais exibem a probabilidade de excedência de uma consequência (JONKMAN, 2007).

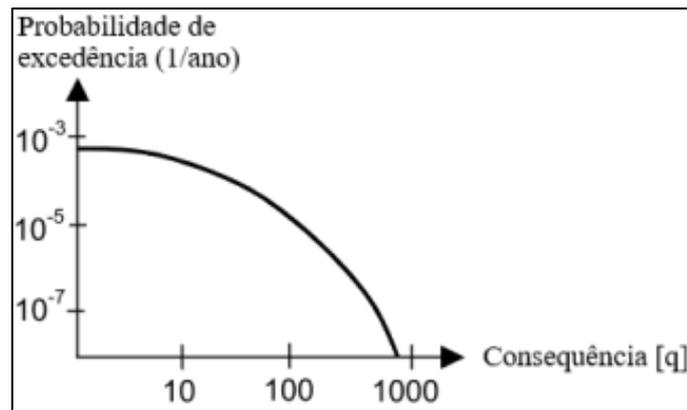


Figura 3.8: Curva de quantificação do risco

Fonte: Adaptado de Jonkman, 2007.

A partir da análise dessas curvas, o processo de avaliação de risco pode resultar nas seguintes decisões: evitar o risco de não prosseguir com o sistema ou adotar outras tecnologias; reduzir o risco com diminuição das probabilidades, efeitos físicos ou consequências; e aceitar o risco, optando pela transferência desse por meio de seguros ou outros mecanismos financeiros (JONKMAN, 2007).

Para inundações, o cenário observado é caracterizado como de pequenas probabilidades e grandes consequências, no qual é recomendável a combinação de diversas consequências em um indicador de severidade por meio da teoria da utilidade multi-atributo. Entretanto, no contexto das avaliações de risco, uma abordagem mais simples é frequentemente adotada, na qual o risco é quantificado em um número ou gráfico unidimensional, implicando que apenas uma das categorias de consequências seja considerada (JONKMAN, 2007).

Essas consequências podem ser classificadas em danos diretos e indiretos. Danos diretos são aqueles que ocorrem devido ao contato físico da água com pessoas, propriedades ou quaisquer outros objetos. Os danos indiretos são caracterizados pelos impactos diretos e ocorrem no espaço ou no tempo diferente do evento de inundação. Ambos os tipos de danos ainda podem ser classificados em tangíveis e intangíveis, os quais representam danos que podem ser facilmente especificados em termos monetários e aqueles de difícil atribuição monetária por não possuir valor no mercado (MERZ *et al.*, 2010).

Geralmente, as consequências são quantificadas em termos de perdas de vidas e/ou danos econômicos por possuírem vantagem de serem quantificáveis de uma maneira objetiva (ou seja,

fatalidades ou valor monetário) e por serem mais relevantes e importantes na percepção pública de desastres (JONKMAN *et al.*, 2003).

Para perdas de vidas, existem métodos baseados em avaliação comportamental e em indicadores macroeconômicos para valoração dessa consequência (JONKMAN, 2007). Porém, essa especificação monetária de perda de vida é considerada complexa, vista a característica intangível dessa tipologia de dano (MERZ *et al.*, 2010). Além disso, as fatalidades também podem ocorrer indiretamente devido à inundação. Essas fatalidades são observadas fora dos limites das áreas inundadas, como, por exemplo, mortes por acidentes de trânsito durante a evacuação e devido ao stress pós-inundação. Porém, como a maioria das fatalidades ocorre por motivo de causas diretas, e como esse tipo comportamento é de difícil previsão, a perda de vida é classificada somente como dano direto. Por isso, as fatalidades são tratadas no processo de avaliação de risco de forma direta e quantitativa, sem atribuição monetária (JONKMAN, 2007).

A quantificação de perdas de vidas diretas de maneira prospectiva ocorre por meio de três principais fatores. Primeiramente, considera-se o número de pessoas potencialmente em risco. Em segundo, a eficácia da evacuação e as estratégias de abrigo para determinar o número de pessoas que serão expostas ao evento. E, por último, é considerada a estimativa da taxa de fatalidade, que é a razão entre o número pessoas que não sobrevivem e o número de pessoas que são expostas à inundação (JONKMAN, 2007). Esses três parâmetros combinados permitem apresentar a seguinte relação:

$$N = F_D(1 - F_E)N_{PAR} \quad (3.10)$$

na qual: N é a estimativa de perdas de vidas; F_D é a taxa de fatalidade; F_E é a taxa de evacuação; e N_{PAR} é o número de pessoas em risco, potencialmente afetadas.

Existem diversos modelos para estimativa de perdas de vidas, os quais podem ser classificados de duas maneiras. Os modelos empíricos que são aqueles que, baseados na análise de casos históricos, desenvolvem relações entre as características do evento e a taxa de mortalidade da população em risco. E os modelos dinâmicos ou baseados em agentes (*agent based*), que são aqueles que, por intermédio de uma quantificação variada no tempo das características do evento correlacionada com critérios e limites de exposição a inundações, fornecem uma simulação mais detalhada do evento, possibilitando modelar o comportamento individual e a causa da fatalidade.

O modelo baseado em agentes é um sistema modelado como uma agregação de entidades autônomas de tomada de decisão nomeadas de agentes. Cada agente avalia individualmente a situação e toma a decisão com base em um conjunto de regras. Essa tipologia de modelo permite a descrição natural do sistema complexo composto por entidades comportamentais por meio de equacionamento. Entre as áreas de aplicação estão: fluxos, mercados, organizações e difusão (BONABEAU, 2002).

Para estimativa de fatalidades em inundações, a área enquadrada é a de fluxo, a qual analisa comportamento de evacuação e tráfego. A modelagem baseada em agentes fornece dados importantes em situações de pânico, possibilitando a obtenção de meios de minimizar as consequências nocivas desses eventos (BONABEAU, 2002). Um exemplo de aplicação é apresentado por Helbing *et al.* (2000). Os autores avaliaram o comportamento de 200 indivíduos em uma situação de fuga em uma sala confinada com uma saída. A modelagem baseada em agentes, com base em experimentos reais, indicou que a locação de um pilar na saída da sala otimiza o fluxo, causando o menor número de indivíduos feridos. A Figura 3.9 sintetiza o estudo com as pessoas indicadas em círculos, os quais os verdes indicam os feridos.

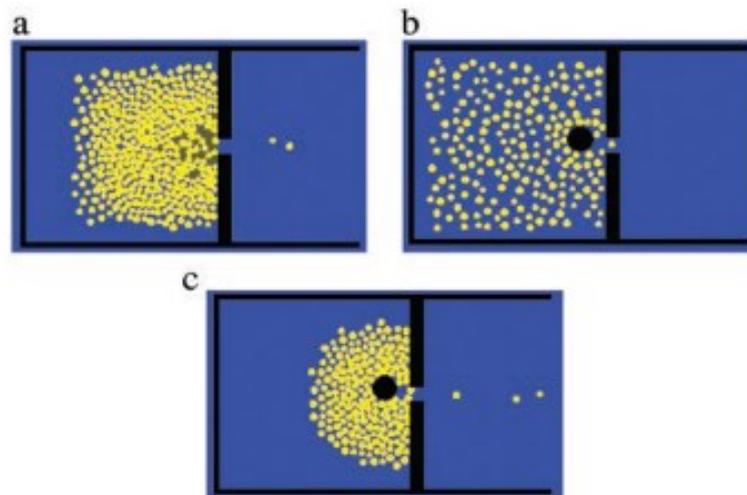


Figura 3.9: Evacuação simulada por modelo baseado em agentes: a) sem pilar; b) com pilar após 10 segundos; e c) com pilar após 20 segundos.

Fonte: Bonabeau, 2002.

Os modelos dinâmicos são mais recomendados para aplicação em estimativa de perdas de vidas, dadas as seguintes limitações dos modelos empíricos apresentadas por Aboelata *et al.* (2002):

- muitos fatores que alteram com o tipo de ruptura da barragem ou o evento de inundação natural não são distinguidos separadamente;

- os parâmetros, como os tempos de viagem, profundidades e velocidades que afetam o destino de pessoas, veículos e estruturas são baseados em macro escala;
- a população exposta ao risco é considerada para toda a área de inundação ou para grandes sub-regiões, o que não distingue muitos atributos que são importantes determinantes das perdas de vidas;
- o tempo de alerta é considerado como uma única variável na evacuação, sem considerar a cadeia de eventos que deve ocorrer antes que uma mensagem possa ser divulgada; e
- a evacuação não é considerada como um processo separado e os benefícios da transferência para abrigos mais seguros da população que não evacua não estão incluídos explicitamente.

Atualmente, a aplicação desses modelos baseados em agentes tem aumentado, porém ainda está limitada devido à grande quantidade e qualidade de dados requeridas para execução do modelo (LANG, 2018).

Jonkman *et al.* (2016) apresentam os seguintes desafios a serem explorados na área de estimativa de perdas de vidas: a falta de dados para a calibração, as limitações de informações empíricas sobre estabilidade em inundações, a melhoria na estimativa da eficácia da evacuação, a falta de estudos que realizem a comparação entre modelos de estimativa de perdas de vida para casos já ocorridos e as incertezas presentes nos modelos de evacuação.

3.2.2 Modelos de estimativa de perdas de vidas existentes na literatura

Com base nos parâmetros genéricos e nas premissas apresentadas na seção 3.2.1, diversos modelos foram desenvolvidos durante as últimas décadas para diferentes tipos de inundações relacionando a mortalidade em uma área alagada às características do evento e possibilidades de alerta e evacuação. A seguir uma lista de modelos é apresentada para inundações costeiras ou ribeirinhas e para inundações causadas por ruptura de barragens.

3.2.2.1 Inundações ribeirinhas e costeiras

Para inundações costeiras e ribeirinhas, um dos primeiros estudos foi desenvolvido por Friedman (1975), no qual se correlacionou o número de fatalidades em uma área inundada ao

número de residências danificadas nessa mesma área. A análise empírica foi baseada nos registros anuais de enchentes coletados pela Cruz Vermelha Americana. Friedman (1975) sugeriu uma taxa de fatalidade na proporção uma a cada 170 habitações danificadas para inundações normais e de uma a cada 85 habitações para inundações repentinas.

Waarts (1992) coletaram dados de relatórios oficiais sobre fatalidades ocorridas devido a uma tempestade no Mar do Norte em 1953, que resultou em inundações na Holanda, no Reino Unido e na Bélgica, e causou um total de 1.835 mortes. A partir dos dados coletados, Waarts (1992) propôs a seguinte equação empírica relacionando o nível d'água observado com a taxa de fatalidade.

$$F_D = 0,665 \cdot 10^{-3} e^{1,16h} \quad F_D \leq 1 \quad (3.11)$$

na qual: h é a profundidade da água (m).

Waarts (1992) ainda propôs um modelo mais refinado considerando o colapso de estruturas, a velocidade do escoamento e a eficiência da evacuação, no entanto, o modelo não é aplicado pelo fato de diversos fatores inseridos não possuírem embasamento em dados históricos.

Vrouwenvelder & Steenhuis (1997), com auxílio de julgamento de especialistas, estenderam o modelo de Waarts (1992), propondo a Equação 3.12. Foram inseridas informações sobre: a taxa de fatalidade devido ao colapso de construções (F_B) obtida pela Equação 3.13; a taxa de residências destruídas próximas à brecha do dique devido às altas velocidades (F_R), presumindo-se que a área destruída se equivalha a uma superfície igual ao quadrado da largura da brecha; a taxa de mortalidade devido a outros fatores (F_O); e a taxa de evacuação da população (F_E).

$$N = (F_O + F_R P_B + F_B P_S)(1 - F_E) N_{PAR} \quad (3.12)$$

$$F_B = \alpha \cdot 10^{-3} h^{1,8} r \quad (3.13)$$

na qual: P_B é a probabilidade de falha de um dique próximo a uma área residencial, P_S é a probabilidade de um tipo de tempestade (1 para uma inundação costeira, 0,05 para uma inundação ribeirinha), α é um fator de material e r é o fator de abrigo definido por Vrouwenvelder & Steenhuis (1997).

Ainda baseado no modelo proposto por Waarts (1992), um relatório técnico encomendado pelo Ministério dos Transportes da Holanda (HKV, 2000) descreve um modelo empírico no qual é inserido o parâmetro referente à taxa de subida do nível da água (w) (m/h), sendo a taxa de fatalidade é determinada pelas equações apresentadas a seguir:

$$F_D = 0 \text{ para } h > 3m \text{ ou } w < 0,3m/h \quad (3.14)$$

$$F_D = \text{MÍN}(\text{MÁX}(8,5e^{0,6h-6} - 0,15; 0); \text{MÍN}(\text{MÁX}(8,5e^{1,2w-4,3} - 0,15; 0); 1)) \quad (3.15)$$

$$F_D = 1 \text{ para } h > 6,25m \text{ e } w > 2m/h \quad (3.16)$$

O modelo proposto apresenta contraste com os dados reais da cheia de 1953, dado que um terço das fatalidades ocorreu em regiões com profundidades inferiores a três metros. Para profundidades superiores a três metros e locais com taxas de subida do nível da água superiores a 2 m/h, o modelo se aproxima do proposto por Waarts (1992) apresentado na Equação 3.11. A Figura 3.10 apresenta graficamente o modelo proposto.

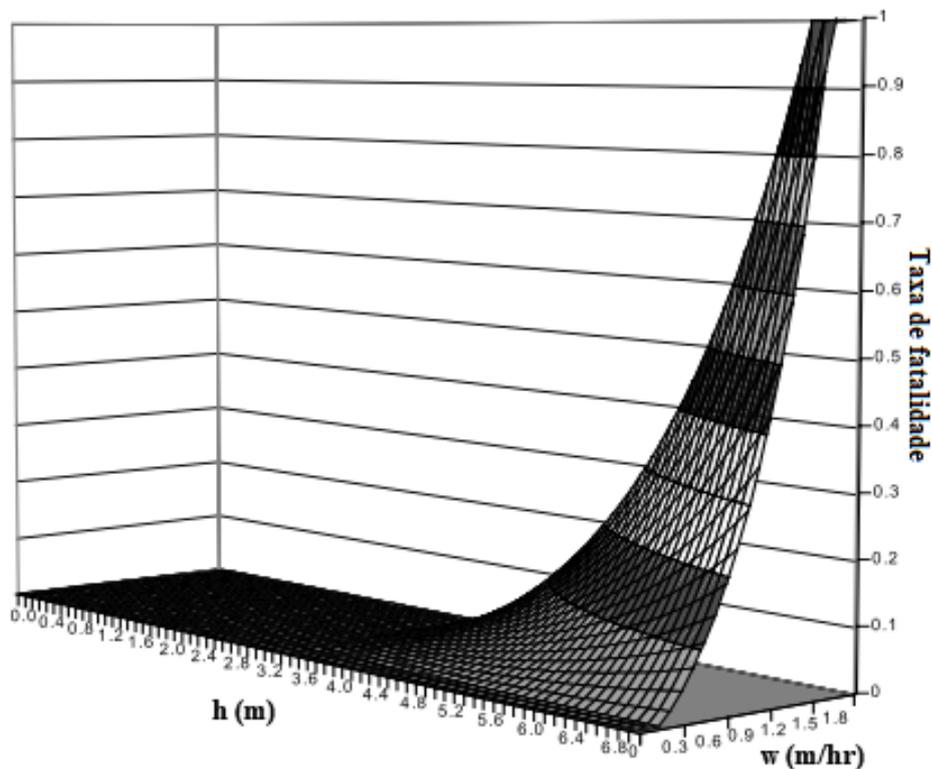


Figura 3.10: Taxa de fatalidade em função da profundidade e da taxa de subida do nível d'água considerada no modelo de HKV (2000)

Fonte: Adaptado de HKV, 2000.

Jonkman (2001) propôs um modelo empírico (Equação 3.17) baseado em probabilidades, no qual são considerados: a taxa de fatalidade por afogamento ($F_D(h)$) derivada de Waarts (1992) (Equação 3.11); o critério de estabilidade desenvolvido por Abt *et al.* (1989) para determinar uma probabilidade de taxa de fatalidade em função da velocidade do escoamento ($F_D(u)$) (Equação 3.18); e uma probabilidade de sucesso de evacuação ($F_E(T_A)$) (Equação 3.19) em função do tempo disponível para evacuação.

$$F_D(h, u, t) = (F_D(h) + F_D(u))(1 - F_E(t)) \quad 0 \leq F_D(h, u, t) \leq 1 \quad (3.17)$$

$$P_{d|i}(u) = P(u > u_{crt}|i) = \Phi_N\left(\frac{u-\mu}{\sigma}\right) \quad \mu = 1,8 \text{ m/s e } \sigma = 0,48 \text{ m/s} \quad (3.18)$$

$$P_{e|i}(t) = P(t > t_{crt}|i) = 1 - e^{-\frac{t}{20}} \quad (3.19)$$

na qual: u é a velocidade do fluxo (m/s); t é o tempo de evacuação disponível (h); $P_{d|i}(u)$ é a probabilidade de afogamento em função da velocidade de fluxo dada uma inundação i ; $P(u > u_{crt}|i)$ é a probabilidade da velocidade de fluxo ser superior à velocidade crítica dada uma inundação i ; Φ_N é a distribuição normal da variável x ; $P_{e|i}(t)$ é a probabilidade de sucesso na evacuação em função do tempo disponível para uma inundação i ; e $P(t > t_{crt}|i)$ é a probabilidade do tempo de evacuação ser maior que o tempo crítico dada uma inundação i .

Penning-Rowsell *et al.* (2005) apresentaram um modelo empírico nomeado *Flood Risk to People*. O modelo estima a quantidade de perdas de vidas em função da quantidade de feridos considerando os seguintes fatores: a classificação do evento (baseado indiretamente em critérios de estabilidade e efeitos de detritos); características da população; e características do local. A Equação 3.20 apresenta o modelo generalizado, cujos parâmetros utilizados são descritos nas Equações 3.21 e 3.22.

$$N = 2N(I) \frac{HR}{100} \quad (3.20)$$

$$N(I) = 2N_{PAR} \left(\frac{HR \times VA}{100} \right) \times VP \quad (3.21)$$

$$HR = h(v + 0.5) + DF \quad (3.22)$$

na qual: $N(I)$ é o número de feridos; HR é a classificação do evento; VA é a vulnerabilidade da área em função da efetividade do alerta e tipo de construções; VP é a vulnerabilidade da população em função do número de pessoas muito idosas (acima de 75 anos) e de doentes/deficientes; e DF é o fator de detritos (= 0; 0,5 ou 1 dependendo da probabilidade de detritos causarem riscos maiores).

O modelo foi aplicado em três casos ocorridos na Grã-Bretanha e resultados obtidos foram de acordo com o real observado.

Zhai *et al.* (2006) desenvolveram um modelo empírico (Equação 3.23) por meio de uma relação entre o número de residências inundadas e o número de fatalidades observadas, segundo dados de 269 eventos históricos de enchentes que ocorreram no Japão durante o período de 1947 a 2001.

$$N = S(NB) \quad (3.23)$$

na qual: NB é o número de construções atingidas; e S é a função de fatalidade empírica.

Os autores observaram que a ocorrência de fatalidades causadas por cheias se dá principalmente quando mais de 1.000 edifícios são inundados. Foram derivadas relações estatísticas que mostraram uma variação considerável, a qual pode ser justificada devido à influência de outros fatores, como alerta, evacuação, características da inundação e o colapso de edifícios. Além disso, os autores mostraram que, quando os dados históricos foram analisados em intervalos de décadas, a taxa de fatalidade diminuiu com o tempo. Tal ocorrência foi atribuída a melhorias de arranjos institucionais que promoveram alertas de inundação e planos de resposta a emergências.

Jonkman *et al.* (2008) afirmaram que grande parte dos métodos existentes não considera todas as variáveis determinantes mais relevantes que influenciariam perdas de vidas e que, com frequência, possuem dados empíricos limitados nos quais diversas variáveis são influenciadas por julgamento de especialistas. Com isso, foi proposto um modelo empírico de estimativa de fatalidades baseado nos dados das inundações da Holanda e Grã-Bretanha (1953), Japão (1959 e 2002) e Bangladesh (1991). O modelo é dividido por zonas de perigo (zona da brecha, zona de taxa de subida do nível da água rápida e zona restante) (Figura 3.11) definidas pela relação entre profundidade e velocidade da inundação, nas quais cada zona apresenta uma equação empírica

para estimativa de fatalidades relacionando a perda de vida na população exposta às características do evento (Equação 3.24, 3.25 e 3.26).

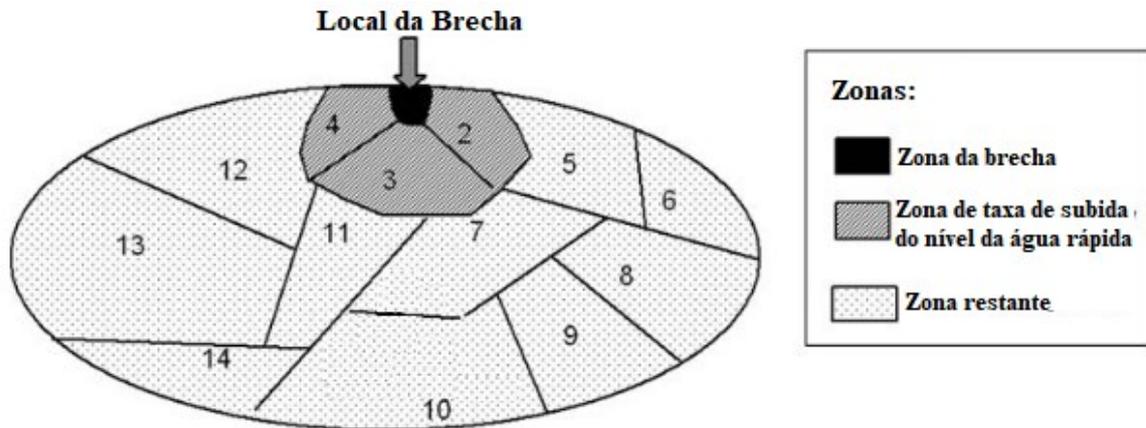


Figura 3.11: Zonas de perigo proposta por Jonkman *et al.* (2008) para estimativa de perdas de vidas

Fonte: Adaptado de Jonkman *et al.*, 2008.

$$F_{DB} = 1 \text{ para } hxv \geq 7 \text{ m}^2/\text{s e } v \geq 2 \text{ m/s} \quad (3.24)$$

$$F_{DRW} = \Phi_N\left(\frac{\ln(h) - \mu_N}{\sigma_N}\right) \text{ para } h \geq 2,1 \text{ m e } w \geq 0,5 \text{ m/h e } hxv < 7 \text{ m}^2/\text{s e } v < 2 \text{ m/s} \quad (3.25)$$

$$\mu_N = 1,48 \text{ m e } \sigma_N = 0,28 \text{ m}$$

$$F_{DR} = \Phi_N\left(\frac{\ln(h) - \mu_N}{\sigma_N}\right) \text{ para } w \geq 0,5 \text{ m/h ou } (w \geq 0,5 \text{ m/h e } h < 2,1 \text{ m}) \text{ e } (hxv < 7 \text{ m}^2/\text{s} \text{ ou } v < 2 \text{ m/s}) \quad (3.26)$$

$$\mu_N = 7,60 \text{ m e } \sigma_N = 2,75 \text{ m}$$

na qual: F_{DB} é a taxa de fatalidade na zona da brecha; F_{DRW} é a taxa de fatalidade na zona de taxa de subida d'água rápida; e F_{DR} é a taxa de fatalidade na zona restante.

A variedade de condições de aplicações de taxa de fatalidade apresentadas nas equações anteriores é indicada na Figura 3.12.

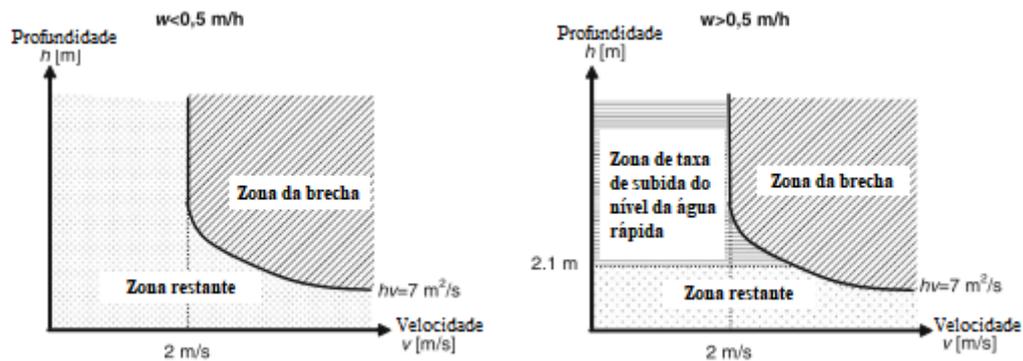


Figura 3.12: Área de aplicação das funções de fatalidade de Jonkman *et al.* (2008) em função da profundidade, taxa de subida do nível d'água e velocidade

Fonte: Adaptado de Jonkman *et al.*, 2008.

Os autores compararam os resultados do método proposto com informações de eventos históricos de inundação. Foi obtida uma estimativa precisa do número de fatalidades observadas durante esses eventos. O modelo ainda foi aplicado para avaliar as consequências de maneira prospectiva de uma inundação em grande escala na Holanda em que o cenário de inundação costeira analisado resultou em aproximadamente 3.200 fatalidades, sendo assim, altamente recomendável o aprimoramento das estratégias de evacuação do local.

3.2.2.2 Inundações causadas por ruptura de barragens

Para estimativa de perdas de vidas causadas por inundações provenientes de ruptura de barragens, um dos primeiros modelos propostos foi o modelo empírico desenvolvido por Brown & Graham (1988), que, com base em 24 casos de rupturas de barragens e inundações repentinas, propuseram uma relação não linear para o tamanho da população em risco e perda de vida para tempos de alerta inferiores a 1,5 hora, uma vez que se assumiu que comunidades maiores com maior facilidade de comunicação e recursos têm um efeito facilitador na disseminação de alertas (Equação 3.27). O efeito da relação não linear diminui para tempos de alerta superiores a 1,5 hora, pois as vantagens comunicativas atribuídas a centros populacionais maiores deixam de ser significativas quando há tempo adequado para evacuar toda a população em risco (Equação 3.28). Os autores também apresentaram uma situação em que o tempo de alerta é inferior a 15 minutos para o qual eles propuseram uma perda de vida de 50% da população em risco (Equação 3.29).

$$N = N_{PAR}^{0,56} \quad 0,25 \text{ h} < WT < 1,5 \text{ h} \quad (3.27)$$

$$N = 0,0002N_{PAR} \quad WT > 1,5 \text{ h} \quad (3.28)$$

$$N = 0,5N_{PAR} \quad WT < 0,25 \text{ h} \quad (3.29)$$

na qual: WT é o tempo de alerta (h).

DeKay & McClelland (1993) ampliaram o estudo realizado por Brown & Graham (1988) introduzindo a força da inundação como preditor adicional na estimativa de perdas de vidas. Foi proposta uma relação empírica para inundações de alta força, como perto de vales onde as águas da inundação provavelmente são rápidas ou em áreas onde mais de 20% dos edifícios são danificados ou destruídos (Equação 3.30), e para inundações de baixa força, como em grandes planícies de inundação, onde os escoamentos das águas da inundação serão mais rasos e lentos (Equação 3.31).

$$N = \frac{N_{PAR}}{1 + 13,277(N_{PAR}^{0,440})e^{2,982(WT) - 3,790}} \quad (3.30)$$

$$N = \frac{N_{PAR}}{1 + 13,277(N_{PAR}^{0,440})e^{0,759(WT)}} \quad (3.31)$$

DeKay & McClelland (1993) afirmaram que, pela análise de sensibilidade das Equações 3.30 e 3.31, a perda de vida diminui muito rapidamente quando o tempo disponível aumenta. Os autores afirmam também que o tempo de alerta é mais significativo durante condições de alta força, sendo que isso ocorre devido ao fato de que pessoas submetidas a condições de maior periculosidade tendem a levar os avisos mais a sério e evacuar mais rapidamente do que pessoas que se expõem a inundações menos intensas.

Graham (1999) apresentou um modelo empírico baseado na análise de 40 rompimentos de barragens no qual as taxas de fatalidade recomendadas são determinadas com base na severidade da inundação, no tempo de alerta e na compreensão da gravidade da inundação pela população. Os critérios quantitativos para a severidade da inundação são dados em função de profundidades d'água e do produto velocidade x profundidade de escoamento. Três categorias de tempo de alerta são distinguidas: nenhum, algum tipo de aviso (15-60 min) e aviso adequado (> 60 min). A compreensão da gravidade da inundação pela população é separada em não aplicável, precisa ou vaga (Tabela 3.2).

Tabela 3.2: Taxas de fatalidades recomendadas por Graham (1999) para estimativa de perdas de vidas causadas por ruptura de barragem

Severidade da inundação	Tempo de alerta (min)	Entendimento da severidade da inundação	Taxa de fatalidade	
			Sugerida	Intervalo sugerido
Alta	Sem aviso	não aplicável	0,75	0,03 - 1,00
	15 - 60	vago	Use os valores mostrados acima e aplique ao número de pessoas que permanecem na planície de inundação após a emissão do alerta.	
		preciso		
> 60	vago			
		preciso		
Média	Sem aviso	não aplicável	0,15	0,03 - 0,35
	15 - 60	vago	0,04	0,01 - 0,08
		preciso	0,02	0,005 - 0,04
	> 60	vago	0,03	0,005 - 0,06
preciso		0,01	0,002 - 0,02	
Baixa	Sem aviso	não aplicável	0,01	0,0 - 0,02
	15 - 60	vago	0,007	0,0 - 0,015
		preciso	0,002	0,0 - 0,004
	> 60	vago	0,0003	0,0 - 0,0006
preciso		0,0002	0,0 - 0,0004	

Fonte: Adaptado de Graham, 1999.

Posteriormente, Reiter (2001) ampliou a abordagem de Graham (1999) introduzindo fatores para explicar a vulnerabilidade da população, a influência da eficiência de alertas e possíveis ações de resgate.

Aboelata & Bowles (2005), com a justificativa de suprir as limitações das estimativas de perdas de vidas por modelos empíricos, apresentaram o modelo de estimativa de perdas de vidas dinâmico LifeSim. O modelo é estruturado por meio de um sistema de modelagem modular, no qual cada módulo troca informação com o outro por meio de um banco de dados que inclui diversas camadas e tabelas de sistemas de informações geográficas (SIG). Os quatro principais módulos presentes na metodologia são:

- o módulo de rotina da inundação, que apresenta um conjunto de redes representando, ao longo de toda área e período, as características da inundação;
- o módulo de perda de abrigo, que simula a exposição de pessoas em construções durante cada evento como resultado de danos estruturais e critérios de submersão;
- o módulo de alerta e evacuação, que simula a distribuição e dinâmica da população em risco após a emissão do alerta; e
- o módulo de perda de vida, que estima as perdas por meio de distribuições de probabilidades apresentadas por Aboelata *et al.* (2003).

O modelo LifeSim foi incorporado pelo *United States Army Corps of Engineers* (USACE) em uma versão mais simplificada no programa HEC-FIA (USACE, 2015) e, posteriormente, foi incorporado integralmente no HEC-LifeSim (USACE, 2018b). Face à aplicação deste estudo, o modelo LifeSim incorporado ao HEC-LifeSim é mais bem descrito na seção 3.2.2.4.

Johnstone *et al.* (2005) apresentam o modelo dinâmico *Life Safety Model*. As causas de morte são contabilizadas em um nível individual, podendo ocorrer em três estados diferentes: quando a construção em que uma pessoa se encontra é destruída; quando uma pessoa que está andando perde sua estabilidade; e quando o veículo de uma pessoa fica sobrecarregado pela água da cheia. O modelo foi validado pela reconstrução das consequências da ruptura da barragem de Malpasset na França em 1959 (JOHNSTONE *et al.*, 2005) e da inundação do Mar do Norte em 1953 (DI MAURO & LUMBROSO, 2008).

O *Life Safety Model* possui custo para obtenção da licença e não há desenvolvimento desde 2015. Por esses motivos, a utilização do LifeSim incorporado ao HEC-LifeSim, que é gratuito e apresenta aprimoramento constante, é predominante por proprietários de barragens e consultores (LANG, 2018).

Peng & Zhang (2012) desenvolveram um modelo empírico baseado em redes bayesianas por meio da compilação de 340 dados de rupturas de barragens. A rede simplificada é definida por quatro nós: dois básicos (tempo de alerta e severidade da inundação), um médio (evacuação) e um final (perda de vida). A partir dessa rede simplificada, há um desmembramento obtendo-se uma nova rede com 15 nós e 23 arcos (Figura 3.13).

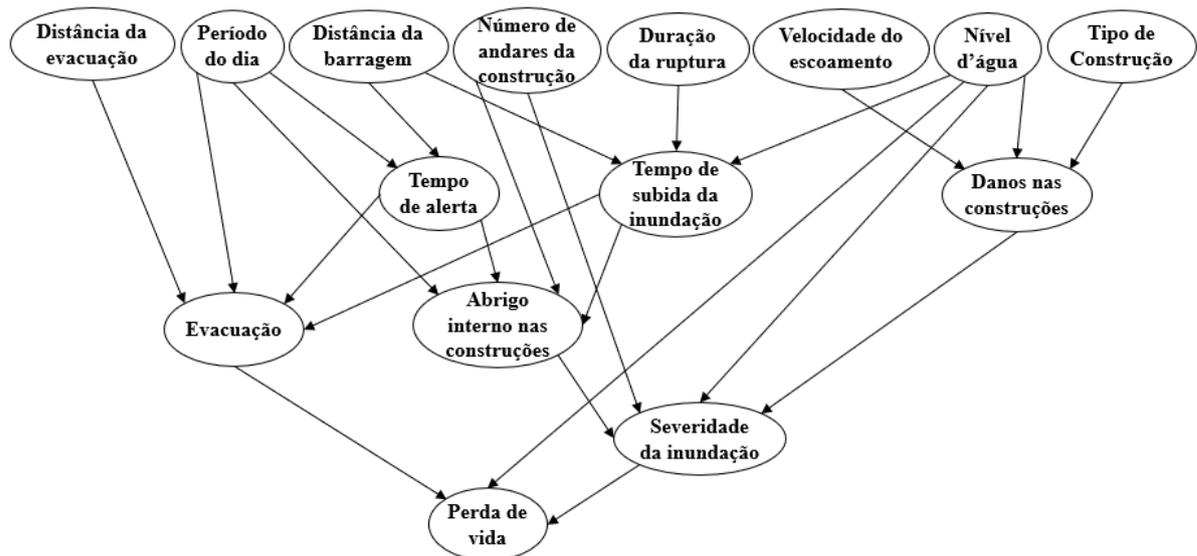


Figura 3.13: Rede Bayesiana utilizada no modelo de estimativa de perdas de vidas proposto por Peng e Zhang (2012)

Fonte: Adaptado de Peng e Zhang, 2012.

Para validação, o modelo é comparado aos modelos de DeKay & McClelland (1993) e de Graham (1999) em diversos casos históricos de rupturas de barragens. Tanto o modelo de Graham (1999) e Peng & Zhang (2012) apresentaram boas estimativas. Já o modelo de DeKay e McClelland (1993) apresentou resultados mais dispersos pelo fato de ser quantificado com dados históricos em macroescala, fornecendo, assim, previsões relativamente fracas para as subáreas com gravidade de inundação semelhante.

USBR (*United States Bureau of Reclamation*) (2015), com intuito de expandir a análise de casos e refinar o modelo desenvolvido por Graham (1999), apresenta o modelo empírico de estimativa de vidas RCEM (*Reclamation's Consequence Estimating Methodology*), embasado em 80 dados com características do evento de inundação e de fatalidades. A partir do RCEM, a seleção das taxas de fatalidade é realizada por meio de uma plotagem gráfica do histórico de casos para as quais curvas envoltórias foram desenvolvidas para definir um intervalo sugerido e limites superiores e inferiores de taxas de fatalidade. As curvas da taxa de fatalidade RCEM são estimadas com base em intervalos de tempo de aviso e no fator DV, que é o risco hidrodinâmico ou produto da profundidade e velocidade máxima de inundação. Face à aplicação deste estudo, o modelo RCEM é mais bem descrito na seção 3.2.2.3.

Para finalizar esse estado da arte, a Tabela 3.3 sumariza todos os modelos de estimativa de perdas de vida apresentados neste trabalho em função do tipo de inundação, dos parâmetros considerados para o equacionamento e do princípio utilizado para concepção do modelo.

Tabela 3.3: Modelos de estimativa de perdas de vidas apresentados neste trabalho

Autores	Parâmetros					Princípios
	h	u	w	WT	Bd	
Inundações ribeirinhas e costeiras						
Friedman (1975)					X	Empírico
Waarts (1992)	X					Empírico
Vrouwenvelder & Steenhuis (1997)	X		X		X	Empírico
HKV (2000)	X		X			Empírico
Jonkman (2001)	X	X	X	X		Empírico
Penning-Rowsell <i>et al.</i> (2005)	X	X	X	X		Empírico
Zhai <i>et al.</i> (2006)					X	Empírico
Jonkman <i>et al.</i> (2008)	X	X	X			Empírico
Rupturas de barragens						
Brown & Graham (1988)				X		Empírico
DeKay & McClelland (1993)				X		Empírico
Graham (1999)	X	X		X		Empírico
Reiter (2001)	X	X		X		Empírico
Aboelata e Bowles (2005)	X	X	X	X	X	Dinâmico
Johnstone <i>et al.</i> (2005)	X	X	X	X	X	Dinâmico
Peng & Zhang (2012)	X	X	X	X	X	Empírico
USBR (2015)	X	X		X		Empírico

na qual: h é a profundidade do escoamento; u é a velocidade do escoamento; w é a taxa de subida da água; WT é uma variável relacionada ao tempo de evacuação; e Bd é o dano em construções.

Fonte: Adaptado de Silva & Eleutério, 2019.

3.2.2.3 RCEM

A seguir, o modelo RCEM será mais detalhado por meio da apresentação de informações contidas em USBR (2015).

A partir de uma análise histórica das características de 60 casos de inundações, principalmente causadas por acidentes em barragens, foram elaborados dois gráficos, divergentes pela tipologia de alerta existente, com 80 pontos no total que relacionam a taxa de fatalidade e o risco hidrodinâmico (DV). A Figura 3.14 apresenta o gráfico recomendado para os casos de pouco ou sem alerta e a Figura 3.15 apresenta o gráfico recomendado para casos em que há um alerta adequado.

O caso de pouco ou sem alerta representa uma situação em que a grande maioria da população em risco recebeu uma notificação inadequada sobre a ameaça existente, resultando na incapacidade dessa de sair da planície de inundação. Já o caso de alerta adequado descreve uma situação na qual a população em risco recebe um alerta que permite uma quantidade indefinida de tempo para evacuação, sendo que o termo indefinida é utilizado pelo fato de condições de alerta adequado e tempo necessário para evacuação serem muito específicas do local analisado.

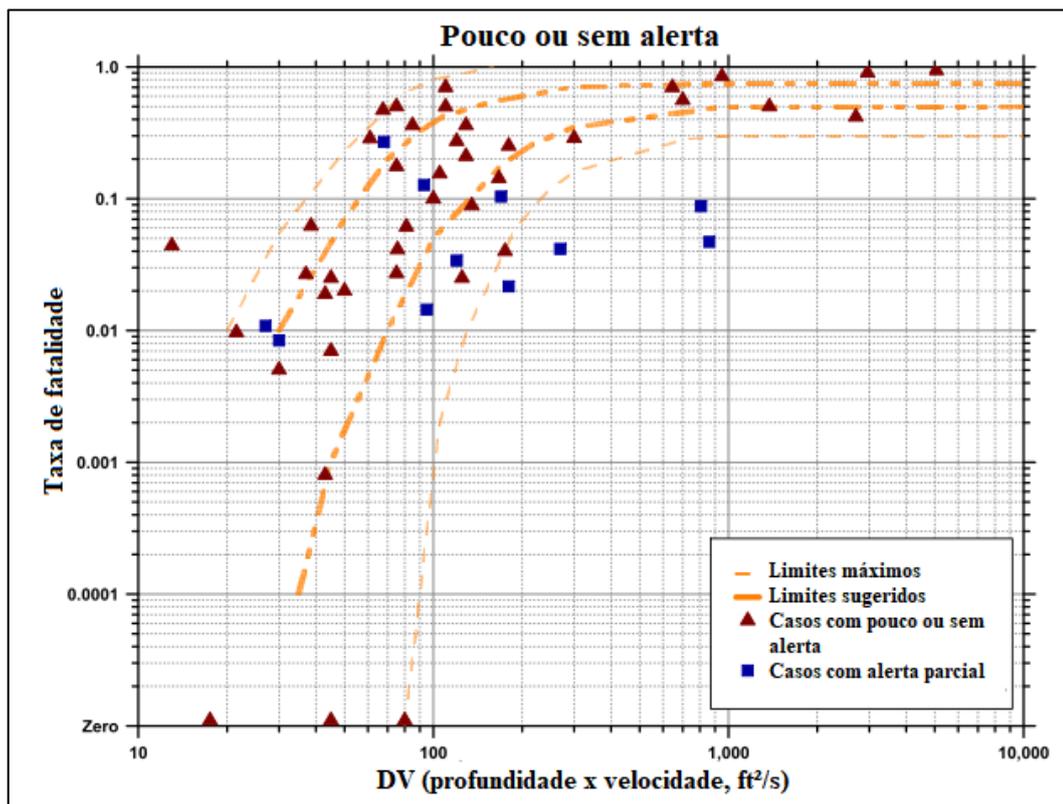


Figura 3.14: Taxa de fatalidade vs. DV para pouco ou sem alerta - RCEM

Fonte: Adaptado de USBR, 2015.

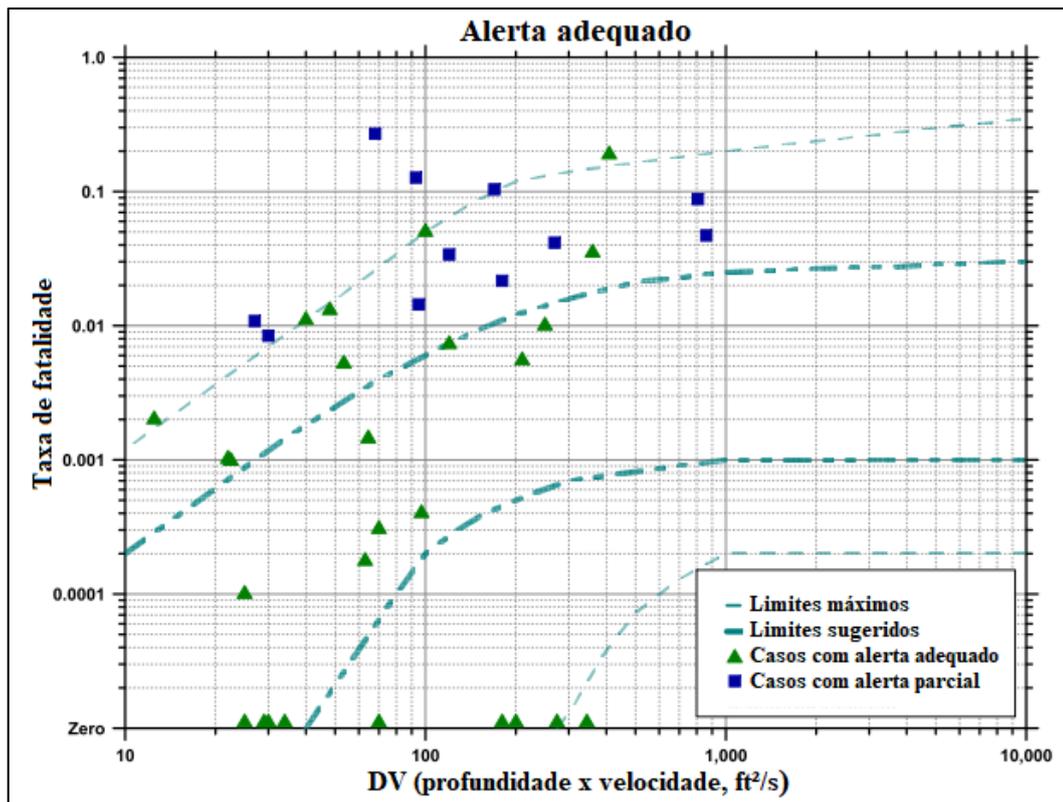


Figura 3.15: Taxa de fatalidade vs. DV para alerta adequado - RCEM

Fonte: Adaptado de USBR, 2015.

Analisando a Figura 3.14 e a Figura 3.15, é verificada a existência de 11 casos de alerta parcial para cada tipologia de gráfico. Esses são casos em que o alerta não foi claro ou em que o alerta foi diferente para várias partes da população em risco. Como esses casos se enquadram entre as tipologias de pouco ou sem alerta e alerta adequado, esses foram incluídos nos dois gráficos.

Cada gráfico possui linhas tracejadas que representam os limites sugeridos e máximos para as taxas de fatalidades em toda a faixa de valores de DV. Os limites sugeridos foram selecionados visualmente com base nos pontos de dados históricos de casos mais representativos para cada cenário de tempo de alerta, sem formulação matemática ou considerações estatísticas das curvas. Os casos que possuíam dados questionáveis receberam menos influência no intervalo sugerido. Os limites máximos, que também foram estabelecidos visualmente, destinam-se a representar os limites superior e inferior das taxas de fatalidades, os quais abrangem praticamente todos os dados do histórico de casos.

Entre os casos utilizados na elaboração do modelo, apenas um foi causado por uma ruptura de barragem de rejeitos de mineração. A barragem de Buffalo Creek, que se localizava no Estados Unidos no Condado de Logan pertencente ao estado da Virgínia Ocidental, era destinada a

acúmulo de rejeitos resultantes do processo de mineração de carvão. O rompimento ocorreu em 26 de fevereiro de 1972, quatro dias após a barragem ter sido declarada segura por fiscalizadores federais de mineração. Foram registradas 125 fatalidades com uma população em risco estimada 5.000 pessoas, resultando em uma taxa de fatalidade 0,025. O risco hidrodinâmico (DV) estimado na região com maior concentração de fatalidades foi entre 90 ft²/s (8,4 m²/s) e 160 ft²/s (14,9 m²/s). Não houve um alerta adequado e os dados obtidos do caso foram considerados consistente, pelo fato do evento ter sido extensivamente estudado, possuindo relatos de modo bastante convergentes entre as fontes.

Para aplicação do modelo, é recomendada a divisão da região afetada em diversos trechos determinados pelas características de cada evento e local. As estimativas de perdas de vidas devem ser justificadas pela construção do caso, o que inclui a comparação com históricos de casos relevantes, os quais possuem uma compilação completa com todas as informações levantadas em USBR (2014a). É destacada ainda a preferência por seleção de faixas de taxas de fatalidades e de DV, ao invés de valores pontuais.

As 10 etapas recomendadas para aplicação do modelo são apresentadas e detalhadas a seguir:

- seleção dos cenários de ruptura de barragem que correspondam aos modos de um potencial rompimento: as perdas de vidas causadas pela inundação por rompimento de uma barragem podem ser altamente dependentes do potencial modo da ruptura. Na análise de risco de segurança de barragens, normalmente, os modos de ruptura se enquadram em uma das três categorias: estrutural, sísmica e hidrológica;
- seleção dos períodos e categorias de tempo apropriados: as análises de diferentes períodos devem ser necessárias se houver significativa variação da população em risco ao longo do dia. Se não houver essa variação significativa e os tempos de aviso forem muito longos, pode-se considerar que não há diferença significativa entre as condições diurnas e noturnas;
- revisão e avaliação do mapeamento das áreas inundadas e definição dos trechos considerados para cada cenário de ruptura da barragem: a modelagem de inundação é uma parte crítica do processo de estimativa de perdas de vidas por fornecer estimativas das áreas atingidas, gravidade e tempos de chegada das ondas de inundação. Ao decidir

como dividir a regiões em trechos devem ser consideradas variáveis como a densidade populacional, as características da inundação e as características do alerta;

- estimativa da faixa do risco hidrodinâmico (DV) para as áreas atingidas: os dados de casos históricos demonstram que as maiores taxas de fatalidades estimadas estão associadas aos maiores valores estimados de DV. Quando a gravidade da inundação é menor, há uma maior dispersão nas taxas de fatalidades, provavelmente pelo fato de outros fatores possuírem maior influência nessas taxas em valores mais baixos de DV. Geralmente, o DV é estimado quantitativamente em qualquer local, pela divisão do fluxo da inundação pela largura da inundação ou pela multiplicação entre profundidade máxima e a velocidade máxima, conforme as informações obtidas na simulação hidráulica. Os valores reais de DV em um determinado trecho de inundação podem variar consideravelmente; portanto, a determinação de um intervalo é maneira mais correta de representar as condições;
- determinação da população em risco em cada trecho para cada cenário de ruptura, intervalo de DV e período/categoria de tempo: a população em risco pode ser obtida utilizando um sistema de informações geográficas com dados do mapeamento de inundação sobrepostos aos dados de censo demográfico;
- estimativa de quando os alertas de ruptura da barragem seriam iniciados e aferição das categorias de tempo de alerta para áreas inundadas: tipicamente, para casos com pouco ou sem alerta, são considerados alertas emitidos menos de uma hora antes do rompimento, e para casos de alerta adequado, são admitidos alertas emitidos mais de uma hora antes da ruptura. Porém, o tempo de chegada da onda de inundação também deve ser considerado;
- para cada trecho da população em risco, o uso da abordagem gráfica para estimar uma faixa de taxa de fatalidade adequada com base nos valores de DV, tempo de alerta e outras considerações: é esperado que o intervalo de taxa de fatalidade selecionado abranja cerca de uma ordem de grandeza. A escolha deve ser baseada em comparação com históricos de casos relevantes, nas considerações topográficas, geográficas e demográficas específicas do local, na avaliação das alterações relativas nas

características do fluxo da inundação para um determinado trecho quando comparado a um trecho a montante, e no potencial de evacuação;

- estabelecimento do intervalo de perdas de vidas para cada trecho da população em risco de cada cenário de inundação aplicando limites de faixa de taxa de fatalidade adequados: o intervalo de perda de vida estimada para cada trecho específico da população em risco é determinado multiplicando os limites do intervalo da taxa de fatalidade por cada estimativa de população em risco. É recomendável, além do intervalo de perda de vida para cada cenário, uma melhor estimativa, que pode ser obtida pela média aritmética ou ponderada entre as combinações de dia e noite;
- avaliação de como as incertezas e a variabilidade em vários parâmetros afetam as incertezas gerais nas estimativas de perdas de vidas por meio da realização de estudos de sensibilidade, se necessário; e
- construção do caso para as estimativas de perdas de vidas, documentando, argumentando e justificando todas as suposições e referências adotadas.

3.2.2.4 HEC-LifeSim

A seguir, o modelo HEC-LifeSim versão 1.0.1 será mais detalhado pela apresentação de informações existentes em Aboelata & Bowles (2005) e USACE (2018a).

Por meio de uma abordagem baseado em agentes, o HEC-LifeSim é um modelo de estimativa de perdas de vidas que tem como objetivo:

- auxiliar efetivamente a redução dos riscos de perdas de vidas associados a inundações;
- avaliar os riscos existentes e residuais em relação às diretrizes de risco toleráveis;
- compreender a dinâmica de perdas de vidas associada a inundações; e
- produzir ou melhorar os Planos de Ações Emergenciais existentes.

Simulações de Monte Carlo são utilizadas no HEC-LifeSim para capturar a incerteza aleatória no processo de alerta e evacuação e no potencial de perdas de vidas. Diversos parâmetros do

modelo podem ser inseridos com incerteza, permitindo um modo de verificar a incerteza epistêmica.

A incerteza aleatória está relacionada a variáveis aleatórias que variam espacialmente ou por evento e que existem quando o resultado de um processo natural é aleatório ou quando o processo natural é tão complexo que parece aleatório quando visto isoladamente. Já a incerteza epistêmica está relacionada a variáveis aleatórias que não são conhecidas exatamente e que estão presentes quando não é possível fazer uma estimativa precisa do valor de uma entrada. A possibilidade de inserção dessas duas tipologias de incertezas permite um resultado probabilístico do modelo.

Para entendimento das considerações utilizadas no modelo, cada módulo existente no HEC-LifeSim será explorado a seguir.

a) Módulo de rotina da inundação

Esse módulo é o que contém os dados hidráulicos da inundação com informações variadas no tempo de profundidade e velocidade de região analisada. No HEC-LifeSim, esses dados provêm de uma simulação bidimensional.

São aceitos como entrada nesse módulo os dados obtidos em simulações dos modelos hidráulicos HEC-RAS e FLO-2D. Para os demais modelos hidráulicos, é possível a inserção dos dados de profundidade e velocidade por meio de diversas camadas para períodos de tempo diferentes contendo informações dos valores desses parâmetros.

b) Módulo de perda de abrigo

O módulo perda de abrigo simula a exposição da população durante cada evento de inundação como resultado de submersão nas construções e de danos estruturais.

Essas construções são inseridas no modelo por meio de um arquivo vetorial contendo informações como: localização, tipo de ocupação, material de construção, número de andares, população com menos de 65 anos e população com mais de 65 anos.

Para submersão nas construções, três zonas de inundação são definidas fisicamente pela interação entre abrigo existente e profundidades resumidas da seguinte forma:

- zona de risco (*chance zone*), que limita uma área na qual a probabilidade de perdas de vidas é alta;
- zona comprometida (*compromised zone*), que representa uma área com uma probabilidade moderada de perdas de vidas; e
- zona segura (*safe zone*), que define uma zona de probabilidade muito baixa de perdas de vidas.

Para cada zona citada é definido um limiar inicial considerando o critério de mobilidade (população com mais de 65 anos e menos de 65 anos). Os limiares são variados e estão relacionados ao tipo de ocupação e aos números de andares das construções. Para ilustrar, a Tabela 3.4 apresenta alguns valores para tipos de ocupações residenciais unifamiliares com um andar.

Tabela 3.4: Limiares de submersão utilizado para residenciais unifamiliar com um andar considerados no HEC-LifeSim para cada zona de inundação existente

Zona de inundação	Limiar (m)	
	< 65 anos	> 65 anos
Zona de risco	4,57	1,83
Zona comprometida	3,96	1,22
Zona segura	0,61	0,61

Fonte: USACE, 2018a.

Para danos estruturais em construções, a estabilidade é definida por critérios de velocidade e profundidade, também considerando o tipo de ocupação, material de construção e números de andares. No HEC-LifeSim, são utilizados os critérios definidos por USACE (1985) e RESCDAM (2000). Para ilustrar, a Figura 3.16 apresenta os critérios utilizados para tipo de ocupação residencial unifamiliar de alvenaria com um andar.

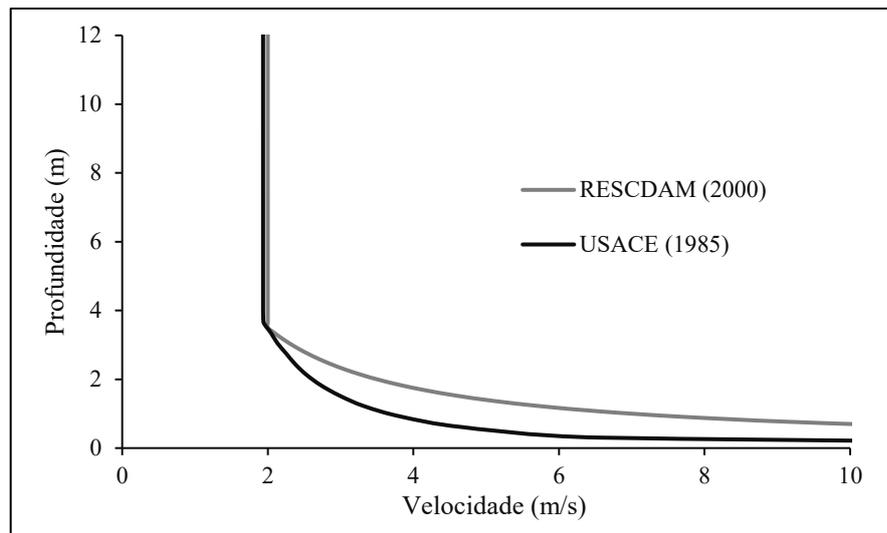


Figura 3.16: Critérios utilizados no HEC-LifeSim para danos em construções residenciais unifamiliares de alvenaria com um andar

Fonte: Adaptado de USACE, 1985 e RESCDAM, 2000.

A partir do momento que o critério de estabilidade é alcançado, causando o colapso da estrutura, a população é alocada na zona de risco. Para cada zona definida anteriormente, curvas probabilísticas são utilizadas para estimativa das fatalidades. Tais curvas serão detalhadas na seção d), a qual descreve do módulo de perda de vida.

c) Módulo de alerta e evacuação

O módulo de alerta e evacuação representa a distribuição e o comportamento da população durante o evento de inundação. Esse processo possui diversos marcos que são separados por intervalos de atraso no tempo como demonstrado na linha do tempo da Figura 3.17. Vale ressaltar que, para este estudo, o termo atraso foi o escolhido para tradução de *delay*.

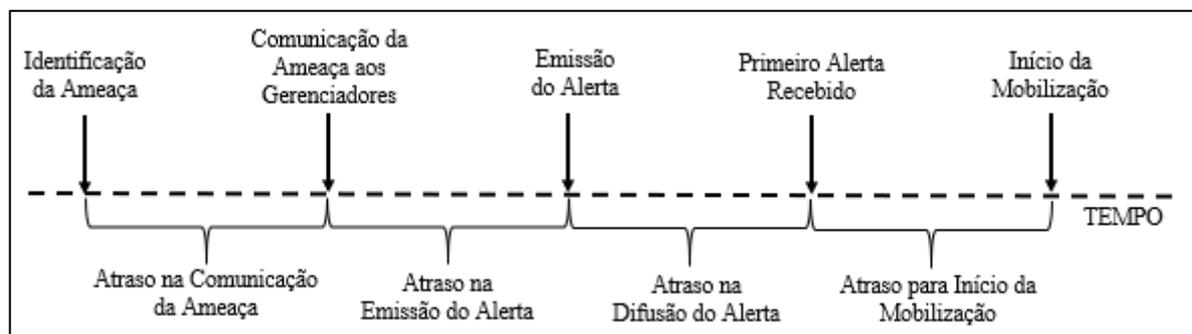


Figura 3.17: Linha do tempo do alerta e evacuação utilizada no HEC-LifeSim

Fonte: Adaptado de USACE, 2018a.

A linha do tempo se inicia quando há a identificação da ameaça iminente e apresenta o primeiro atraso em relação à comunicação da ameaça aos gerenciadores. Em ambas as situações, não existem estudos que auxiliem na determinação desses valores; sendo assim, o usuário deve determinar o tempo considerando as características do caso analisado.

Diferentemente, os outros três atrasos seguintes possuem pesquisas que embasam a escolha do tempo utilizado por meio de estudos e equações propostas como apresentado a seguir.

Para o atraso na emissão do alerta, que é definido como tempo para o momento em que os gerenciadores recebam a notificação da ameaça iminente até a emissão de uma ordem de evacuação ao público, Sorensen & Mileti (2014a) consideram quatro principais fatores:

- formalização dos procedimentos de planejamento e de implementação: comunidades que refletem sobre o processo de decisão de alerta e que preparam planos, procedimentos e ferramentas relevantes para chegar a decisões rápidas possuem um melhor desempenho comparado àquelas que deixam as decisões de alerta serem tomadas de maneira *ad-hoc*;
- desempenho e relações interpessoais: o fornecimento e exercício de atividades de treinamento do alerta permite o entendimento do processo de comunicação e conhecimento da população, o que gera o aumento da eficácia do processo em eventos reais;
- desempenho do sistema: a presença de comunicações reforçadas e redundantes pode impedir que falhas na tecnologia interfiram na tomada de decisão; e
- situacionais: alguns desses fatores podem ser efetivamente controlados, já outros requerem procedimentos de planejamento adaptativo para superar os efeitos prejudiciais. Por exemplo, os alertas são atrasados quando ocorrem incidentes durante a noite, e não durante o dia; eventos que causam impactos emergenciais no fornecimento de eletricidade, ou na infraestrutura física da comunidade, podem apresentar atrasos no alerta inevitáveis.

Sorensen & Mileti (2014a) destacam a existência de poucos trabalhos sobre o tempo para tomar a decisão de emissão de alerta. A maioria das pesquisas realizadas está relacionada a

emergências químicas. No entanto, como muitos acidentes químicos envolvem eventos de movimento rápido que exigem decisões rápidas e possuem um potencial de fatalidades, os resultados são relevantes para outras situações perigosas, como em rupturas de barragens.

A partir da análise desses casos históricos, Sorensen & Mileti (2014a) apresentam a seguinte equação:

$$p = 1 - e^{(-at^b)} \quad (3.32)$$

na qual: p é a probabilidade de atraso na decisão; t é o tempo ([t]); e a e b são coeficientes específicos para ajuste dos dados empíricos.

Com base na Equação 3.32 e nos casos históricos considerados, Sorensen & Mileti (2014a) ainda propõem curvas de planejamento por meio de propostas de coeficientes a e b . No HEC-LifeSim ainda é indicada uma curva para planejamento desconhecido. A Tabela 3.5 e a Figura 3.18 apresentam os tipos de curvas e coeficientes adotados.

Tabela 3.5: Coeficientes utilizados nas curvas de planejamento de atraso na emissão do alerta

Curva	a	b
Bem preparado	1,7	0,6
Moderadamente preparado	1,0	1,0
Minimamente preparado	0,4	1,5
Abordagem <i>ad-hoc</i>	0,2	2,0
Desconhecido	0,83	1,28

Fonte: Sorensen & Mileti, 2014a e USACE, 2018a.

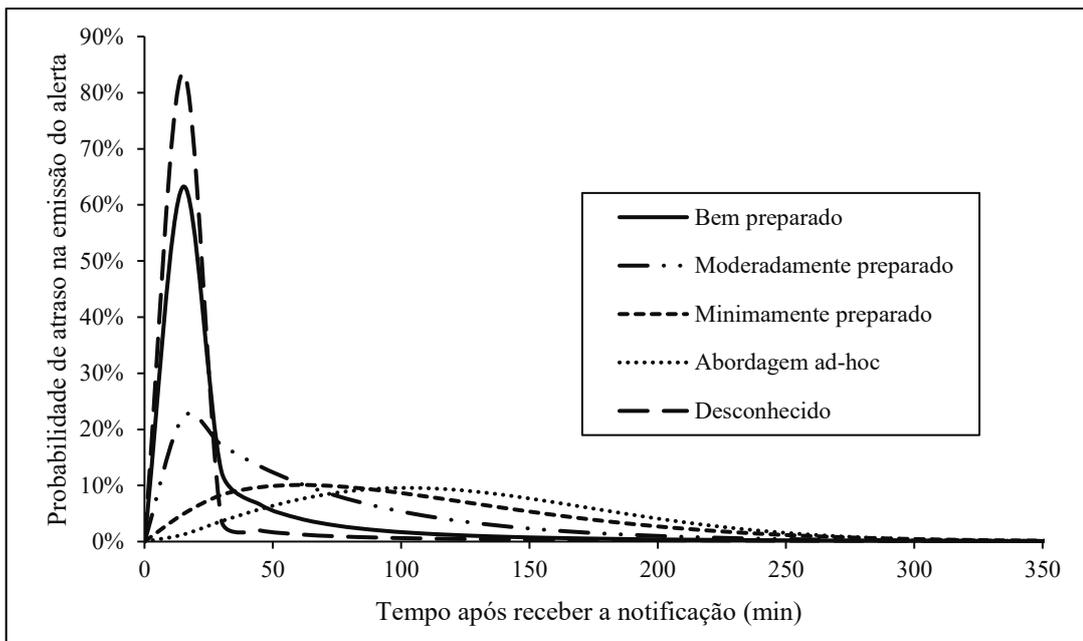


Figura 3.18: Distribuições de probabilidades - curvas de planejamento de atraso na emissão do alerta

Fonte: Adaptado de Sorensen & Mileti, 2014a e USACE, 2018a.

Para o atraso na difusão do alerta, que é o período entre a emissão do alerta e quando esse alerta é recebido pela população em risco, Sorensen & Mileti (2014b) consideram dois principais fatores:

- envio do primeiro alerta: o uso de tecnologias que abrangem uma maior porcentagem de população, e que possuem tempo relativamente baixo para alcance, permite o recebimento mais antecipado da notificação. Quanto mais canais de disseminação forem usados, menos tempo será necessário para alcançar cada parte da população. A repetição desses alertas permite também um aumento na proporção da população em risco ciente do perigo; e
- recebimento do primeiro alerta: características da população e do evento influenciam no processo de difusão alerta. Alertas emitidos à noite tendem a possuir um maior atraso comparado a alertas emitidos durante o dia. A população localizada em casa, no trânsito, no trabalho e em momentos de lazer tendem a possuir variabilidades no atraso da difusão do alerta.

Sorensen & Mileti (2014b) discutem um específico modelo de difusão do primeiro alerta. São destacadas como variáveis que influenciam: o alerta direto, que é o alerta diretamente recebido por um canal de comunicação, e o alerta indireto, que é o alerta recebido por meio de mensagens

informais de amigos, vizinhos, colegas trabalho e parentes. Os autores destacam ainda que a probabilidade do recebimento do primeiro alerta segue uma distribuição logística que pode ser aproximada por uma distribuição de probabilidade modificada de *Rayleigh*.

Com isso, a partir da análise de casos históricos de inundações, erupções vulcânicas e acidentes químicos com uma variabilidade elevada de tempo na difusão de alerta, Sorensen e Mileti (2014b) apresentam a seguinte equação:

$$\frac{\Delta W}{\Delta t} = Pu_t * (Bt + Ct - Bt * Ct) \quad (3.33)$$

na qual: W é a população alertada; $\frac{\Delta W}{\Delta t}$ é a taxa de população alertada no tempo t ; Pu_t é a população que não foi alertada no tempo t ; Bt é o coeficiente relacionado à eficácia do sistema de alerta direto; e Ct é o coeficiente relacionado à eficácia do alerta indireto.

Baseados nessa discussão sobre difusão do alerta, Sorensen & Mileti (2014b) propõem quatro modelos de curvas de difusão para cenários descritos como difusão rápida, moderadamente rápida, moderada e lenta. Para cada modelo, duas curvas considerando o período do dia foram geradas, totalizando assim, oito curvas de difusão do alerta. Se formar mais específica, têm se:

- rápida: uso de vários canais com velocidades de alerta muito rápidas e penetração ampla com disseminação frequente;
- moderadamente rápida: uso de vários canais, mas não de todas as tecnologias rápidas mais recentes;
- moderada: uso de uma combinação de tecnologias tradicionais, mas não de tecnologia avançada; e
- lenta: uso de tecnologias limitadas sem repetição de alertas.

A Tabela 3.6 apresenta os coeficientes relacionados à eficácia do alerta direto e indireto e a Figura 3.19 mostra as curvas propostas. É destacado que essas curvas são baseadas em dados antigos e que, atualmente, existe um avanço considerável nas tecnologias de emissão de alerta. Portanto, atualizações periódicas nessas curvas são necessárias.

Tabela 3.6: Valores dos coeficientes de eficácia do alerta direto e indireto para cada tipo de curva de difusão do alerta proposta

Coeficiente	Tipo de curva							
	Rápida		Moderadamente rápida		Moderada		Lenta	
	Dia	Noite	Dia	Noite	Dia	Noite	Dia	Noite
Bt	5	10	50	70	100	120	150	180
Ct	0,1	0,05	0,08	0,06	0,06	0,05	0,04	0,02

Fonte: Sorensen & Miteli, 2014b.

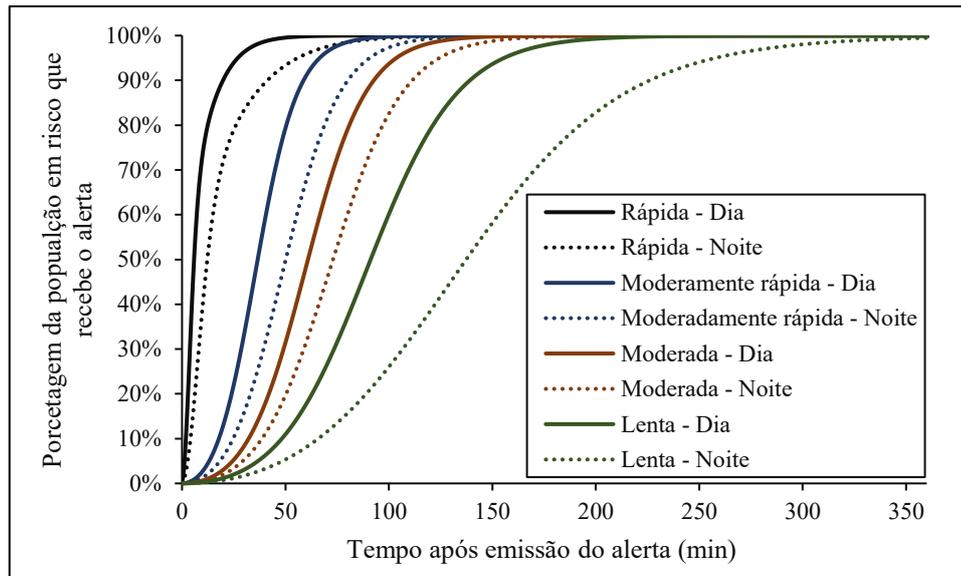


Figura 3.19: Curvas simuladas para os quatro modelos de difusão do alerta - dia e noite

Fonte: Adaptado de Sorensen & Miletì, 2014b.

Sorensen & Miletì (2014b) ainda recomendam valores para os coeficientes de eficácia do alerta direto e indireto. Para a eficácia do sistema de alerta direto, são propostos intervalos de valores com base na tecnologia adotada. Os valores variam desde 90 a 180, para uso de jornais, e 5 a 10, para sirenes. É recomendável a seleção da extremidade inferior dos intervalos para os cenários diurnos e da extremidade superior dos intervalos para os cenários noturnos. Para a eficácia do sistema de alerta indireto, valores próximos a 0,02 e 0,2 indicam um baixo e alto nível de recebimento informal, respectivamente.

Para o atraso no início da mobilização, que é o tempo demorado para a população tomar uma medida de proteção após recebimento do alerta, Sorensen & Miletì (2014c) consideram três fatores chave:

- características da mensagem de alerta: o conteúdo, o estilo, o canal de emissão e o tipo de medida recomendada influenciam na mobilização da população. A emissão de alertas claras, diretas e bem estruturados tende a mobilizar grande parte da população em pouco tempo;
- características do receptor: uma população que possui treinamento e conhecimento do perigo está mais preparada para uma rápida mobilização comparada a populações que não possuem um planejamento eficaz. Além disso, a existência de crianças e animais de estimação tendem a aumentar esse atraso na mobilização. Características como idade, status socioeconômico e sexo também influenciam esse fator; e
- características do contexto: indicadores como fumaça e cinzas estimulam a mobilização. Eventos que estão próximos em relação ao tempo possuem uma maior porcentagem de mobilização comparados a eventos com longo tempo para impacto. A mesma situação é notada para a intensidade desse impacto, sendo que os mais intensos geram uma resposta mais rápida da população.

Mediante a análise de mobilização em casos históricos de furacões, inundações e acidentes com materiais, Sorensen & Mileti (2014c) desenvolveram um modelo relacionando a resposta da população à velocidade de mobilização e ao tempo médio para início dessa mobilização, conforme apresentado a seguir:

$$P_t = 1 - e^{-(t^2)/a_m b_m^2} \quad (3.34)$$

na qual: P_t é a probabilidade acumulativa de ser mobilizado no tempo t ; a_m é o coeficiente relacionado à velocidade da mobilização; e b_m é o coeficiente relacionado ao tempo médio para mobilização.

Por meio do modelo proposto, Sorensen & Mileti (2014c) apresentam quatro tipos de curvas de mobilização (Figura 3.20):

- curva A ($a_m = 1$ e $b_m = 25$): considerada teoricamente alcançada em comunidades que enfrentam a ameaça iminente e que têm um planejamento de emergência eficaz;

- curva B ($a_m = 1$ e $b_m = 25$): indica a situação que mais representa uma comunidade dada uma mistura de fatores existentes. Considera que uma comunidade possui algum progresso com melhora do planejamento de emergência;
- curva C ($a_m = 2$ e $b_m = 85$): também indica a situação que mais representa uma comunidade dada uma mistura de fatores existentes. Porém, considera que comunidade não possui nenhum progresso com melhora do planejamento de emergência; e
- curva D ($a_m = 2,5$ e $b_m = 200$): representa uma comunidade que não planejou nem investiu em tecnologias para alerta de emergência. Sendo assim, qualquer resposta de emergência será improvisada. Essas comunidades provavelmente não acreditam possuir uma ameaça séria ou que possam enfrentar eventos que exijam uma resposta rápida.

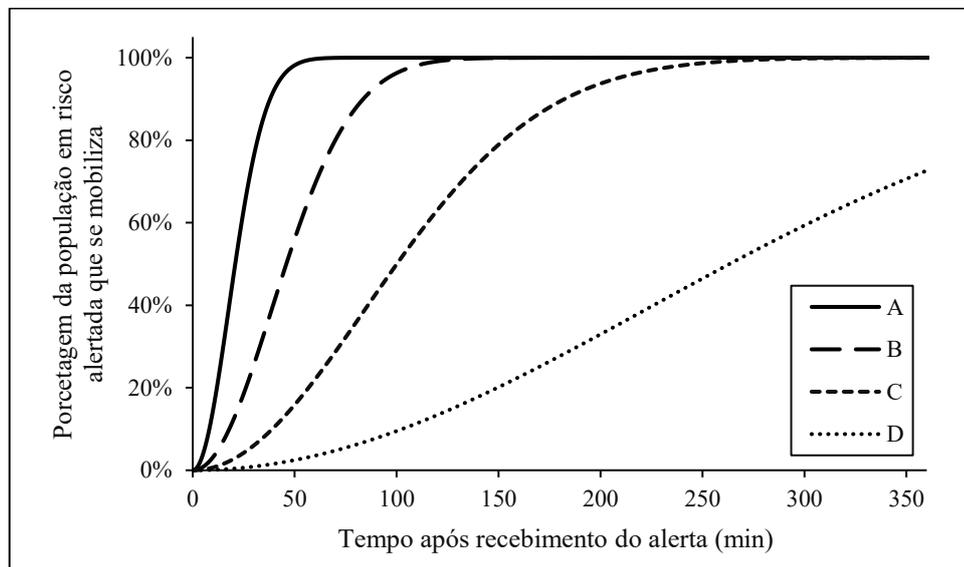


Figura 3.20: Curvas de mobilização da população em risco alertada

Fonte: Adaptado de Sorensen e Mileti, 2014c.

Sorensen & Mileti (2014c) ainda estabelecem uma curva para evacuação a pé ou vertical ($a_m = 0,7$ e $b_m = 12$) para casos extremos, como inundações repentinas e rupturas de barragens ou diques (Figura 3.21). Nessa curva proposta, 100% da população em risco se mobiliza em menos de 40 minutos.

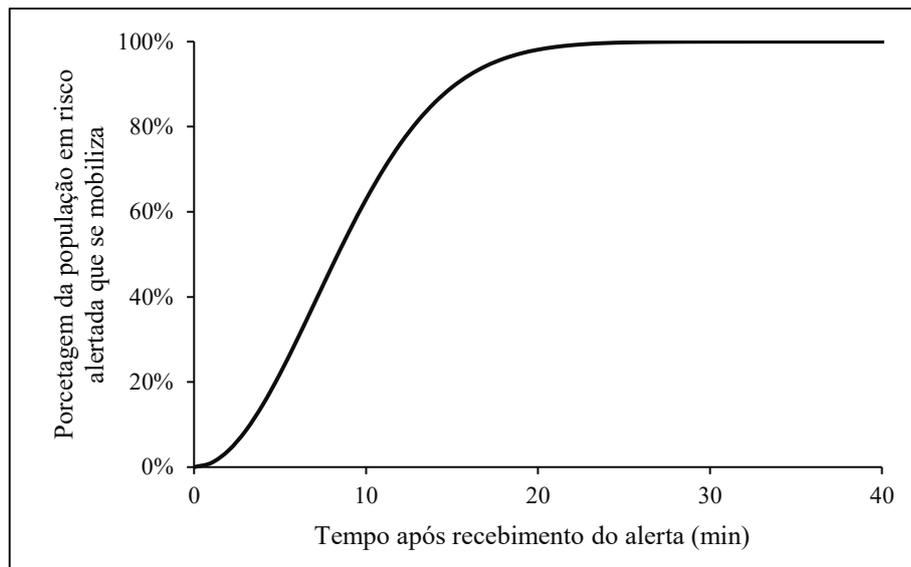


Figura 3.21: Curva de mobilização para evacuação a pé ou vertical

Fonte: Adaptado de Sorensen & Mileti, 2014c.

No HEC-LifeSim, as curvas de mobilização da Figura 3.20 recebem uma ponderação considerando a preparação e percepção da população em risco frente ao evento de inundação. A preparação possui classificação de boa, pobre e desconhecida; e a percepção de provável, improvável e desconhecida. Com isso, as quatro curvas apresentadas por Sorensen & Mileti (2014c) são discretizadas em nove pelas combinações de possibilidades desses dois parâmetros.

Para os três atrasos detalhados anteriormente, o HEC-LifeSim incorpora como padrão as curvas explicitadas inserindo uma faixa de incerteza. A incerteza já está presente nas curvas de atraso na emissão do alerta, por essas serem funções de distribuição de probabilidade. As curvas de difusão do alerta e mobilização são representadas por funções de probabilidade acumulada para as quais, para inserção da incerteza, o modelo considera uma distribuição triangular limitada por uma curva superior e outra inferior. Para os casos em que não há informação sobre o alerta e evacuação, o modelo disponibiliza, também contendo incerteza, uma curva nomeada como desconhecido para cada atraso.

Na identificação da ameaça e em todos os atrasos citados da linha do tempo da Figura 3.17, é possível que o usuário elabore a própria curva para um caso específico e insira a incerteza nos dados de entrada. Os tipos de distribuição para representar incerteza aceitos são: uniforme, normal, triangular e *Lindell*.

Para auxílio de elaboração dessas curvas para representar atraso na emissão do alerta, na difusão e na mobilização para um caso qualquer, Sorensen & Mileti (2015b) desenvolveram um guia de entrevista com 52 perguntas que abrangem os possíveis eventos que ameaçam a região, características do plano de ações emergenciais e dos sistemas de alerta, percepção e preparação da população e características pessoais dessa população.

Com intuito de ponderação nos fatores que influenciam cada atraso na emissão do alerta, na difusão e na mobilização, Sorensen & Mileti (2015a) propõem intervalos de pesos para cada um desses fatores. Esses pesos são estimados pela própria experiência dos autores na área e é esperado que justifiquem entre 25% e 50% da variância das curvas.

Para consulta e possíveis alterações, caso haja aplicação no contexto nacional, o guia de entrevista e os valores das ponderações são apresentados nos ANEXO A e ANEXO B, respectivamente.

Com base nos estudos apresentados de Sorensen & Miteli (2014a, 2014b, 2014c, 2015a e 2015b), o USACE elaborou um gerador de curvas de alerta, difusão e mobilização nomeado *Warning and Mobilization Curve Generator*. A partir da resposta do guia de entrevista, juntamente com os intervalos de ponderações determinados para cada fator, são estimados os valores máximos, mínimos e mais prováveis dos parâmetros das Equações 3.32, 3.33 e 3.34.

Em relação à dinâmica da evacuação, o modelo de transporte de Greenshields *et al.* (1935) é utilizado para representar os efeitos da densidade do tráfego e capacidade da via na velocidade dos veículos. O modelo original foi modificado introduzindo uma velocidade mínima determinada *stop-and-go* (Figura 3.22).

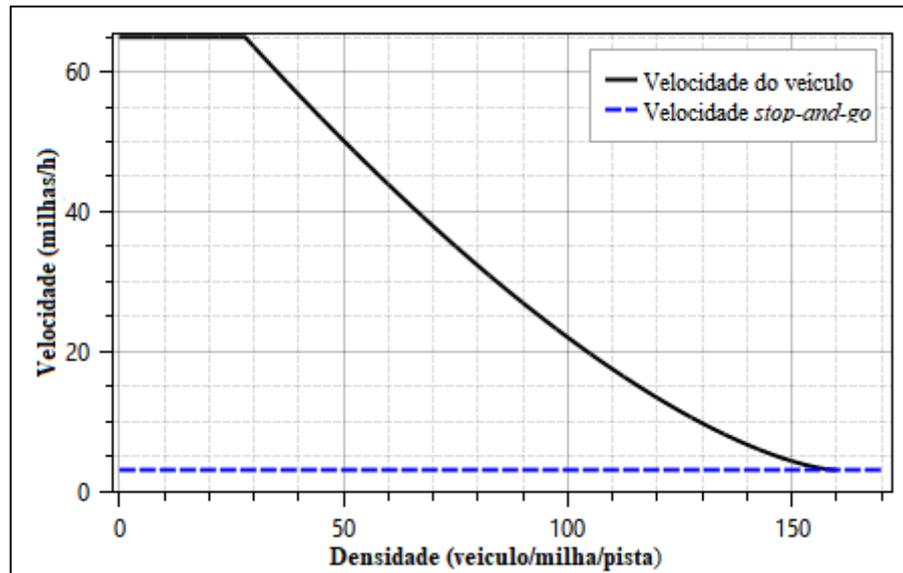


Figura 3.22: Modelo modificado de Greenshields *et al.* (1935) utilizado no HEC-LifeSim

Fonte: Adaptado de USACE, 2018a.

A quantidade de veículos é obtida pela taxa de ocupação desses veículos determinada pelo usuário. Essa taxa só é considerada para pessoas que evacuam em veículos, parâmetro que também é definido pelo usuário. Caso o veículo ou pessoas sejam alcançados pela inundação durante a evacuação, os critérios de estabilidade da Tabela 3.7 são aplicados. Se esses critérios são excedidos, a população afetada é alocada na zona de risco; se não excedidos, a alocação é na zona segura.

Tabela 3.7: Critérios de estabilidade em inundações propostos por Aboelata & Bowles (2005) e utilizados no HEC-LifeSim

Critério de estabilidade	Parâmetros		
	DV (m^2/s)	Velocidade (m/s)	Profundidade (m)
Humano	1,10	2,00	1,52
Carro	0,90	2,00	1,83
SUV	1,35	2,00	1,83

Fonte: USACE, 2018a.

d) Módulo de perda de vida

O módulo de perda de vida consiste na aplicação das distribuições de probabilidade de taxas de fatalidade para cada população que está alocada nas zonas de inundação (Figura 3.23). As curvas foram obtidas por McClelland & Bowles (2002) e atualizadas por Aboelata *et al.* (2003)

pela análise de 54 casos históricos majoritariamente de inundações causadas por ruptura de barragem.

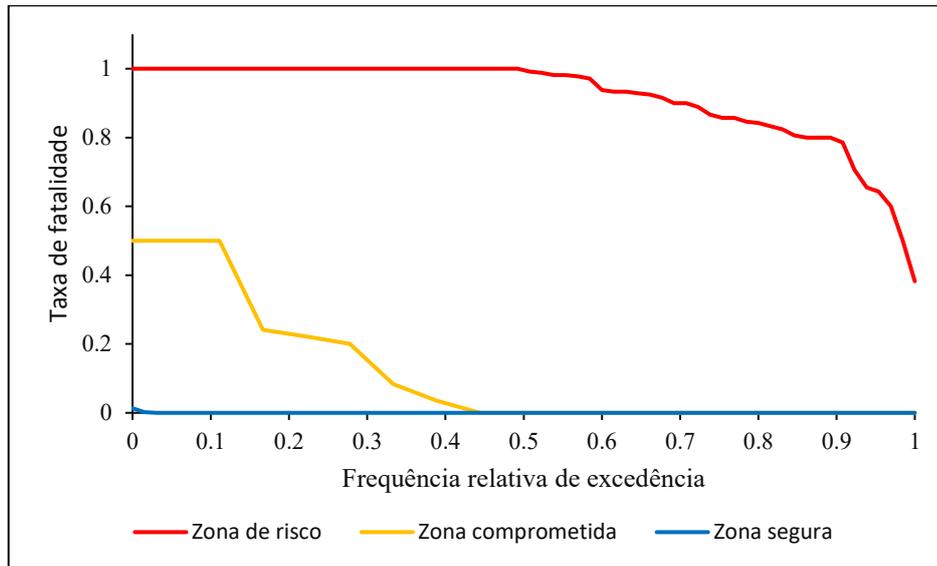


Figura 3.23: Distribuições de probabilidade de taxas de fatalidade utilizados no HEC-LifeSim para cada zona de inundação

Fonte: Aboelata *et al.*, 2003.

A frequência relativa de excedência representa a probabilidade de receber uma determinada taxa de fatalidade. Por exemplo, em 50% das situações em que a população foi alocada na zona de risco, a taxa de fatalidade foi de 100%.

e) Visão geral do modelo

Vistos os módulos utilizados no modelo, um esquema geral demonstrando as interações entre esses módulos é apresentado na Figura 3.24. O módulo de rotina da inundação interage com os outros por meio de trocas de informações pelas diversas camadas de sistemas de informações geográficas.

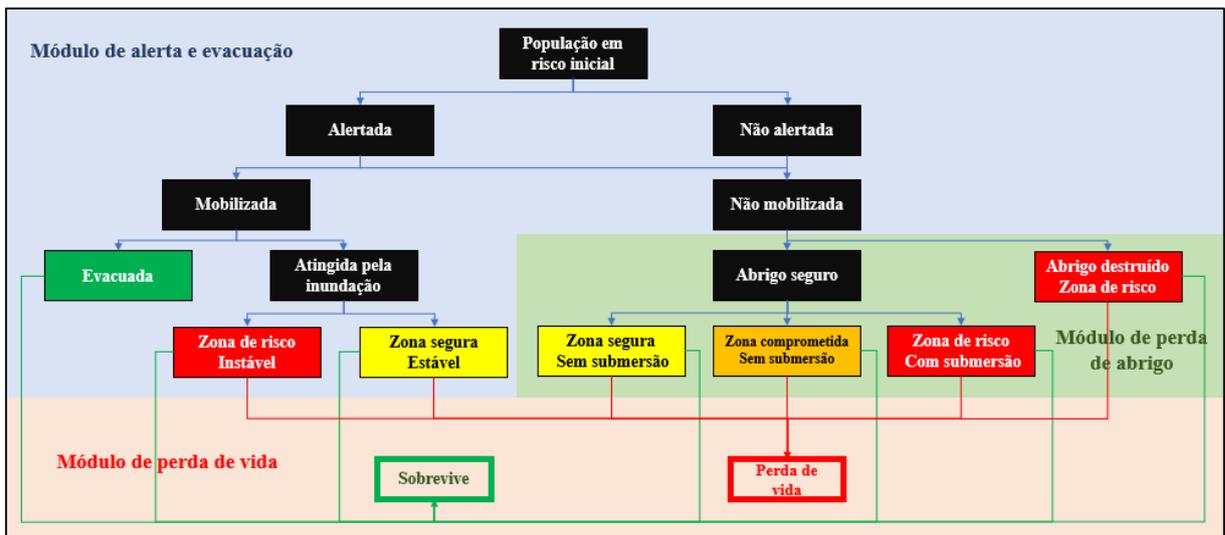


Figura 3.24: Esquema da abordagem de estimativa de perdas de vidas do HEC-LifeSim

Fonte: Adaptado de Bowles, 2007.

Em consultorias e seguradoras americanas, a estimativa de perdas de vidas é realizada pelos modelos HEC-FIA e HEC-LifeSim. A versão completa do modelo LifeSim presente no HEC-LifeSim é mais indicada por permitir uma análise mais confiável da simulação devido ao maior detalhamento da evacuação. Há bastante incerteza na utilização do HEC FIA por tal modelo conter uma abordagem na modelagem da evacuação simplificada. O usuário fornece apenas o tempo necessário para que a população presente em cada estrutura evacue para a região de segurança ou fornece um limite de risco na forma de um polígono. Se um limite de perigo for adotado, o modelo determina a menor distância em linha reta de uma estrutura até o limite e aplica uma velocidade nominal de evacuação ao longo dessa linha para estimar o tempo necessário para evacuar (NEEDHAM *et al.*, 2016a).

Segundo Lang (2018), há alguns aperfeiçoamentos recentes em uma versão beta do HEC-LifeSim. Os desenvolvimentos mais notáveis incluem:

- a lista de casos históricos de Aboelata *et al.* (2003) foi ampliada, e após uma revisão, as três zonas de inundação foram alteradas para duas, quais sejam, a zona de alta ameaça e a zona de baixa ameaça;
- os estudos de estabilidade de construções de Becker *et al.* (2010) e Gallegos *et al.* (2012) foram adicionados ao modelo e os critérios de estabilidade de humanos foram refinados com base nas novas zonas de inundação; e

- a evacuação de veículos e pedestres foi revisada com a inclusão da probabilidade de veículos adentrarem em vias inundadas baseada em estudos de comportamento de motorista e com a inclusão da probabilidade de pessoas evacuarem em regiões de baixas velocidades, mas com altas profundidades por meio de nado.

Para continuação do desenvolvimento do HEC-LifeSim, estudos de comparação têm sido realizados. Ainda segundo Lang (2018), em relação à evacuação, as aplicações do questionário de Sorensen & Mileti (2015b) com as ponderações de Sorensen & Mileti (2015a) realizadas por Needham *et al.* (2016b), para um rompimento de barragem de água na Austrália, e por Needham *et al.* (2018), para o incidente do vertedouro da barragem Oroville na Califórnia em 2017, estão sendo analisadas para atualizações do questionário e das ponderações com intuito de gerar melhores estimativas das curvas de atraso no alerta, difusão e mobilização.

Em relação à validação do modelo, Risher *et al.* (2017) aplicaram o HEC-LifeSim de uma inundação causada pela ruptura de um dique ocorrida em Joso no Japão em 2015. A simulação demonstrou uma superestimativa do modelo na quantificação de fatalidades em casos de repostas e emergências rápidas. Tal estudo é mais detalhado na seção a seguir.

3.2.3 Aplicações de modelos de estimativa de perdas de vidas

Jonkman *et al.* (2002) aplicaram os modelos holandeses para inundações ribeirinhas e costeiras de Waarts (1992), HKV (2000) e Jonkman (2001), os modelos de rupturas de barragens de Graham (1999), Brown & Graham (1988) e os critérios de estabilidade de Abt *et al.* (1989) e de Lind & Hartford (2000) em uma região da Holanda.

Para Waarts (1992), HKV (2000), Jonkman (2001), são observados resultados de mesma magnitude, pelo fato de que esses modelos são calibrados com os mesmos dados da inundação de 1953 na Holanda. Os modelos desenvolvidos para ruptura de barragens de Graham (1999) e Brown & Graham (1988) fornecem valores relativamente baixos de perdas de vidas devido ao grande tempo de evacuação disponível. A aplicação das duas relações de estabilidade para pessoas em inundações resultou em um elevado número de fatalidades, pois se assume que todos os habitantes estão presentes no momento da inundação. A Tabela 3.8 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 3.8: Fatalidades calculadas por Jonkman *et al.* (2002) para uma inundação na Holanda

Modelo	Fatalidades	Fração da População
Waarts (1992)	23.792	6,6%
HKV (2000)	5.236	1,5%
Jonkman (2001)	2.074	0,6%
Brown & Graham (1988)	72	0,2% - 2,0%
Graham (1999)	720 – 7.200	0,02%
Abt <i>et al.</i> (1989)	36.461	10,1%
Lind & Hartford (2000)	87.564	24,3%

Fonte: Adaptado de Jonkman *et al.*, 2002.

Jonkman *et al.* (2002) relataram que as diferenças nos resultados entre os três grupos de modelos (modelos holandeses, modelos de rupturas de barragens e critérios de estabilidade) são muito grandes e que podem ser justificadas pelo fato de que diferentes características das inundações são relevantes na determinação da perda de vidas. Os autores afirmam que essa é a razão pela qual os modelos desenvolvidos para rupturas de barragens não podem ser aplicados diretamente para uma inundação costeira na Holanda e vice-versa.

Lang *et al.* (2011) compararam os modelos de perdas de Graham (1999), Reiter (2001) e HEC FIA por meio da análise de diversos cenários de ruptura hipotética de duas barragens de água da Austrália. Para a barragem denominada A, foram considerados os cenários de: inundação máxima provável, com e sem ruptura; de galgamento, também com e sem ruptura; e um dia normal (“*sunny day failure*”). Para a barragem denominada B os cenários foram os mesmos com exceção da consideração da cheia induzida por um evento de tempo de retorno de 100 anos substituindo o cenário de inundação máxima provável.

Lang *et al.* (2011) observaram que os modelos Graham (1999) e HEC-FIA foram mais adequados para estimar as perdas de vidas fornecendo estimativas semelhantes para ambos os casos. No entanto, os modelos apresentaram estimativas bastante diferentes para perdas de vidas nos cenários em que não eram considerados a ruptura da barragem, como demonstrado na Figura 3.25 e na Figura 3.26.

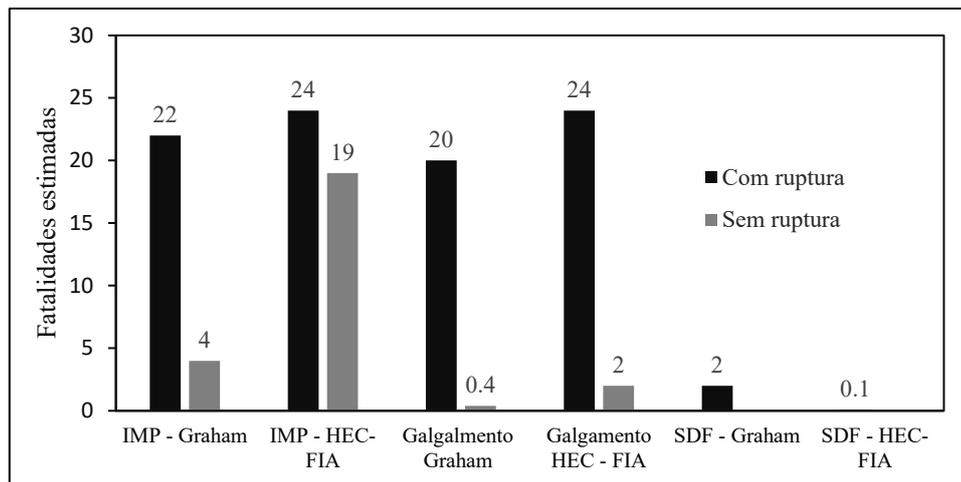


Figura 3.25: Estimativa de perdas de vidas obtidas por Lang (2011) para a barragem A

Fonte: Adaptado de Lang *et al.*, 2011.

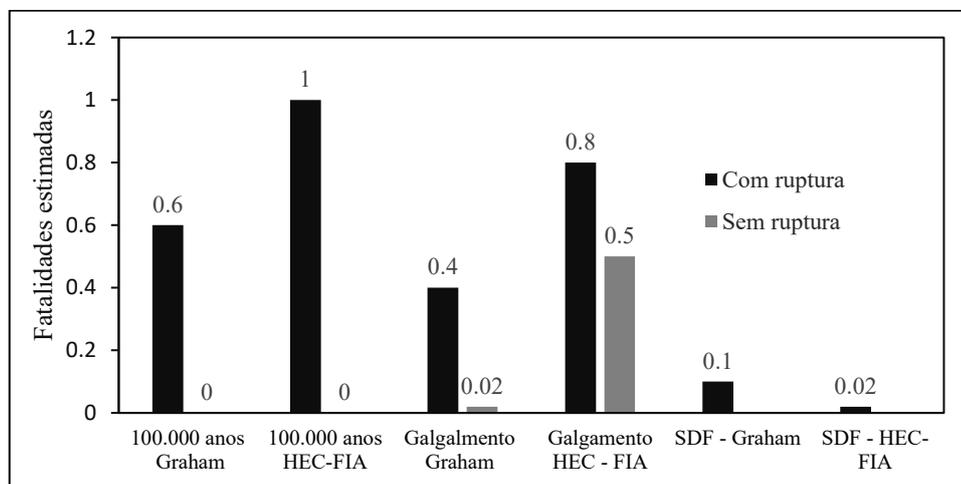


Figura 3.26: Estimativa de perdas de vidas obtidas por Lang (2011) para a barragem B

Fonte: Adaptado de Lang *et al.*, 2011.

Lang *et al.* (2011) verificaram que o modelo de Reiter (2001) utiliza um limiar muito abaixo do existente em Graham (1999) para separar áreas de baixa e média severidade da inundação. Com isso, a aplicação desse modelo gerou resultados muito maiores de perdas de vidas para o mesmo cenário de cheia. Assim, os autores não recomendam o uso desse modelo relatando que há a necessidade de mais desenvolvimento e testes, sendo que não há planos para que isso ocorra.

Di Mauro *et al.* (2012) utilizaram o evento ocorrido em 1953 na Holanda, mais especificamente em *Canvey Island*, para comparar três modelos de estimativas de perdas de vidas. Os modelos são: *Mortality Functions method* (JONKMAN *et al.*, 2008), *Flood Risk to People method* (PENNING-ROUSELL *et al.*, 2005) e *Life Safety Model* (JOHNSTONE *et al.*, 2004). Após

simulação e verificação de sensibilidade de cada modelo, os autores concluíram que os modelos concordam em ordem de grandeza com o número de fatalidades ocorridas. Foi observada ainda a concordância na estimativa especialmente em termos de localização de possíveis fatalidades. Segundo os autores, esse acordo entre os resultados desses modelos, em termos de ordem de grandeza e de localização das fatalidades, demonstram a coerência entre os três métodos e, portanto, contribui para agregar confiança no uso. Embora desenvolvidos em países muito diferentes e para diferentes tipos de inundação, os autores afirmam que esses modelos dependem fortemente das características da inundação, e que isso possivelmente explica a coerência dos resultados. A Tabela 3.9 apresenta os resultados da estimativa de cada modelo indentificado o local das fatalidades.

Tabela 3.9: Número e local das fatalidades estimadas Di Mauro *et al.* (2012) em *Canvey Island* devido à inundação de 1953 ocorrida na Holanda

Evento/Modelo	Número de fatalidades	Local das fatalidades
Evento de 1953	58	Principalmente na parte nordeste da ilha
<i>Mortality Functions method</i>	71	Principalmente na parte nordeste da ilha
<i>Flood Risk to People method</i>	18	Principalmente na parte nordeste da ilha
<i>Life Safety Model</i>	65	Principalmente na parte nordeste da ilha

Fonte: Adaptado de Di Mauro *et al.*, 2012.

Di Mauro *et al.* (2012) observaram que os modelos consideram diversos fatores relacionados às fatalidades causadas por inundações por meio de diferentes maneiras, o que possivelmente justifica as diferenças obtidas nos resultados. É destacado que a principal diferença está no modo como os modelos tentam abordar a disseminação do alerta, as características da área afetada e as características físicas das pessoas.

Di Mauro *et al.* (2012) ainda afirmam que o *Mortality Functions method* e o *Flood Risk to People method* são fáceis de aplicar e que sua sensibilidade é também de fácil exploração para fornecer limites de incerteza. Já o *Life Safety Model* requer muitos dados detalhados e, portanto, se torna mais difícil de configurar. O modelo também possui uma dificuldade na análise da sensibilidade e da incerteza. Por fim, os autores concluem que o *Mortality Functions method* e o *Flood Risk to People method* são modelos indicados para análises rápidas, de diversos cenários e para casos em que não há a disponibilidade de tantos dados sobre a região e evento. Já o *Life Safety Model* é indicado para o estudo do efeito de melhorias de alerta de inundação,

variando rotas de evacuação, melhorias de estruturas das construções e outras medidas não estruturais.

Jonkman *et al.* (2014) compararam modelos holandeses e norte-americanos para a análise de perdas de vidas em dois estudos de caso de ruptura hipotética de dique nos Estados Unidos, Bacia de Natomas e Dique Herbert Hoover. Foram utilizados os modelos de Jonkman *et al.* (2008), Katrina (uma variação de Jonkman *et al.* (2008)) e HEC-FIA, sem consideração da evacuação.

Jonkman *et al.* (2014) observaram, para o primeiro caso, que modelo HEC-FIA resultou em um número de fatalidades (18.412) muito maior do que os outros modelos (909 para Jonkman *et al.* (2008) e 2.815 para o Katrina). Os autores afirmam que tal resultado, nesse caso específico, é justificado pelo fato de a taxa de subida do nível d'água ser altamente sensível para o modelo de Jonkman *et al.* (2008) e da profundidade da água apresentar maior sensibilidade nos outros dois modelos.

Jonkman *et al.* (2014) observaram, para o segundo caso, uma inundação mais moderada, o que resultou em estimativa bem próximas entre modelos (120 para Jonkman *et al.* (2008), 240 para o Katrina e 300 para o HEC-FIA). Por fim, os autores destacam que, para o estudo, foram consideradas situações hipotéticas, sendo altamente recomendável testar ou validar vários modelos para inundações reais que ocorreram no passado.

Meneses *et al.* (2015), com intuito de verificar a aplicação do modelo RCEM, utilizaram esse modelo juntamente ao de Graham (1999) e HEC-FIA para cinco barragens para armazenamento de água localizadas na Austrália. Por semelhança com dados reais, os autores concluíram que o RCEM deve substituir o de Graham (1999) como recomendado pelo USBR, sendo que as diferenças observadas foram justificadas pelo fato de o modelo de Graham (1999) ser mais sensível a alterações no risco hidrodinâmico (DV) devido à presença de limiares para determinação da severidade da inundação (Figura 3.27 e Figura 3.28). A aplicação do modelo HEC-FIA foi indicada para situações nas quais as estimativas de perdas de vidas são provavelmente influenciadas por restrições de evacuação da população em risco e/ou onde proprietários de barragens estão avaliando a eficácia de medidas não estruturais.

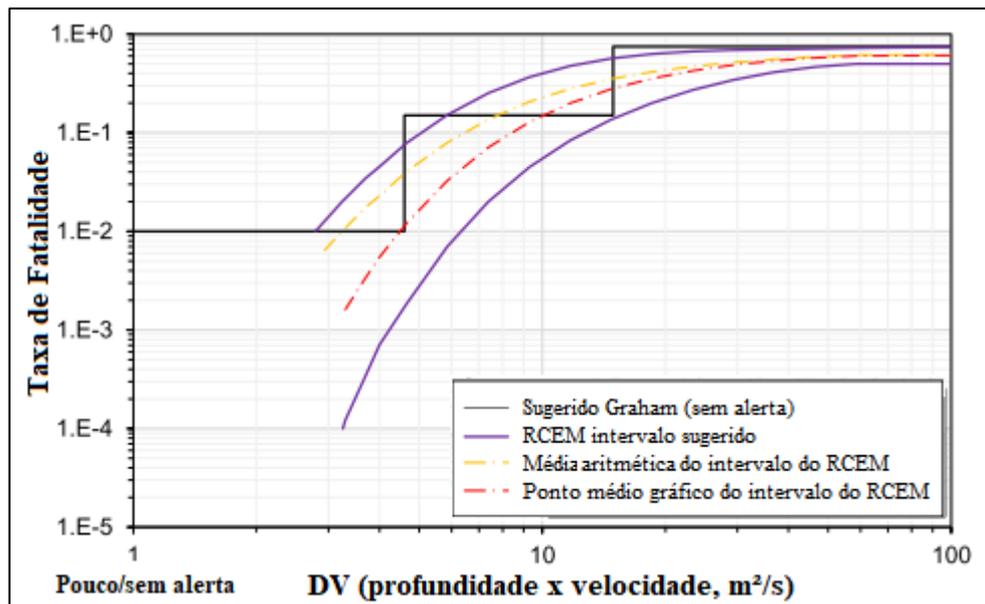


Figura 3.27: Comparação entre taxas de fatalidade de Graham e RCEM para casos de pouco ou sem alerta

Fonte: Adaptado de Meneses *et al.*, 2015.

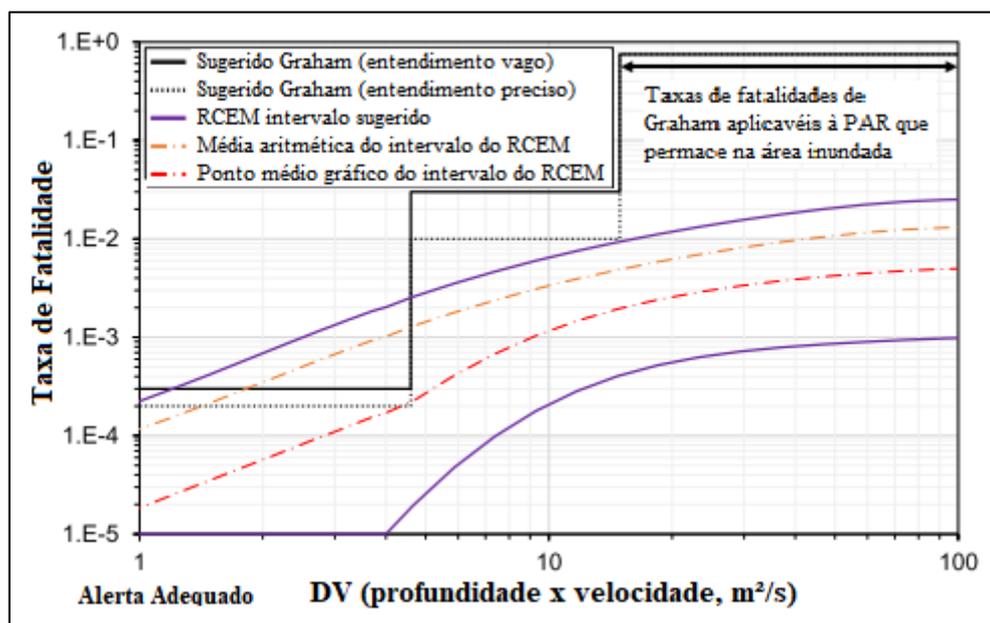


Figura 3.28: Comparação entre taxas de fatalidade de Graham e RCEM para casos de alerta adequado

Fonte: Adaptado de Meneses *et al.*, 2015.

Meneses *et al.* (2015) criticaram a subjetividade do modelo RCEM para determinação da taxa de fatalidade e do fator DV. Para o primeiro parâmetro é recomendada a utilização da média aritmética entre os limites sugeridos de aplicação com mostrado na Figura 3.27 e na Figura 3.28. Já para segundo, os autores, ao invés de dividirem área em diversos trechos, como recomendado por USBR (2015), estimam o DV por propriedade na região afetada. Por fim,

para aplicação do RCEM com estimativas consistentes de perdas de vidas, foi recomendado o fornecimento de orientações, por parte dos responsáveis pela fiscalização, sobre abordagens mais apropriadas para estimar os tempos de alerta, severidade de inundação e taxas de fatalidades.

Risher *et al.* (2017) aplicaram o modelo HEC–LifeSim para validação de uma inundação causada pela ruptura de um dique ocorrida em Joso no Japão em 2015. Foram utilizados dados censitários para caracterização das construções e da população em risco. Para execução do modelo, foram analisados dois diferentes critérios de estabilidade de construções, USACE (1985) e RESCDAM (2000). A Tabela 3.10 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 3.10: Resultados do evento observado e simulado por Risher *et al.* (2017)

Resultado	Evento	Simulado (RESCDAM)	Simulado (USACE)
Perda estrutural total	10-11 casas, 23-44 outros	7 casas, 19 outros	7 casas, 25 outros
Danos da inundação	5.256 casas		6.110 casas
População	31.400		33.219
População em risco	22.000 (70%)		21.163 (63%)
População alertada	30.399 (97%)		21.021-21.108 (63%-64%)
População evacuada	22.100 (70%)		10.427-11.466 (31%-35%)
População abrigada	5.519 (18%)		N/A
População resgatada	4.268		N/A
População exposta	9.000 (29%)		10.146 (30%)
Fatalidades	2	20 - 37	28 - 45

Fonte: Adaptado de Risher *et al.*, 2017.

Risher *et al.* (2017) observaram uma superestimação em uma ordem de grandeza de fatalidades. Tal resultado é justificado pelo número muito menor de pessoas evacuadas na simulação (31 - 35%) em comparação ao evento ocorrido (70%). Foram realizados testes diminuindo o tempo para mobilização da população, mas os resultados continuaram a apresentar um número muito baixo de pessoas evacuando. Por fim, os autores afirmam que o modelo apresenta limitações para representar a evacuação em situações em que o tempo de chegada da onda de inundação é muito curto.

Hill *et al.* (2018) compararam a estimativa de perdas de vidas entre os modelos HEC-LifeSim e RCEM para cinco barragens de acúmulo de água da Austrália de diferentes características de estruturas e do vale jusante. Em todas as barragens, a mediana da estimativa de fatalidades do HEC-LifeSim foi maior comparada ao RCEM em situações em que há:

- uma concentração de população em risco significativa próxima da barragem;
- ondas de inundação rápidas, podendo limitar o tempo disponível para população em risco receber e agir sobre uma ordem de evacuação;
- alta severidade de inundação causando a destruição de edifícios; e
- elevados volumes de tráfego que limitam a capacidade de evacuação na rede rodoviária.

Hill *et al.* (2018) ainda avaliaram os benefícios de um menor tempo de aviso para uma das barragens no HEC- LifeSim e verificaram uma diminuição no quantil de 50% de 600 fatalidades para aproximadamente 240 perdas de vidas. É destacado ainda que, para alguns casos, alertas antecipados podem causar mais fatalidades que alertas mais tardios, visto que uma determinada população que não está na área de risco pode adentrar nessa área durante o processo de evacuação (Figura 3.29).

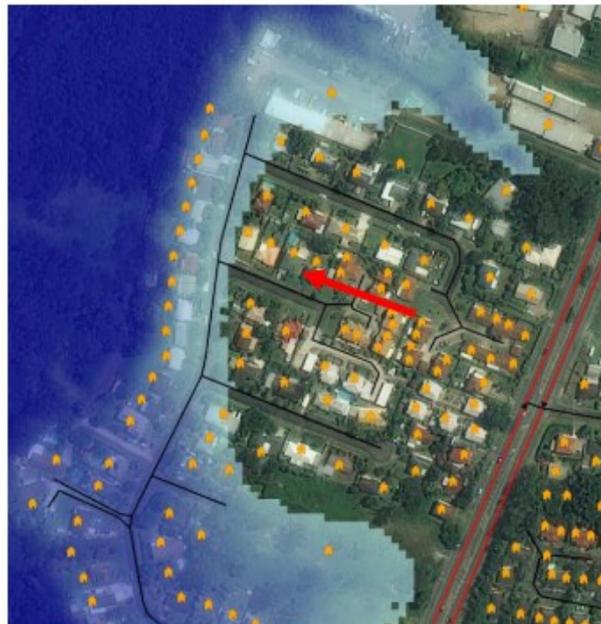


Figura 3.29: Exemplo de população que deverá entrar na área de inundação durante o processo de evacuação

Fonte: Hill *et al.*, 2018.

Hill *et al.* (2018) concluíram que modelos empíricos desenvolvidos por meio de dados históricos de rupturas apresentam diversas limitações, particularmente quando a evacuação pode ser restringida. É afirmado que a possibilidade de expressar a incerteza em parâmetros chaves da evacuação é uma grande vantagem do HEC-LifeSim, podendo o modelo ser bastante eficaz no desenvolvimento e análise de planos de emergências.

Matos & Eleutério (2019), por meio de uma análise prospectiva, aplicaram o HEC-LifeSim para estimativa de perdas de vidas consequentes da ruptura da barragem de rejeitos de Fundão em Mariana – MG. Foram simulados diversos cenários adotando horários diferentes de rupturas (dia e noite) e diversificados sistemas de alerta. Para cada cenário diferente do cenário base, foi-se antecipando em uma hora a emissão do alerta para evacuação da população.

Matos & Eleutério (2019) destacam a importância do sistema de alerta para a prevenção de perdas de vidas, uma vez que foi observada uma redução de até 85% das fatalidades calculadas para o cenário denominado 5 (Figura 3.30), no qual foi considerado que o alerta foi emitido quatro horas antes do rompimento.

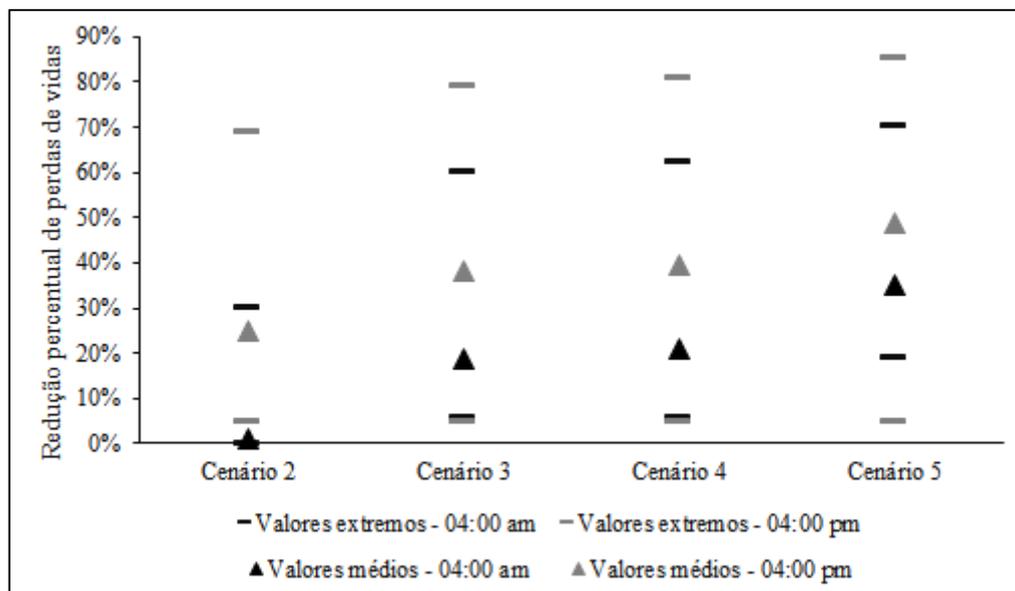


Figura 3.30: Redução percentual das perdas de vidas provocadas pela inundação proveniente da ruptura da barragem de Fundão para os cenários 2, 3, 4 e 5 em relação ao cenário base, considerando-se os valores médios e de limite inferior e superior, às 4:00 am. e às 4:00 pm.

Fonte: Adaptado de Matos & Eleutério, 2019.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia consiste nas cinco etapas sintetizadas a seguir e detalhadas nas seções subsequentemente:

- escolha dos estudos de caso;
- modelagem hidrodinâmica;
- análise de vulnerabilidade e exposição;
- modelagem de perdas de vidas; e
- análise de sensibilidade.

4.1 *Escolha dos estudos de casos*

Foram utilizados dois critérios para seleção dos estudos de casos. Primeiro, a disponibilidade de dados relativos aos acidentes e segundo, a diferença em termos de quantidade de fatalidades para investigar a resposta e as limitações dos modelos preditivos de estimativa de perdas de vidas para diferentes níveis de risco observados.

Foram escolhidos dois casos de ruptura de barragens de rejeitos de mineração em Minas Gerais: São Francisco (Mirai) e Fundão (Mariana). Além da disponibilidade de dados, com o estudo de retroanálise de Rocha (2015) e Machado (2017), para Mirai e Mariana, respectivamente, a análise desses casos também possibilita a verificação da resposta e das limitações dos modelos para estimativa de perdas de vidas de diferentes ordens de grandeza, desde nenhuma em Mirai e 19 pessoas entre vítimas fatais e desaparecidos em Mariana (WISE, 2020).

4.2 *Modelagem hidrodinâmica*

A modelagem hidrodinâmica é o primeiro passo para estimativa de fatalidades. Todas as etapas seguintes na modelagem de perdas de vidas são dependentes do resultado da propagação da onda cheia. Logo, a acurácia dos resultados obtidos da simulação da inundação é de extrema importância para credibilidade das estimativas de fatalidades.

Para obtenção das características da inundação de rejeitos foram seguidos os seguintes tópicos:

- determinação do hidrograma de ruptura;
- caracterização topográfica do reservatório e do vale de jusante;
- determinação do uso e ocupação do solo do vale de jusante; e
- simulação da propagação da onda de rejeitos.

4.2.1 Hidrograma de ruptura

O hidrograma relacionado à ruptura de barragens é caracterizado pela rápida ascensão até um valor elevado na descarga líquida e na subsequente depleção lenta até valores reduzidos na descarga. Seus valores excedem significativamente valores relacionados a hidrogramas de cheias naturais (MASCARENHAS, 1990).

Para obtenção desse tipo de hidrograma, é necessário conhecimento da geometria e tempo de formação da brecha e da vazão de pico. Segundo USACE (2014), a brecha de ruptura possui um formato trapezoidal. Os parâmetros dessa formação da brecha (Figura 4.1) são: o volume de água no instante inicial da ruptura (V_w), o tempo de formação total da brecha (t_f), os coeficientes de declividade lateral ($V:H$), a largura da base inferior da brecha (W_b), a largura média da brecha (B_{ave}), a altura final da brecha (h_b) e a altura do volume armazenado no reservatório no início da ruptura (h_w).

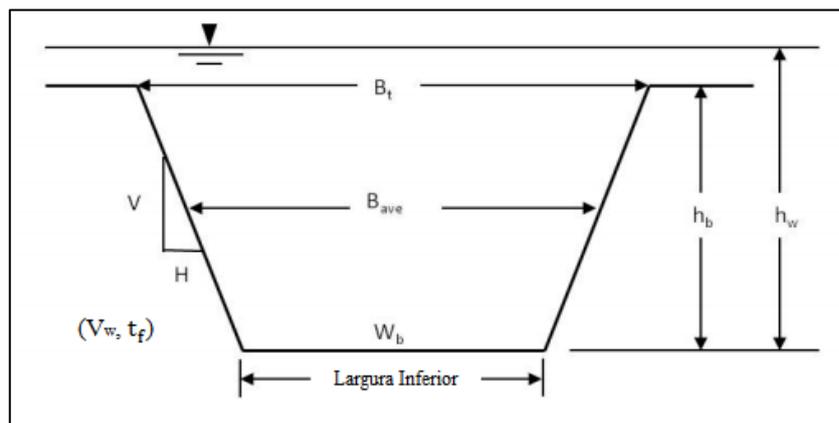


Figura 4.1: Parâmetro de formação da brecha de ruptura

Fonte: Adaptado de USACE, 2014.

As características de formação da brecha, de maneira *a priori*, podem ser definidas por modelos físicos, modelos paramétricos, equações de previsão e análises comparativas (USBR, 1988).

Dentre as possibilidades citadas, a mais presente em estudos na literatura são as equações de previsão.

Nesse caso, a geometria pode ser estimada por equações empíricas apresentadas em Von Thun & Gillette (1990), Froehlich (2008) e Xu & Zhang (2009). O tempo de formação pode ser obtido por relações empíricas propostas por Macdonald & Langridge-Monopolis (1984), Von Thun & Gillette (1990), Froehlich (2008) e Xu & Zhang (2009). E a vazão de pico pode ser caracterizada por equações empíricas sugeridas por Wahl (2004), Pierce *et al.* (2010) e Froehlich (2016).

Porém, como o intuito do trabalho foi avaliar o evento com as características reais ocorridas, foram utilizados os hidrogramas obtidos nos estudos de retroanálise de Rocha (2015) e Machado (2017).

4.2.2 Caracterização topográfica

A topografia foi obtida por meio do tratamento do modelo digital de elevação (MDE) disponível pelo sensor *Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar* (PALSAR) do satélite *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS), que possui resolução espacial de 12,5 metros. Tal tratamento só foi realizado para caso de Mariana, visto que, para Mirai, foi possível a obtenção do MDE utilizado Rocha (2015), que aplicou uma metodologia de tratamento semelhante à detalhada a seguir.

O talvegue extraído pelo MDE pode apresentar posicionamento divergente do curso d'água real. Nesse caso, há a possibilidade de a mancha calculada pela modelagem hidráulica não inundar o vale fluvial (ROCHA, 2015). Além disso, como afirmado por Paiva *et al.* (2011), o perfil de elevação desse talvegue não é coincidente com a correta cota de fundo do rio. Isso ocorre devido a erros sistemáticos relacionados à vegetação, efeitos das águas superficiais e erros aleatórios relacionados aos ruídos nos dados como representado na equação a seguir e ilustrado na Figura 4.2:

$$z_0 = Z_{MDE}(x) - H(x) - H_{veg}(x) - \varepsilon(x) \quad (4.1)$$

na qual: z_0 é cota de fundo do rio (m); $Z_{MDE}(x)$ é a elevação do MDE (m); $H(x)$ é o nível d'água do rio (m); $H_{veg}(x)$ é altura efetiva da vegetação (m) (diferente da altura real da

vegetação, uma vez que a faixa C do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) e L do ALOS penetram no dossel até certo ponto); e $\varepsilon(x)$ é o erro aleatório.

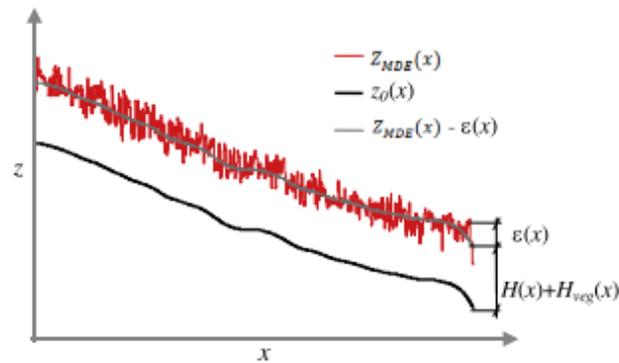


Figura 4.2: Perfil longitudinal do rio extraído do MDE, apresentando dados originais (vermelho), da linha de água com correção dos ruídos (cinza) e nível estimado do fundo do rio (preto).

Fonte: Paiva *et al.*, 2011.

A elevação do MDE pode se aproximar do nível d'água ou pode apresentar maior influência da altura da vegetação. Em geral, a elevação obtida a partir dos dados do MDE é próxima à do nível d'água nos rios com maiores larguras. Em rios estreitos, a cota obtida pelo MDE está mais semelhante à elevação do dossel da vegetação adjacente ao rio. Para demonstrar essas características, a Figura 4.3 apresenta a influência da vegetação, da largura do curso d'água e da resolução espacial na determinação da elevação do perfil longitudinal extraído do MDE.

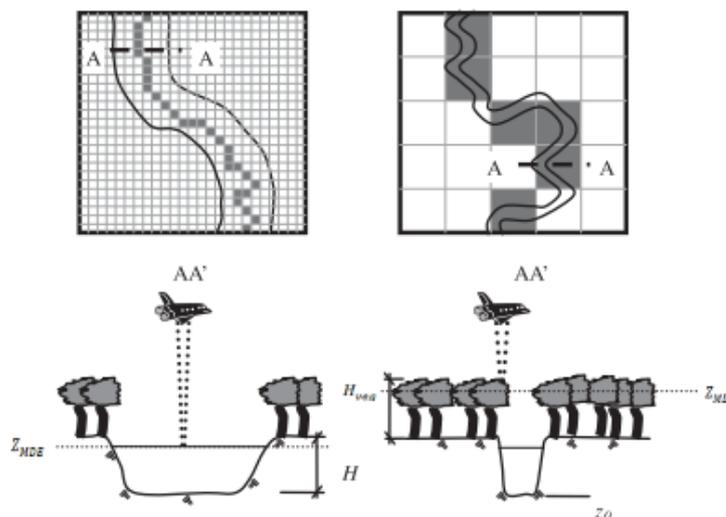


Figura 4.3: Relação entre a largura do rio, a resolução espacial e os erros nos dados MDE devido aos efeitos da vegetação e do nível da água

Fonte: Paiva *et al.*, 2001.

Com isso, houve um processo de tratamento desse MDE pelo condicionamento e inclusão da calha do rio existente, que foi extraída por imagem de satélite anterior ao rompimento, por meio do algoritmo AGREE (HELLWEGER & MAIDMENT, 1997), disponibilizado no módulo ArcHydro (MAIDMENT, 2002) do *software* ArcGIS 10.5.1, com licença estudantil. Esse método consiste na diminuição das elevações das células do MDE que interseccionam com o perfil longitudinal do rio. Para isso, é necessário definir os seguintes parâmetros:

- *stream buffer*: é o número de células em torno da hidrografia em que a suavização ocorrerá;
- *smooth*: é o valor (em unidades verticais) que o rio será suavemente aprofundado e interpolado com as células da área do *buffer*; e
- *sharp*: é o valor adicional (em unidades verticais) que o rio será bruscamente aprofundado, não ocorrendo a suavização.

Os parâmetros apresentados foram definidos pela análise de dados de topobatimetria das regiões afetadas.

Por fim, os ruídos aleatórios foram eliminados por um dos métodos de correção proposto por Yamazaki *et al.* (2012), o qual consiste em percorrer o perfil longitudinal comparando as cotas ponto a ponto. Nesse caso, se a elevação de jusante for maior que a de montante, a cota do ponto de jusante é igualada à elevação de montante (Figura 4.4).

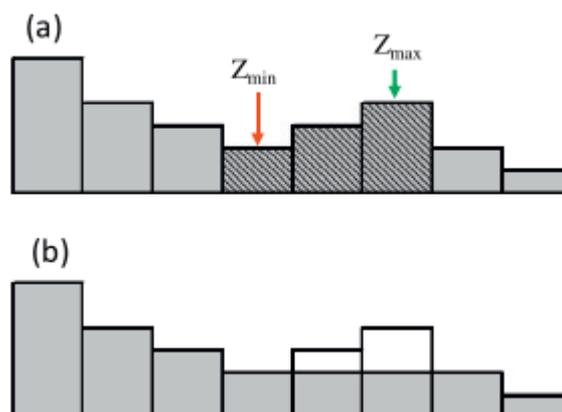


Figura 4.4: Demonstração da correção dos ruídos. a) o perfil de longitudinal sem correção dos ruídos; b) o perfil longitudinal pós correção

Fonte: Adaptado de Yamazaki *et al.*, 2012.

4.2.3 Uso e ocupação do solo – coeficientes de rugosidade

A obtenção do uso e ocupação do solo da região afetada possuiu como intuito a atribuição dos coeficientes de *Manning*. Para isso, foi realizada a classificação do uso e ocupação do solo por meio de imagens do programa Landsat anteriores aos acidentes.

A classificação ocorreu no *software* ArcGIS 10.5.1, com licença estudantil, pelo método de Máxima Verossimilhança e o número de *Manning* foi determinado por meio da associação das classes de uso e ocupação do solo com os valores recomendados para planícies de inundações pelo *Natural Resources Conservation Service* (NRCS, 2016) (Tabela 4.1).

Tabela 4.1: Coeficientes de *Manning* para as classes de uso e ocupação do solo adotadas

Uso do solo	Coeficiente de <i>Manning</i>
Vegetação densa	0,160
Vegetação esparsa	0,035
Solo exposto/Afloramento rochoso	0,025
Área urbanizada	0,100

Fonte: NRCS, 2016.

Para modelar a resistência do fluxo de rejeitos, foi utilizada a técnica de coeficiente de resistência combinada (JIN & FREAD, 1999), na qual há uma alteração do coeficiente de *Manning* em função da viscosidade cinemática do rejeito pela Equação 3.9 apresentada por Travis *et al.* (2012).

Essa técnica só foi aplicada para o estudo de caso de Mariana. Em Mirai, foi observado, por meio do estudo de reologia, um teor de sólidos inferior a 20% e, logo, o fluxo foi considerado aquoso.

A viscosidade cinemática foi obtida pelo estudo reológico realizado por Machado (2017) em dois pontos do acidente de Mariana. As curvas reológicas da Figura 4.5 apresentam o valor da viscosidade dinâmica em função da concentração volumétrica de sólidos. Para o presente estudo, foi considerada a curva do Ponto 1, por essa possuir um maior coeficiente de determinação.

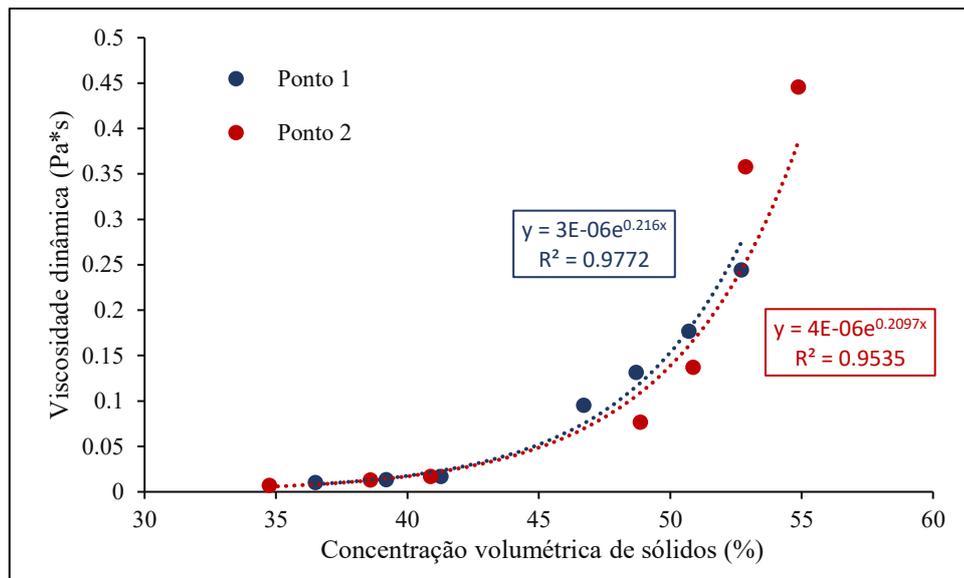


Figura 4.5: Curvas reológicas obtidas por Machado (2017) no acidente de Mariana

Fonte: Adaptado de Machado, 2017.

Para obtenção da viscosidade cinemática por meio da viscosidade dinâmica, foi utilizada a Equação 4.2. A massa específica considerada foi a mesma utilizada por Machado (2017), equivalente a 3.000 kg/m³.

$$v = \mu/\rho \quad (4.2)$$

na qual: v é viscosidade cinemática (m²/s); μ é a viscosidade dinâmica em (Pa*s); e ρ é a massa específica (kg/m³).

4.2.4 Propagação da onda de rejeitos

O modelo utilizado para propagação da onda de rejeitos foi o HEC-RAS 5.0.7, 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 HEC-LifeSim.

Como visto na seção 3.1.2.1, as equações conservação de momento (Equações 3.2 e 3.3) de *Saint-Venant* podem ser simplificadas resultando no modelo de onda difusiva (Equação 3.4). Porém, essa simplificação não foi utilizada neste estudo pelo fato de não ser recomendada para ondas de inundações altamente dinâmicas, como nos casos de rupturas de barragens.

Segundo USACE (2016a), a variação de velocidade nessas situações pode ser altamente drástica no espaço e tempo e a simplificação de onda difusiva não inclui os termos da aceleração local (mudança de velocidade em relação ao tempo) e da aceleração convectiva (mudança de velocidade em relação ao espaço).

Objetivando a estabilidade do modelo, a condição de *Courant* (Equação 3.5) foi utilizada para determinação do intervalo computacional. Para execução do modelo, são necessárias ainda as informações de condições de contorno a montante e a jusante. Para este estudo, foram utilizados o hidrograma de ruptura e a profundidade normal, para montante e jusante, respectivamente. Visando evitar influências da condição de contorno de profundidade normal na propagação da onda de cheia, o trecho de estudo foi alongado para além da região de interesse para o presente estudo.

4.3 Análise de vulnerabilidade e exposição

Essa etapa foi realizada com objetivo de elaborar um inventário de construções caracterizando e apresentando as estruturas e a população em risco presentes nas regiões afetadas pelas inundações. Para tal, foram utilizados os recortes estatísticos e microdados do Censo demográfico de 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

4.3.1 Recortes estatísticos

A população e quantidade domicílios foi determinada pelo produto *grade estatística*, que é um conjunto de grades regulares com intuito de integrar dados de origens diversas e agregados em unidades geográficas incompatíveis (IBGE, 2016).

A menor unidade geográfica de resultados do Censo é o setor censitário, o qual não possui uma forma homogênea. Assim, por meio de processos estatísticos de agregação e desagregação, informações contidas nesses setores censitários são transferidas para áreas de 1 km x 1 km em zonas rurais e 200 m x 200 m em zonas urbanas, homogêneas e sem variação ao longo do tempo (IBGE, 2016).

O processo de agregação é caracterizado pela soma de dados básicos que se encontram dentro da unidade desejada seguindo uma regra espacial de inclusão, ou seja, os domicílios representados espacialmente por pontos que se encontram dentro de uma determinada área são

somados. Porém, por diversos fatores, como malha viária incompleta, falhas operacionais e/ou técnicas, há uma quantidade significativa de registros do censo sem informação de localização.

Por isso, a necessidade de aplicação do processo de desagregação, que transfere, por meio de métodos dasimétrico ou de ponderação (os quais serão mais detalhados a seguir), os dados existentes em um suporte espacial para outro suporte espacial, por meio da criação de um denominador espacial comum entre as unidades de origem e de destino (IBGE, 2016). Para o processo de decisão na escolha de qual método utilizar para elaboração da grade, o IBGE se baseou no estudo de Bueno (2014), que é e descrito a seguir e apresentado na Figura 4.6.

Para decisão da utilização do processo de agregação ou desagregação, foi definido o limiar de ausência de localização. Para cada setor censitário, foram obtidas a porcentagem de quantidade de domicílios com localização por meio da relação entre o número de registros no banco de microdados e a quantidade de registros localizados espacialmente por consultas em bases geográficas, bases de endereços e dados coletados (IBGE, 2016).

Assim, nos setores censitários em que a ausência de localização foi inferior a 50%, foi adotada a agregação de dados. Para valores superiores a 50%, a abordagem de desagregação foi a escolhida. Assumindo essas hipóteses, a perda de dados foi inferior a 5%, valor considerado aceitável face às circunstâncias existentes (IBGE, 2016).

Em relação ao método de desagregação, o método dasimétrico utiliza dados auxiliares de malha viária ou de uso e ocupação do solo para determinação da população. Já a ponderação zonal é aplicável para situações em que não há nenhuma informação suficiente para estimativa. A aplicação consiste na utilização da densidade da variável na unidade de origem (setor censitário) para a realocação na unidade de destino (célula da grade estatística) (IBGE, 2016).

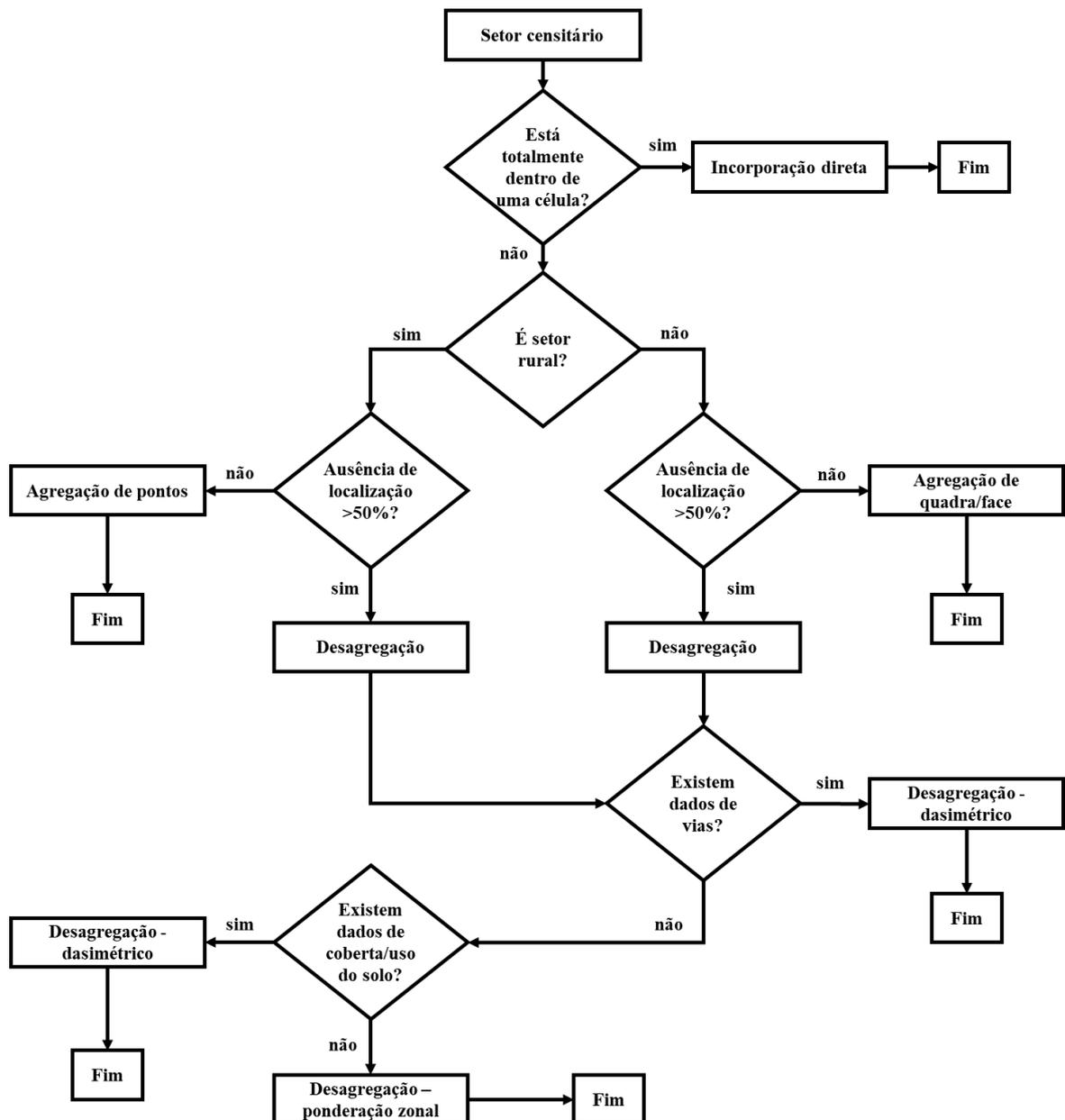


Figura 4.6: Árvore de decisão para escolha da abordagem e da técnica de desagregação aplicada na alocação dos domicílios e da população na *grade estatística*

Fonte: Adaptado de Bueno, 2014.

Neste estudo, para cada grade presente na região afetada pela inundação, foram alocadas geograficamente as residências com auxílio de imagens de satélite e a população por domicílio foi considerada de forma homogênea em toda extensão dessa grade.

As demais tipologias de construções foram obtidas por meio da análise dos mapas e descritivos dos setores censitários, os quais descrevem cada setor censitário, apresentando, além de construções diferentes de domicílios, descrições do perímetro e informações adicionais. Para ilustrar, a Figura 4.7 apresenta um recorte de um mapa de setor censitário em Mirai (MG).

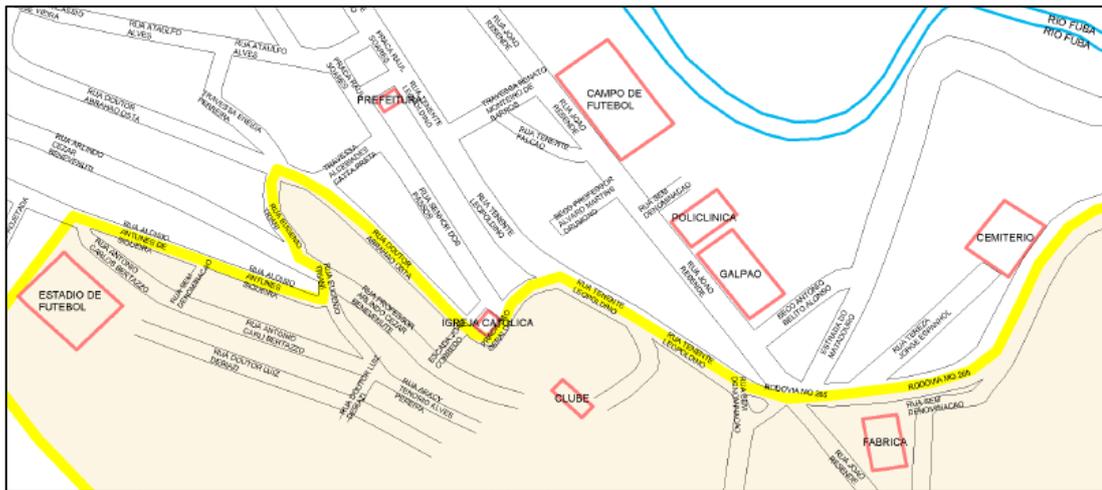


Figura 4.7: Recorte do mapa de um setor censitário de Miraflores de Goiás

Fonte: IBGE, 2010.

A população para essas demais tipologias de construção foi definida pela análise dos microdados, que será explicada a seguir.

4.3.2 Microdados

Para caracterização dos domicílios e da população obtidos pela análise da grade estatística, foram utilizadas as amostras existentes nos microdados do censo demográfico de 2010 (www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9662-censo-demografico-2010.html?edicao=9673&t=microdados). Foram utilizadas variáveis presentes nas amostras de domicílios e pessoas, cujas frações de amostragem (domicílios entrevistados em relação à quantidade total de domicílios dos municípios) foram especificadas considerando os tamanhos dos municípios em termos de população estimada em 1º de julho de 2009 (Tabela 4.2).

Tabela 4.2: Fração amostral dos domicílios visitados e número de municípios, segundo as classes de tamanho da população dos municípios em 1º de julho de 2009

Classe de tamanho da população dos municípios	Fração amostral dos domicílios visitados (%)	Número de municípios
Até 2.500	50	260
Mais de 2.500 a 8.000	33	1.912
Mais de 8.000 a 20.000	20	1.749
Mais de 20.000 a 500.000	10	1.604
Mais de 500.000	2	40
Total	11	5.565

Fonte: IBGE, 2011.

Por questões de sigilo em relação aos informantes da pesquisa, a menor unidade geográfica para identificação dos microdados é a área de ponderação, a qual é formada por agrupamento de setores censitários (IBGE, 2010). Com isso, os resultados obtidos considerando as áreas de ponderação de interesse foram arranjados de maneira proporcional e distribuídos de forma homogênea na região afetada.

As variáveis utilizadas foram selecionadas por meio do dicionário de descrição das variáveis do Censo de 2010 (IBGE, 2010) e foram organizadas no *software* Stata 11.

Cada elemento da amostra foi multiplicado pelo seu peso amostral para representação da população. A seguir são apresentadas as considerações adotadas nas amostras de domicílios e pessoas para caracterização dos domicílios e da população.

4.3.2.1 Amostra de domicílios

Com a amostra de domicílios, foi possível determinar o material de construção e tipo de ocupação. Os materiais de construção considerados foram alvenaria e madeira. As tipologias de ocupação adotadas com os respectivos códigos equivalentes apresentados por Gutenson *et al.* (2018) e utilizados pelo HEC-LifeSim são exibidas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Tipos de ocupação utilizados para caracterização dos domicílios

Tipo de ocupação	Descrição
RES1	Residencial unifamiliar
RES4	Alojamento temporário
RES5	Dormitório institucionais
RES6	Asilo ou orfanato

4.3.2.2 Amostra de pessoas

Com a amostra de pessoas, foi possível determinar a população presente em casa no período da noite e da tarde. Para a população à noite, foi utilizada a variável de retorno para casa. Para a população à tarde, foram utilizadas variáveis de posição do trabalho, de local de trabalho e de educação. A estimativa de população durante o período do dia considerou os seguintes aspectos presentes nas variáveis utilizadas:

- pessoas que não trabalham;

- pessoas que realizam trabalho doméstico no município;
- pessoas que trabalham no domicílio; e
- pessoas que estudam de manhã (adotado do sexto ano do fundamental até o terceiro ano do ensino médio) e que não trabalham.

Em relação a outras tipologias de construções, foram utilizadas variáveis relacionadas ao tipo de ocupação e atividade da pessoa. Especialmente para escolas, foram consideradas também pessoas que estudam do primeiro ao quinto ano e que frequentam creche e maternal. Nesses casos, devido ao horário comercial, a população foi alocada somente no período do dia.

Para todas as considerações adotadas, foi utilizado também o critério de mobilidade, separando a população com menos e mais de 65 anos. Os *scripts* utilizados no Stata 11 para seleção das variáveis das amostras dos microdados e para caracterização da população e das construções por meio das hipóteses adotadas são apresentados no APÊNDICE A e APÊNDICE B, respectivamente.

4.4 Modelagem de perdas de vidas

Para estimativa de perdas de vidas, com intuito de avaliação das diferenças existentes em modelos com abordagens distintas, foram aplicados os modelos RCEM e HEC-LifeSim, cujas características mais específicas são apresentadas nas seções 3.2.2.3 e 3.2.2.4.

Essa etapa constituiu na construção de um cenário base para cada modelo de estimativa de perdas de vidas e os resultados obtidos foram comparados às características de cada evento ocorrido.

4.4.1 RCEM

As diretrizes apresentadas no guia de USBR (2015) e exemplos de aplicação do modelo apresentados em USBR (2014b) sugerem que a extensão da inundação seja dividida em trechos tanto a montante quanto a jusante através da planície de inundação para explicar as diferenças no risco hidrodinâmico (fator DV), tempo de alerta e características da população em risco. Entretanto, segundo Meneses *et al.* (2015), que analisaram a aplicação do RCEM, tal

metodologia introduz subjetividade na aplicação do modelo face à possibilidade de escolha de diversos números de trechos.

Os dados de resultados detalhados provenientes de modelagens bidimensionais possibilitam a determinação de velocidades e profundidades máximas em cada célula da grade inundada da área de estudo. Com isso, melhores estimativas de severidade (DV) podem ser obtidas pela sobreposição dessas camadas com variáveis hidráulicas. A combinação dessas camadas com dados vetoriais georreferenciados do censo permite a definição do parâmetro DV para toda população em risco (USDHS, 2011).

Sendo assim, a determinação do fator de severidade foi realizada com base na discussão do *United State Department of Homeland Security* (USDHS, 2011) e na metodologia utilizada por Meneses *et al.* (2015), a qual consiste na determinação do DV para cada propriedade dentro da área afetada pela inundação.

A escolha das faixas dos gráficos da Figura 3.14 e da Figura 3.15 a serem utilizadas para determinação da taxa de fatalidade também é algo que introduz subjetividade. A recomendação é a escolha da média aritmética entre os intervalos sugeridos (MENESES *et al.*, 2015). Porém, como se tinha conhecimento do evento ocorrido, a escolha se baseou nas informações disponíveis sobre o alerta existente. Além disso, ao invés da determinação de somente um valor determinístico, optou-se na escolha de um intervalo nos gráficos para obtenção de uma faixa de fatalidades.

Como o sistema de unidade utilizado nos gráficos da Figura 3.14 e da Figura 3.15, além de serem apresentados no sistema internacional, os resultados relacionados ao RCEM também foram apresentados no sistema de unidade americano para facilitar a interpretação e a ilustração.

4.4.2 HEC-LifeSim

Foram utilizados os seguintes dados de entrada no HEC-LifeSim: o pós processamento da simulação hidráulica realizada no HEC-RAS, o inventário de construções obtido na etapa de análise de vulnerabilidade e exposição, o sistema viário existente, os destinos adotados para evacuação e a caracterização do sistema de alerta.

Para o sistema viário, a malha foi obtida por meio da importação direta disponível no HEC-LifeSim do arruamento existente na base de dados do *OpenStreetMap*. Os destinos foram alocados em diversas regiões externas aos limites de inundações.

Para o sistema de alerta, como já se possuía um conhecimento prévio de como ocorreu o processo de evacuação nos dois casos analisados neste trabalho, a identificação da ameaça e os atrasos da linha do tempo do processo de alerta e de evacuação, definidos na tópico c) da seção 3.2.2.4, foram baseados na escolha de faixas de coeficientes por meio de recomendações de Sorensen & Mileti (2014a, 2014b e 2014c) e aplicados nas Equações 3.32, 3.33 e 3.34.

Com os coeficientes obtidos para cada equação, as curvas foram elaboradas pelo uso do *Warning and Mobilization Curve Generator 10.2* cedido por Jason Needham do USACE. No intervalo existente entre as curvas elaboradas para cada etapa do processo de evacuação, foi determinada uma tipologia de distribuição de probabilidade para representação da incerteza.

Ainda em relação ao alerta existente, a quantidade de veículos presente durante a evacuação é obtida pela taxa de ocupação desses veículos determinada pelo usuário. Essa taxa só é considerada para pessoas que evacuam em veículos, parâmetro que também é definido pelo usuário. Então, para os estudos de caso analisados, foi considerada uma taxa de ocupação de três pessoas por veículo e a população evacuando 50% a pé e 50% em veículos. A velocidade do veículo foi definida pelo modelo adaptado de Greenshields *et al.* (1935) (Figura 3.22) e a velocidade das pessoas que evacuaram a pé adotada foi a padrão existente no HEC-LifeSim de 4 mph (1,8 m/s).

Para representação probabilística do modelo, foram realizadas 1.000 interações considerando as incertezas definidas nas etapas do processo de evacuação e as distribuições de probabilidade de taxas de fatalidade para cada zona de inundação (Figura 3.23). Tal número foi escolhido por ser equivalente ao utilizado por Hill *et al.* (2018) na análise de perdas de vidas em casos de rupturas de barragens de água na Austrália.

Devido ao fato de a simulação realizada no HEC-LifeSim ser detalhada e dinâmica, foi possível avaliar influências das características das inundações e do processo de evacuação na estimativa de fatalidades da população em risco. A linha do tempo da Figura 4.8 ilustra essa relação.

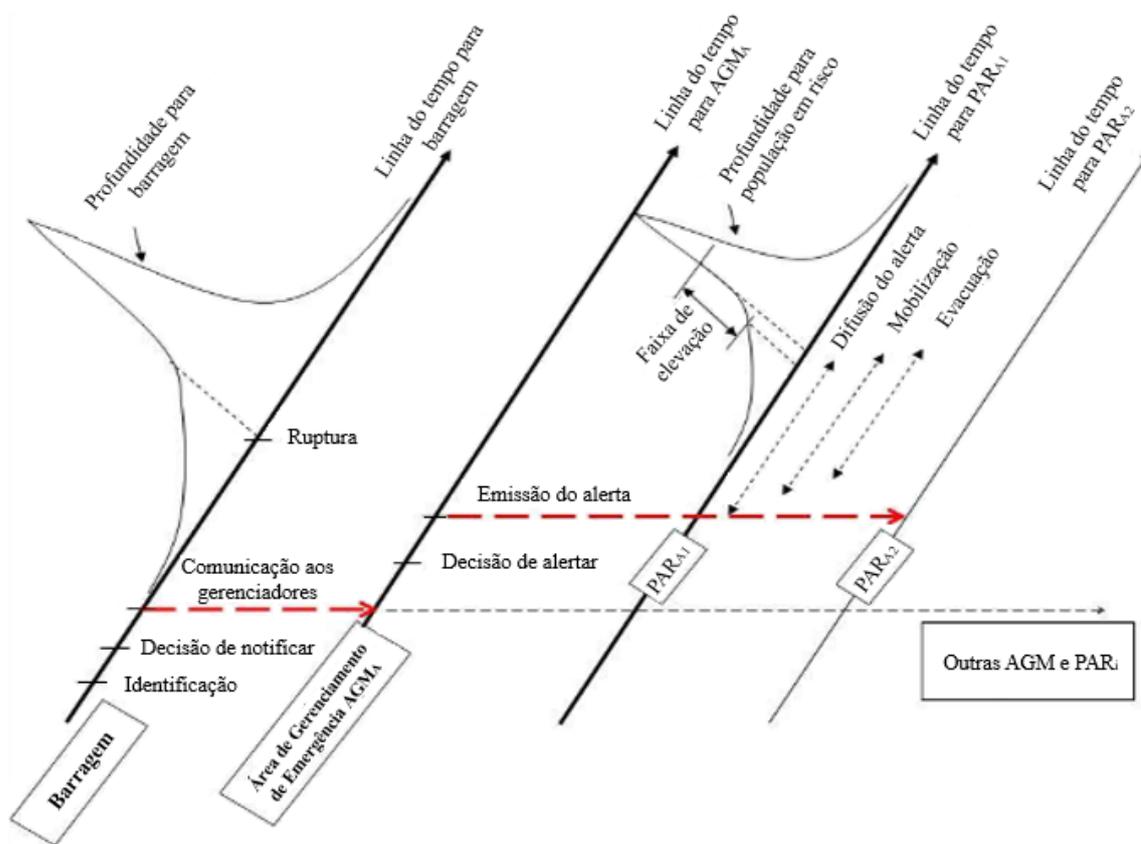


Figura 4.8: Relação da linha do tempo da inundação e da evacuação

Fonte: Adaptado de Aboelata *et al.*, 2002.

4.5 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade permite identificar e compreender quais parâmetros possuem mais impactos nas incertezas dos resultados da modelagem de inundações (MOEL *et al.*, 2012). Além dessa identificação de incertezas, as informações fornecidas pela análise de sensibilidade são altamente relevantes para auxílio de tomada de decisões em investimentos (GOULDBY *et al.*, 2010). Dentro do contexto de estimativa de perdas de vidas, por exemplo, a análise de sensibilidade pode ser utilizada para verificação do desempenho e escolha de medidas estruturais ou não-estruturais presentes no planejamento de emergência.

Em alguns estudos de aplicação de modelos de estimativa de perdas de vidas apresentados na seção 3.2.3, há a análise de sensibilidade destinada apenas à verificação de cenários com diferentes tempos de alerta. Neste trabalho, além dessa verificação do tempo de alerta, foram investigados impactos nas estimativas de perdas de vidas por meio da alteração de outros parâmetros chave dos modelos.

Para o RCEM, foram analisados os seguintes aspectos:

- utilização do gráfico e regiões da Figura 3.14 e da Figura 3.15 divergentes das usadas no cenário base; e
- aplicação da metodologia proposta por USBR (2015) para obtenção do DV, com a região afetada dividida em trechos e o DV determinado pelo valor médio da divisão entre vazão e largura da inundação no início e final do trecho.

Para o HEC-LifeSim, os aspectos analisados foram:

- consideração do período do dia oposto ao cenário base;
- verificação da influência do modo de evacuação com a alteração dos valores da porcentagem em intervalos de 25% da população que evacua a pé e em veículos;
- verificação do impacto do momento da identificação da ameaça (início da linha do tempo do alerta e da evacuação da Figura 3.17) por meio da análise de diversos momentos diferentes do cenário base; e
- utilização das curvas de atraso da emissão do alerta, difusão e mobilização propostas por Sorensen & Mileti (2014a, 2014b, 2014c), que já estão presentes no modelo e que foram descritas no tópico c) da seção 3.2.2.4.

5 ESTUDOS DE CASO

5.1 Barragem de São Francisco – Mirai/MG

O reservatório da barragem de rejeitos de São Francisco se localizava a oito quilômetros do centro urbano de Mirai, cidade localizada na Zona da Mata do estado de Minas Gerais (Figura 5.1), e era uma estrutura da Mineração Rio Pomba Cataguases Ltda. Os rejeitos armazenados eram provenientes do efluente gerado no processo de lavagem de bauxita (ROCHA, 2015).

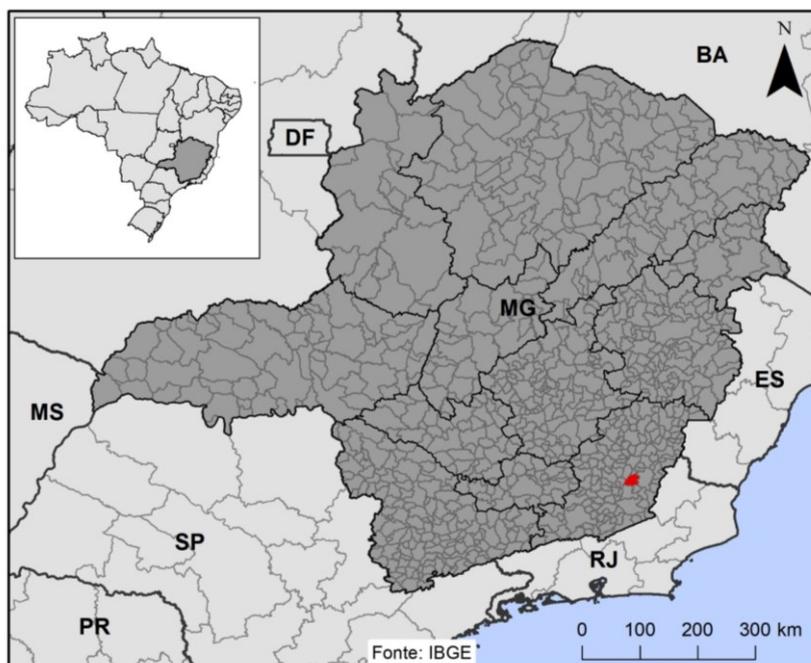


Figura 5.1: Localização do município de Mirai em Minas Gerais

Com altura de 34 metros na cota máxima igual a 477 metros, comprimento de 90 metros, largura da crista de nove metros e capacidade de 3,8 milhões de metros cúbicos, o barramento, constituído de aterro compacto de solo argilo-arenoso, foi construído por meio de três etapas distintas de alteamento (Figura 5.2) (ROCHA, 2015).



Figura 5.2: Vista da crista e do talude a jusante do reservatório São Francisco

Fonte: Adaptado de CAO-MA, 2006a *apud* Rocha, 2015.

O acidente de Mirai ocorreu em 10 de janeiro de 2007. Por volta das três horas da manhã, o nível de água se elevou rapidamente devido a uma forte chuva. A água começou a extravasar pela estrutura existente causando o seu colapso. A lama, que não era tóxica, se propagou pelo Rio Fubá até a confluência com o Rio Muriaé, causando mortandade de peixes e interrupção do abastecimento de água em diversas cidades (ROCHA, 2015). A Figura 5.3 apresenta o acidente de Mirai destacando as regiões de interesse para este estudo.

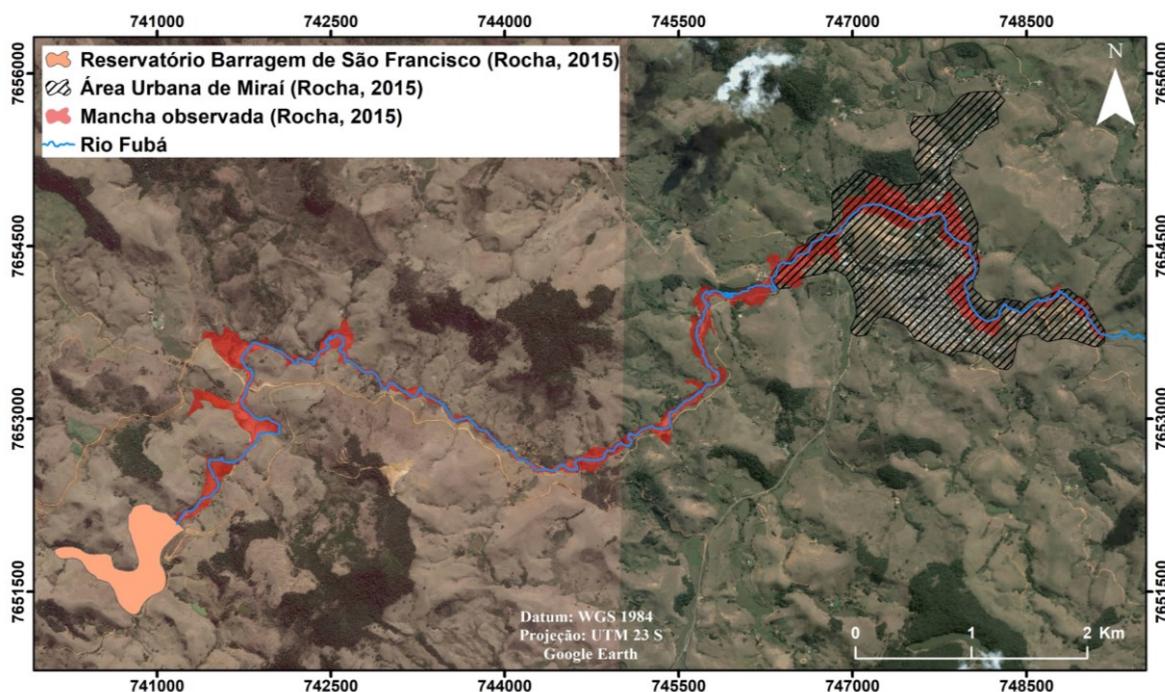


Figura 5.3: Região de interesse atingida pela inundação causada pela ruptura da barragem de São Francisco, Mirai - MG

Não há informações de ensaios de reologia para determinação do teor de sólidos no material propagado. Porém, em um incidente ocorrido em 2006 devido ao processo de alteamento do

barramento, verificou-se que a lama presente no reservatório possuía uma concentração volumétrica de sólidos de 12% (CAO-MA, 2006b *apud* ROCHA, 2015).

Não há registros sobre danos econômicos. Porém, por meio das curvas de danos empíricas de Machado *et al.* (2005) e do cenário base de propagação da cheia da retroanálise realizada por Rocha (2015), Veizaga *et al.* (2015) estimaram 22,6 milhões de reais de prejuízo em edificações.

Não foram observadas fatalidades no acidente ocorrido. Durante o período do evento de chuva, o vigia da barragem percebeu a subida rápida do nível de água na estrutura e notificou o perigo iminente de ruptura. Com isso, a Polícia Militar local, ainda durante a madrugada, percorreu as ruas da cidade de Mirafior orientando a evacuação da população (ROCHA, 2015).

5.1.1 Modelagem hidrodinâmica

O evento de chuva que ocasionou a ruptura da barragem de São Francisco apresentou uma altura de 121,3 mm e quatro horas de duração. Com a construção do hietograma de chuva pelo método de Huff (HUFF, 1967), determinação da chuva efetiva pelo método Curva Índice (CN) (NRCS, 1997) e transformação da chuva efetiva em escoamento superficial pelo método do hidrograma unitário sintético (NRCS, 1997), Rocha (2015) obteve o hietograma e o hidrograma afluente ao reservatório com 72 m³/s de vazão de pico apresentados na Figura 5.4.

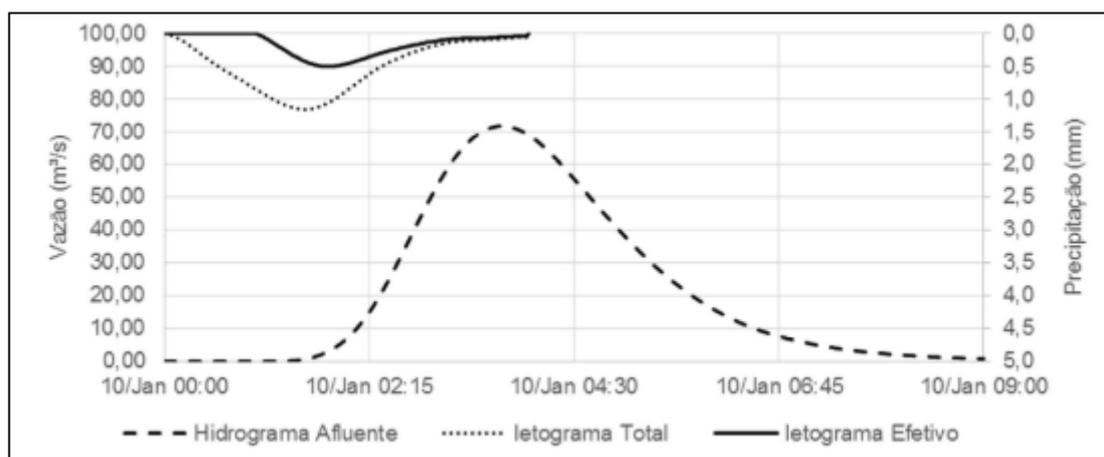


Figura 5.4: Hietograma e hidrograma afluente ao reservatório de São Francisco

Fonte: Rocha, 2015.

Por meio da reconstituição do acidente, foi definida uma brecha com 34 metros de altura, 70 metros de largura do topo, quatro metros de largura do fundo e com tempo de formação de

quatro horas e meia. Considerando o hidrograma afluente, a curva cota-volume, com 18% do material retido no reservatório, e as curvas cota-descarga do vertedouro, Rocha (2015) obteve o hidrograma de ruptura da Figura 5.5 com vazão de pico de 422 m³/s e tempo de pico de uma hora e 57 minutos.

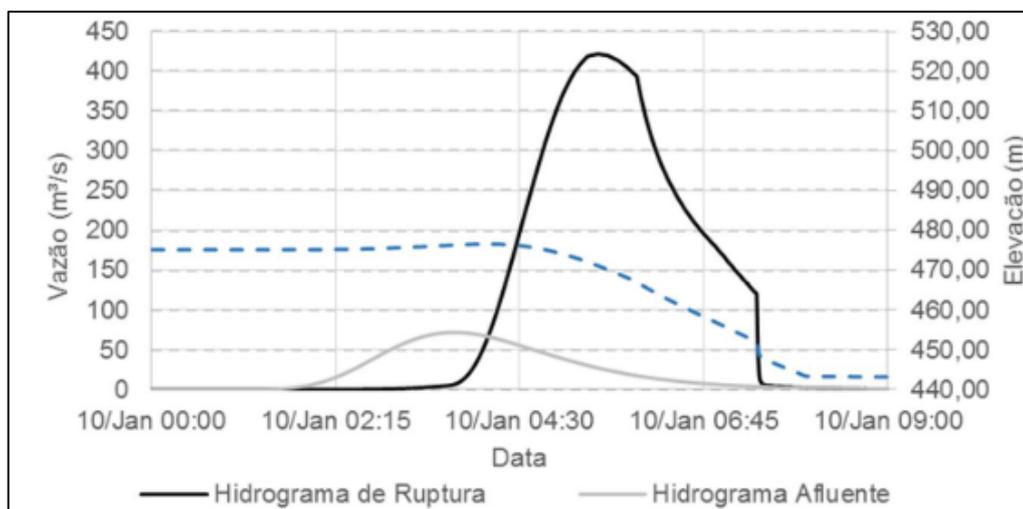


Figura 5.5: Hidrograma de ruptura e deplecionamento do reservatório de São Francisco

Fonte: Rocha, 2015.

Em relação ao MDE produzido por Rocha (2015), para este presente trabalho, apenas foram realizadas correções em locais que possuíam cruzamento de curvas de níveis.

O tratamento realizado por Rocha (2015) foi um procedimento semelhante ao descrito na seção 4.2.2 e apresentou como resultado uma redução média de erro do MDE comparado ao levantamento topobatimétrico de 3,6 metros para 1,2 metro. A Figura 5.6 ilustra o terreno e o rio utilizado na modelagem. A malha adotada foi de 10 metros com um refinamento de cinco metros para a região da calha do rio.

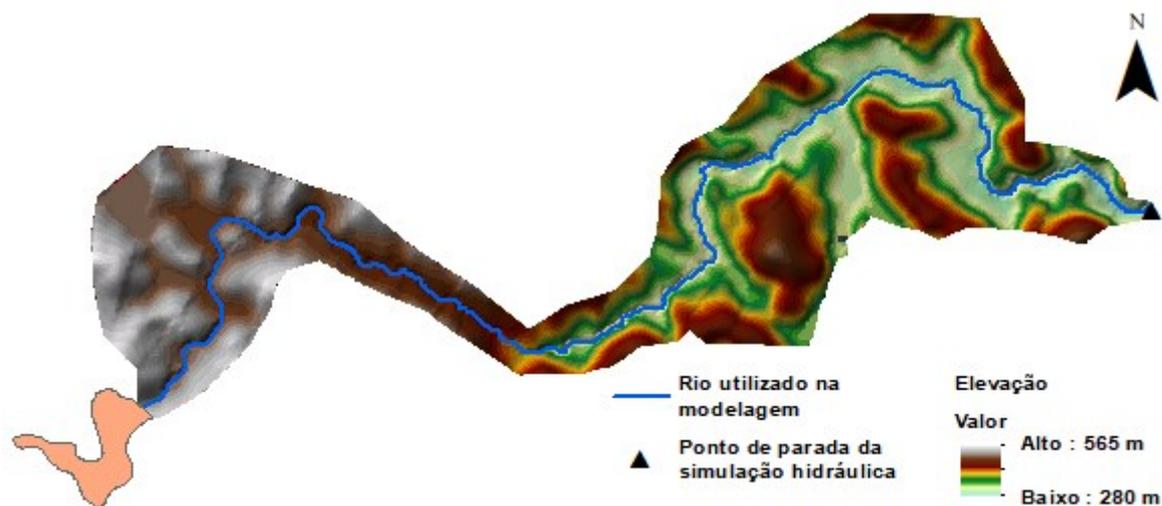


Figura 5.6: Topografia utilizada na modelagem em Miraflores

Como apresentado, estimou-se que os rejeitos propagados possuíam 12% de teor de sólidos. Com isso, a técnica de coeficiente de resistência combinada (JIN e FREAD, 1999) não foi aplicada para simular a resistência do fluxo pelo fato de o fluido ser classificado como aquoso, já que apresenta uma concentração volumétrica de sólidos inferior a 20% (O'BRIEN & JULIEN, 1985).

A imagem utilizada para classificação foi a do Landsat 5, órbita 217 e ponto 75, de 15/10/2005. A Figura 5.7 apresenta as classes de uso e ocupação do solo da região.

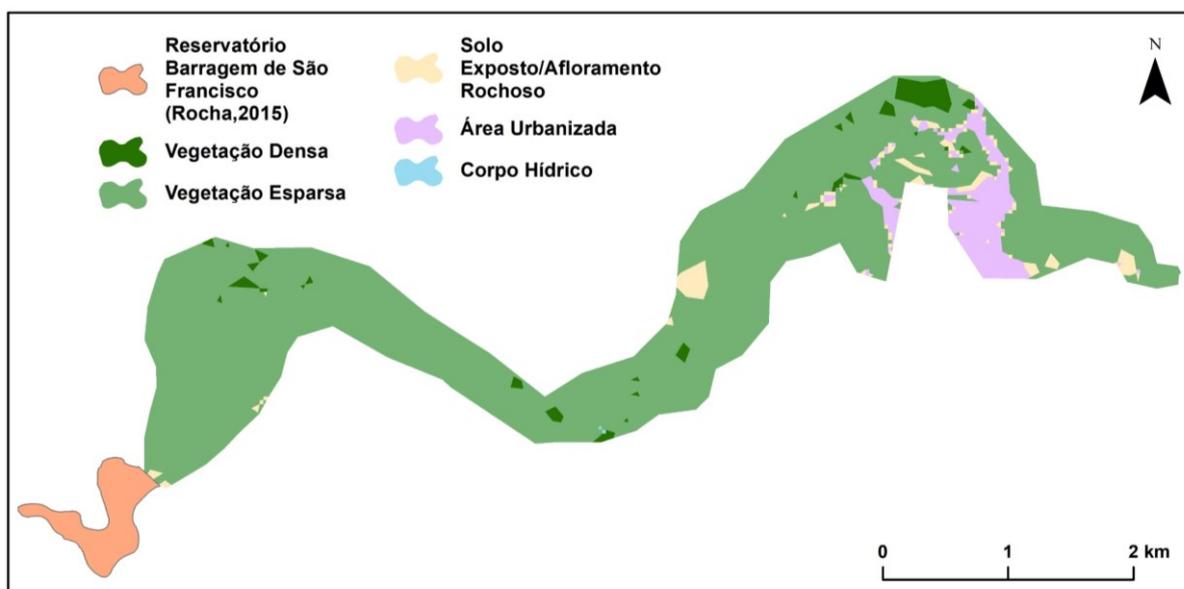


Figura 5.7: Classificação do uso e ocupação do solo da região afetada de Miraflores com base em dados do Landsat de 15/10/2005

Em relação à propagação da onda de rejeitos, a mancha de inundação simulada apresentou uma área de 1,268 km², equivalente a 96,9% da observada (1,310 km²). A Figura 5.8 apresenta a envoltória da inundação simulada e observada com destaque para região urbana de Mirai.

Mesmo com a porcentagem próxima à igualdade, as manchas apresentam diferenças perceptíveis. A proximidade dos resultados ocorre pelo fato da semelhança de dimensões de áreas simuladas que superestimam e subestimam a inundação observada (Figura 5.9). Foi observado uma superestimação e subestimação de 20,6% e 23,7% na simulação, respectivamente.

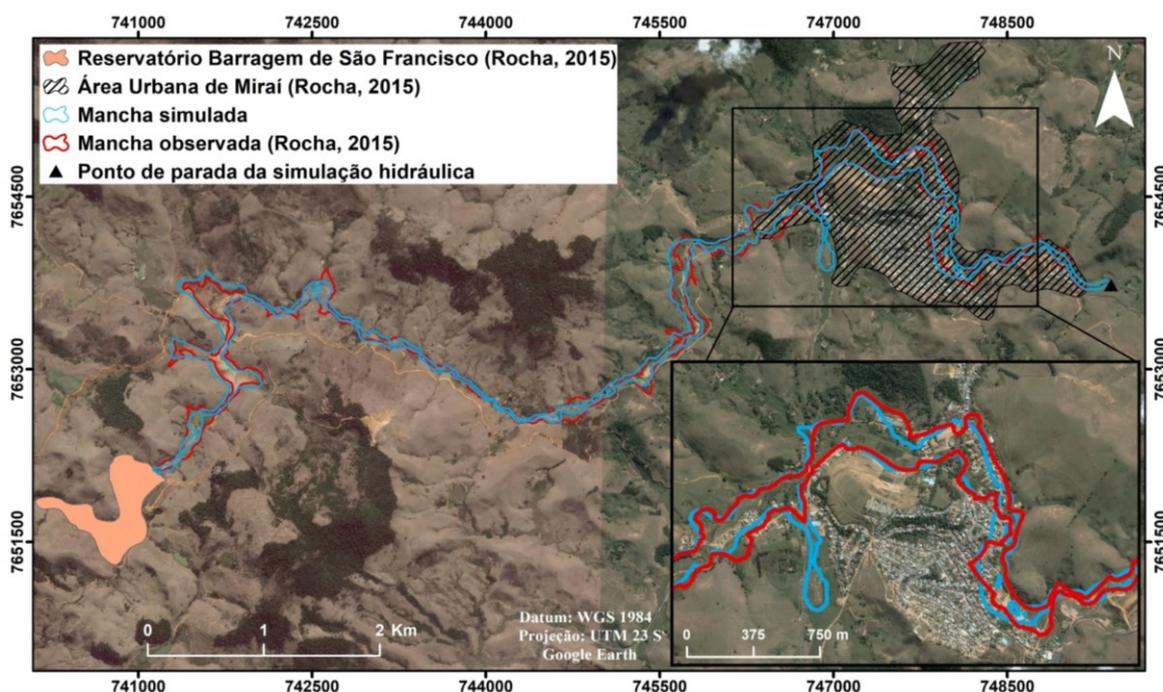


Figura 5.8: Envoltória da mancha de inundação simulada com HEC-RAS e observada causada pela ruptura da barragem de São Francisco

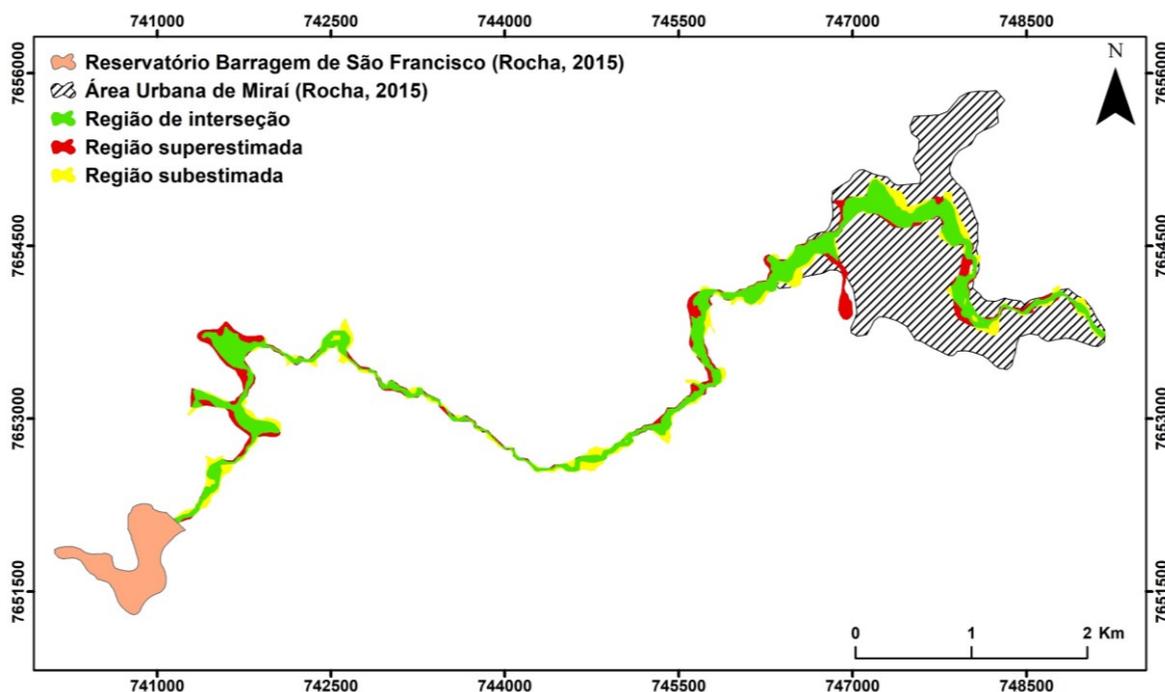


Figura 5.9: Regiões de interseção, superestimação e subestimação da mancha inundação simulada em relação à observada para ruptura da barragem de São Francisco

Para análise hidráulica da propagação da onda de rejeitos, os resultados, para cada seção da Figura 5.10, foram analisados e comparados aos resultados obtidos no cenário da simulação unidimensional realizada por Rocha (2015).

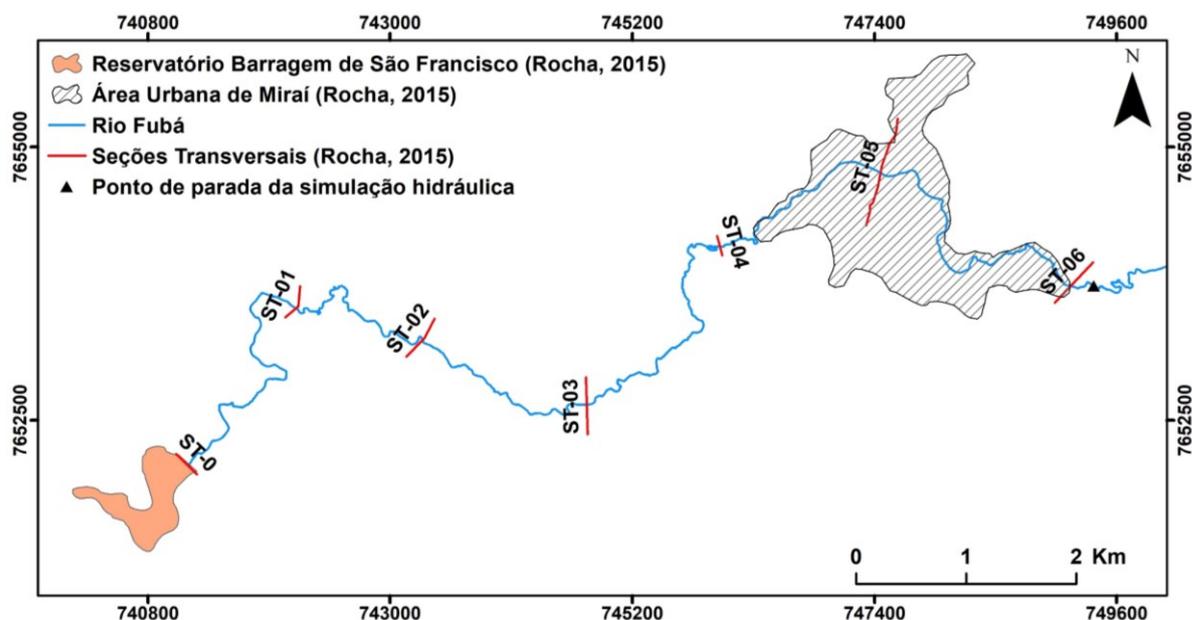


Figura 5.10: Seções utilizadas para análise hidráulica dos resultados obtidos pela simulação da propagação da onda de inundação causada pela ruptura da barragem de São Francisco

Assim como observado por Rocha (2015), houve um maior amortecimento da vazão de pico em regiões mais planas, que proporcionam um espalhamento da onda de inundação, em comparação às regiões de alta declividade com vales encaixados, que resultam em velocidades mais elevadas de propagação. A Figura 5.11 apresenta os hidrogramas obtidos em cada seção considerada.

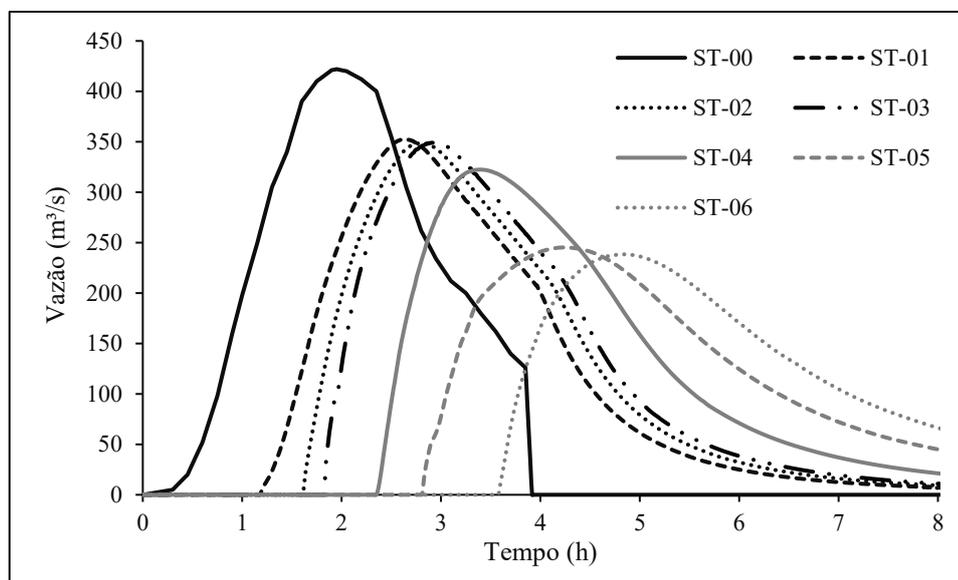


Figura 5.11: Propagação do hidrograma de cheia segundo a modelagem da ruptura da barragem de São Francisco

No trecho entre ST-0 e ST-01, há duas grandes áreas de várzeas de relevo plano e planície de inundação extensa. Tais características topográficas também são observadas em menor intensidade entre o trecho entre ST-03 e ST-05. Já o trecho entre ST-01 e ST-03 é caracterizado pela existência de uma região de alta declividade.

Na região urbana, entre ST-05 e ST-06, não foi verificado um amortecimento significativo na vazão e verifica-se somente um retardo no tempo para o pico. Isso ocorre provavelmente devido ao fato de a onda de inundação já alcançar a região urbana de Mirai amortecida com baixas velocidade de escoamento.

Apesar de apresentar comportamento semelhante quanto às regiões de amortecimento, os valores para vazão de pico e tempo para profundidade máxima obtidos foram divergentes do trabalho de Rocha (2015), como apresentado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Comparação dos resultados da propagação da onda de cheia em Mirai obtidos pela simulação e por Rocha (2015)

Seção transversal	Localização a jusante da barragem (m)	Simulação		Rocha (2015)	
		Vazão de pico (m ³ /s)	Tempo para profundidade máxima (min)	Vazão de pico (m ³ /s)	Tempo para profundidade máxima (min)
ST-0	0	422	117	422	117
ST-01	3.004	353	159	299	183
ST-02	5.005	349	168	293	206
ST-03	6.994	349	182	289	224
ST-04	9.996	322	248	221	320
ST-05	12.006	245	270	180	367
ST-06	14.017	238	292	169	433

Esses resultados, com uma menor intensidade no amortecimento da inundação, podem ser justificados pelas correções nas curvas de nível, diferença de modelagem (unidimensional e bidimensional) e, principalmente, pelo coeficiente de *Manning* adotado. Enquanto Rocha (2015) adotou um coeficiente de 0,15 para toda planície de inundação, o presente trabalho utilizou-se um coeficiente específico em cada célula da malha considerando as classes de uso e ocupação do solo obtidas.

Na simulação hidráulica realizada, foi adotado um coeficiente de *Manning* de 0,035, valor quase cinco vezes menor, para vegetação esparsa, a classe mais predominante na área atingida pela inundação (Figura 5.7). Diversos estudos de incertezas, como em Tschiedel & Paiva (2018), demonstram a alta sensibilidade, inversamente proporcional em relação à vazão de pico, existente em estudos de rupturas de barragens para o coeficiente de *Manning* em regiões de vales encaixados e a mais de quatro quilômetros do barramento.

Buscando explorar esse impacto do coeficiente *Manning*, foi realizada a simulação para estudo de caso utilizando o mesmo valor de 0,15 para o coeficiente de *Manning* em toda extensão da planície de inundação (Tabela 5.2).

Tabela 5.2: Comparação dos resultados da propagação da onda de cheia em Mirai obtidos pela simulação com *Manning* igual 0,15 para toda planície de inundação e por Rocha (2015)

Seção transversal	Localização a jusante da barragem (m)	Simulação (<i>Manning</i> = 0,15)		Rocha (2015)	
		Vazão de pico (m ³ /s)	Tempo para profundidade máxima (min)	Vazão de pico (m ³ /s)	Tempo para profundidade máxima (min)
ST-0	0	422	117	422	117
ST-01	3.004	324	171	299	183
ST-02	5.005	320	185	293	206
ST-03	6.994	315	204	289	224
ST-04	9.996	264	288	221	320
ST-05	12.006	168	346	180	367
ST-06	14.017	147	413	169	433

Com a adoção de um maior coeficiente de *Manning*, há uma maior resistência ao fluxo, causando um maior amortecimento na vazão e um aumento na envoltória de inundação. Como visto na Tabela 5.2, os valores de vazão de pico e de profundidade máxima possuem uma perceptível maior aproximação do simulado por Rocha (2015) comparado aos resultados da simulação apresentados na Tabela 5.1. As diferenças ainda existentes ocorrem pela questão do divergente equacionamento utilizado pelo modelo HEC-RAS para propagação da onda na modelagem unidimensional e bidimensional.

Mesmo assim, os resultados da simulação com a determinação do coeficiente de *Manning* pela classificação do uso e ocupação do solo ainda estão em conformidade com o evento real ocorrido. Segundo Rocha (2015), testemunhas relataram que a evacuação no primeiro bairro da região urbana ocorreu ainda de madrugada. Esse ocorrido está de acordo com o simulado, pois o tempo de chegada da onda nessa região ocorre por volta de 2,5 horas da simulação, equivalente a 06:00 h do dia do evento.

A Figura 5.12 ilustra a progressão da onda de cheia destacando a chegada no início e final do trecho da região urbana em 2,5 horas e entre de 3,5 e 4 horas, respectivamente, com uma profundidade máxima de aproximadamente 5,5 metros ocorrendo em torno de 4,5 horas.

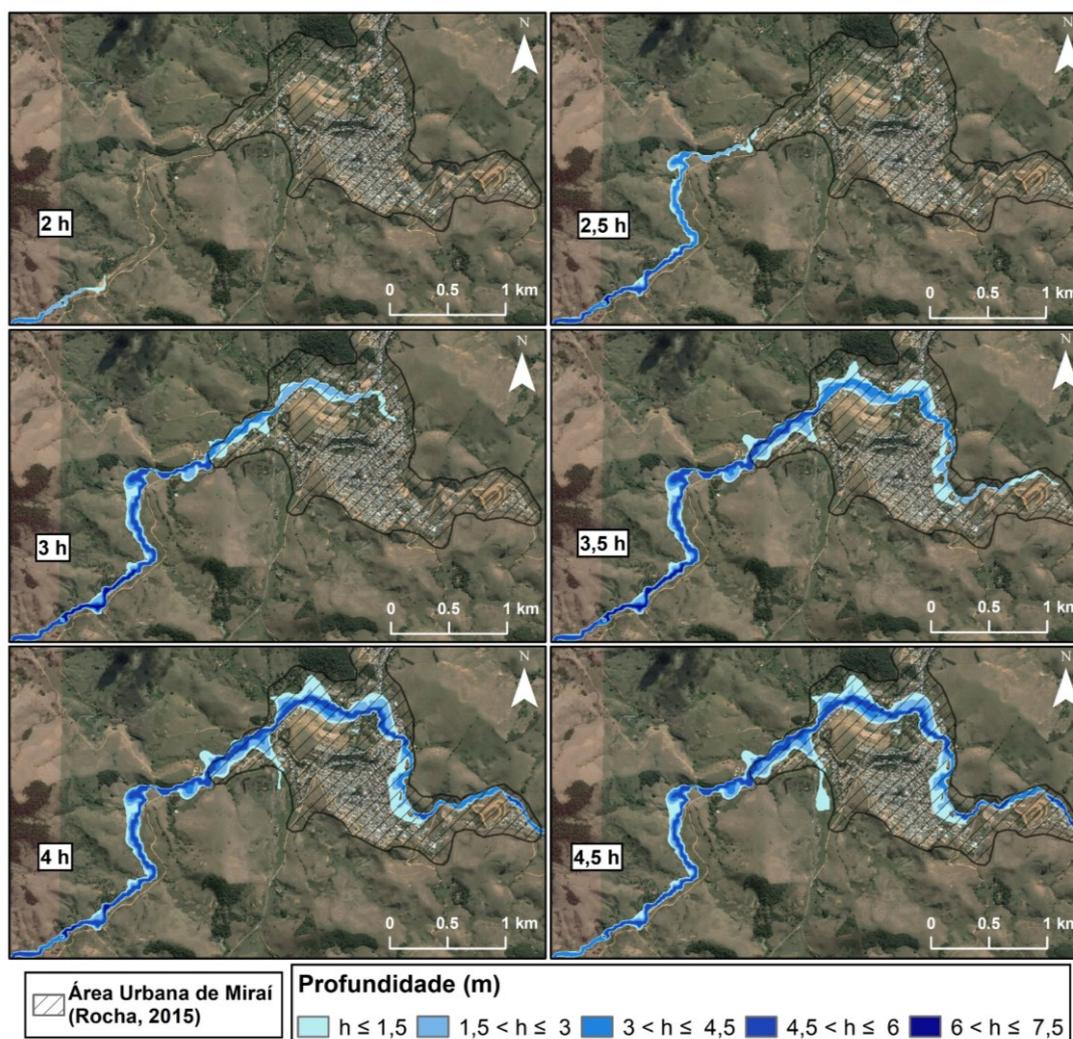


Figura 5.12: Progressão da onda de inundação obtida pela simulação da ruptura da barragem de São Francisco

5.1.2 Análise de vulnerabilidade e exposição

Por meio da análise das grades estatísticas atingidas pela inundação, foram verificados 1.537 domicílios com uma população de 4.675 pessoas. Em relação às considerações adotadas para análise dos microdados, foi utilizada a única área de ponderação existente para o município de Mirai.

A Tabela 5.3 apresenta os resultados obtidos na caracterização dos domicílios. Foram obtidos 4.209 domicílios na área de ponderação considerada, nos quais há uma predominância de tipologia residencial unifamiliar e do material de construção de alvenaria.

Tabela 5.3: Dados obtidos por meio da análise dos microdados do censo demográfico de 2010 em relação aos domicílios na região atingida em Mirai

Tipo de dados	Tipo de ocupação				Material de construção	
	RES1	RES4	RES5	RES6	Madeira	Alvenaria
Microdados	4.132	0	22	55	0	4.209
%	98,2	0,0	0,5	1,3	0,0	100,0
Região de interesse	1.509	0	8	20	0	1.537

Para caracterização da população, a Tabela 5.4 apresenta a quantidade de pessoas em casa durante o período da noite e pela tarde considerando o critério de mobilidade baseado na idade das pessoas. Entre a população total da área de ponderação de 13.808, foi observado que 94,6% estão presentes em casa à noite e que 53,7% permanecem nos domicílios durante a tarde.

Tabela 5.4: Dados obtidos por meio da análise dos microdados do censo demográfico de 2010 em relação à população na região atingida em Mirai

Tipo de dados	População à noite em casa			População à tarde em casa		
	Total	< 65 anos	> 65 anos	Total	< 65 anos	> 65 anos
	Microdados	13.062	11.724	1.338	7.417	6.181
%	94,6	84,9	9,7	53,7	44,8	9,0
Região de interesse	4.422	3.969	453	2.511	2.093	418

Analisando os mapas dos setores censitários de Mirai, foram identificados uma fábrica têxtil, o fórum, uma igreja, a prefeitura e uma policlínica. Ainda utilizando a população total da área de ponderação adotada em Mirai (13.808), as populações estimadas em cada tipologia de construção são apresentadas na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Dados obtidos por meio da análise dos microdados do censo demográfico de 2010 em relação à população em outras tipologias de ocupações no período da tarde na região atingida em Mirai

População	Tipo de ocupação				
	Fábrica	Fórum	Igreja	Prefeitura	Policlínica
Total	213	32	0	6	54
< 65 anos	213	27	0	6	49
> 65 anos	0	5	0	0	5

Ressalta-se a dificuldade de confrontar os resultados estimados com o observado pela falta de informações sobre o evento. A Figura 5.13 ilustra a análise de vulnerabilidade e exposição realizada em Mirai para o período da noite.

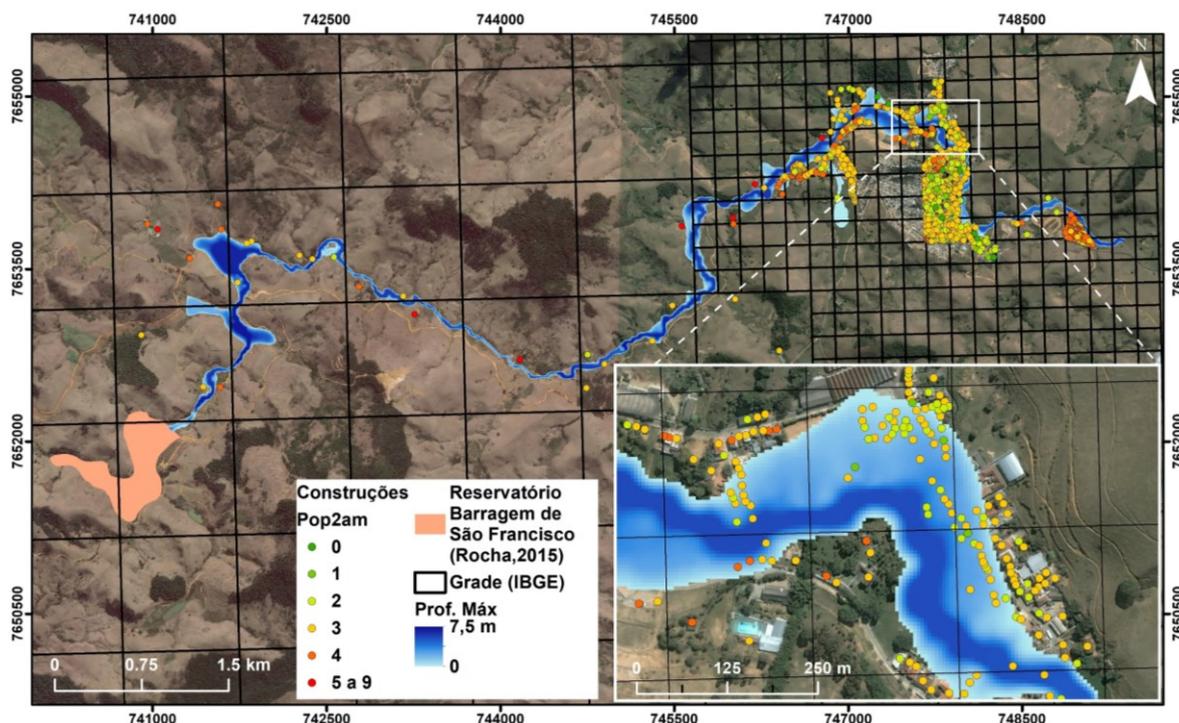


Figura 5.13: Análise de vulnerabilidade e exposição da região afetada pela onda de inundação simulada durante o período da noite em Mirai

5.1.3 Modelagem de perdas de vidas com o RCEM

Foram verificadas 337 construções presentes dentro do limite da mancha de inundação simulada com uma população total de 938 no período da noite. Analisando o risco hidrodinâmico ou fator DV (Figura 5.14), foram observados valores mais elevados, devido à alta velocidade, nos trechos encachoeirados com alta declividade, os quais não há construções.

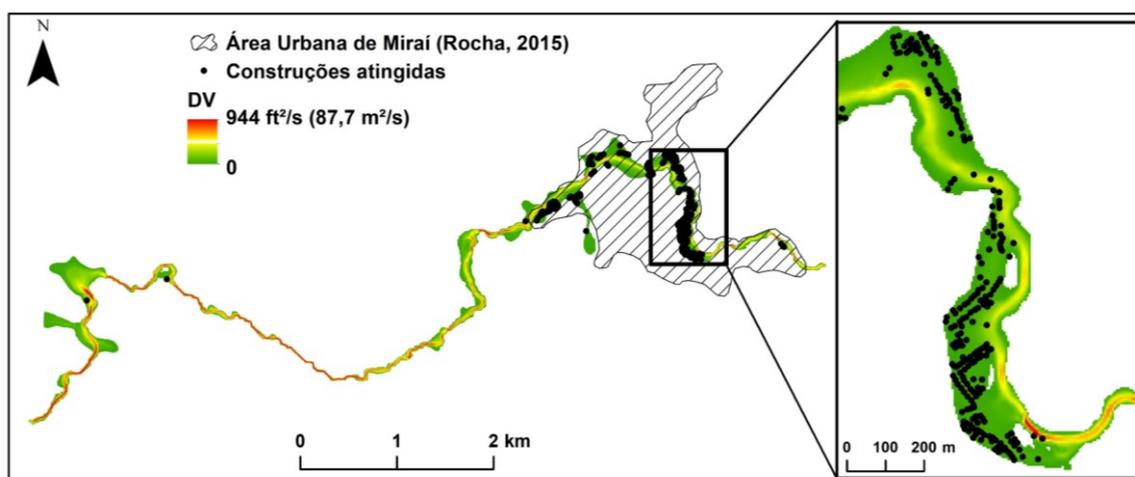


Figura 5.14: Fator DV (risco hidrodinâmico) e construções atingidas pela inundação simulada em Mirai

Adotou-se o intervalo entre os limites sugeridos do gráfico de alerta adequado para aplicação do RCEM (Figura 5.15) devido à existência do alerta e evacuação da população antes da chegada da onda de rejeitos na área urbana do município.

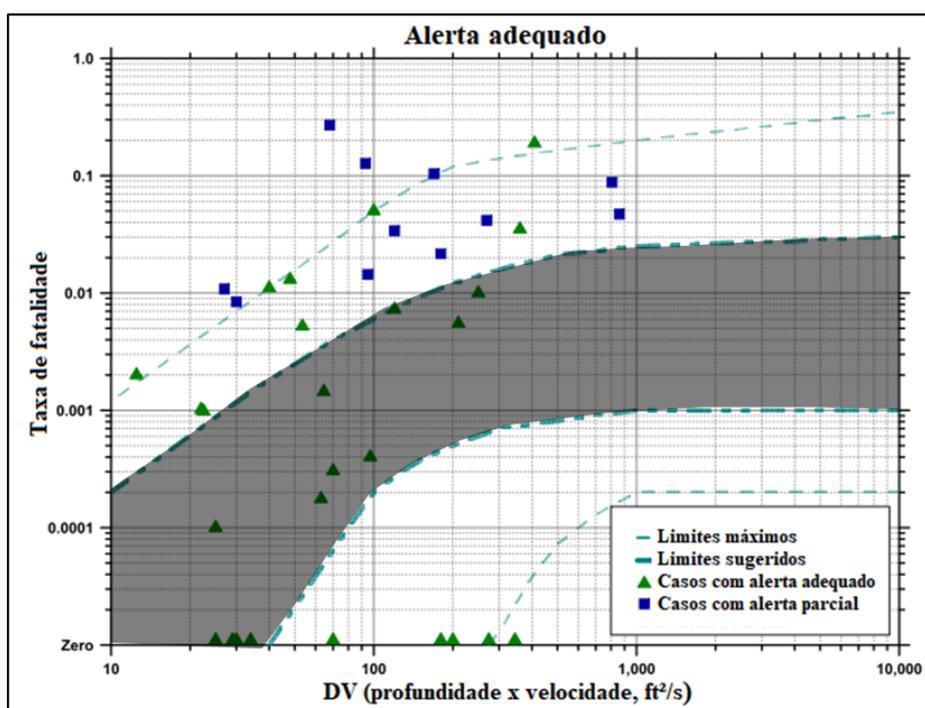


Figura 5.15: Intervalo do gráfico do RCEM adotado no cenário base de estimativa de perdas de vidas em Mirai

Aplicando a metodologia de determinação do DV e da taxa de fatalidade construção por construção proposta por Meneses *et al.* (2015), não foi observada nenhuma perda de vida, concordando, assim, com o evento real observado.

Isso se deve muito ao fato de que apenas 80 das 337 construções apresentarem fator DV superior a $10 \text{ ft}^2/\text{s}$ ($0,9 \text{ m}^2/\text{s}$), valor inicial para aplicação do RCEM. Adicionalmente, entre as construções com DV superior a $10 \text{ ft}^2/\text{s}$, o valor máximo foi de $144 \text{ ft}^2/\text{s}$ ($13,4 \text{ m}^2/\text{s}$) e a média foi de $26 \text{ ft}^2/\text{s}$ ($2,4 \text{ m}^2/\text{s}$), com taxas de fatalidades entre 0,0003 e 0,0082 e entre zero e 0,0010, respectivamente. Aplicando essa taxa de fatalidade máxima do DV médio e considerando apenas a população presentes nessas 80 construções (223), é obtido uma quantidade de fatalidade inferior a um.

5.1.4 Modelagem de perdas de vidas com o HEC-LifeSim

A Figura 5.16 ilustra os dados de entrada utilizados no HEC-LifeSim indicando a mancha simulada obtida na modelagem hidráulica realizada no HEC-RAS, o inventário de construções obtido na etapa de análise de vulnerabilidade e exposição, o sistema viário retirado do *OpenStreetMap* e os destinos adotados neste trabalho para evacuação em Mirai.

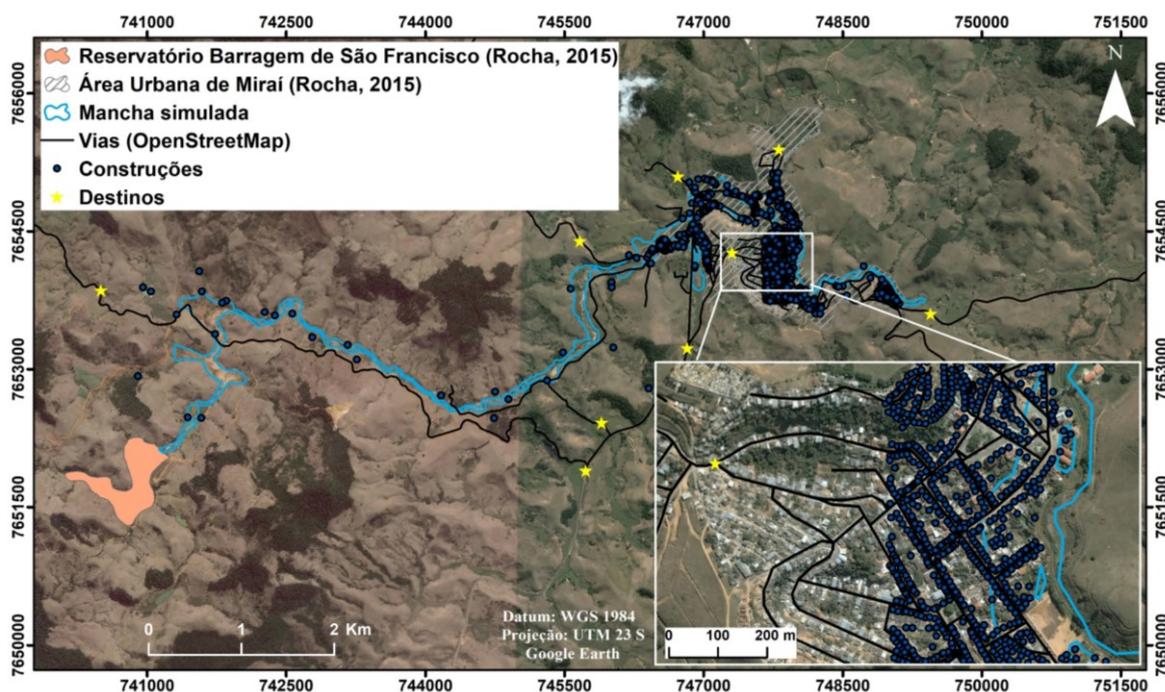


Figura 5.16: Dados de vias, construções e destinos utilizados para estimativa de perdas de vidas no HEC-LifeSim em Mirai

Para complementar os dados necessários para execução do modelo do HEC-LifeSim, foram analisados e determinados os marcos e os atrasos existentes para caracterização do alerta e evacuação existente em Mirai segundo a linha do tempo demonstrada na Figura 3.17.

Com base na informação relativa à percepção do vigia antes do rompimento sobre o perigo iminente, o tempo de identificação da ameaça foi determinado como uma distribuição uniforme de 0 a 30 minutos antes do rompimento da barragem. Já o atraso da comunicação da ameaça foi definido como zero devido à notificação do vigia à Polícia Militar local logo após percepção da ameaça.

Após conhecimento sobre a iminente ruptura, a Polícia Militar local circulou pelas ruas de Miraí alertando a população. A escolha dos coeficientes da Equação 3.32, que caracteriza o atraso para emissão do alerta, possibilita a existência de probabilidade de ocorrência de tempo de atrasos de emissão de alerta muito elevados, como demonstrado na Figura 3.18. Com isso, adotou-se uma distribuição de probabilidades triangular com valores mínimo, mais provável e máximo de 0, 15 e 30 minutos, respectivamente.

Para o atraso na difusão do alerta, a faixa de valores do coeficiente da Equação 3.33 escolhido para eficácia do alerta foi o recomendado por Sorensen & Miteli (2014b) de 5 a 10 para alerta rápido e do coeficiente de eficácia indireta foi de 0,1 a 0,2, indicando o alto alerta informal existente. Assim como realizado por Sorensen & Miteli (2014b) na representação da difusão rápida, optou-se por dobrar a faixa do coeficiente de eficácia do alerta (10 a 20), representando a maior dificuldade de difusão desse alerta durante a madrugada. Para representar a incerteza, foi considerada uma distribuição uniforme entre os limites das curvas utilizadas.

A Figura 5.17 apresenta o intervalo de curvas de difusão do alerta obtido em Miraí. Para a curva máxima, praticamente 100% da população é notificada em cerca de 29 minutos. Já para a curva mínima, a integral difusão do alerta ocorre por volta de 61 minutos.

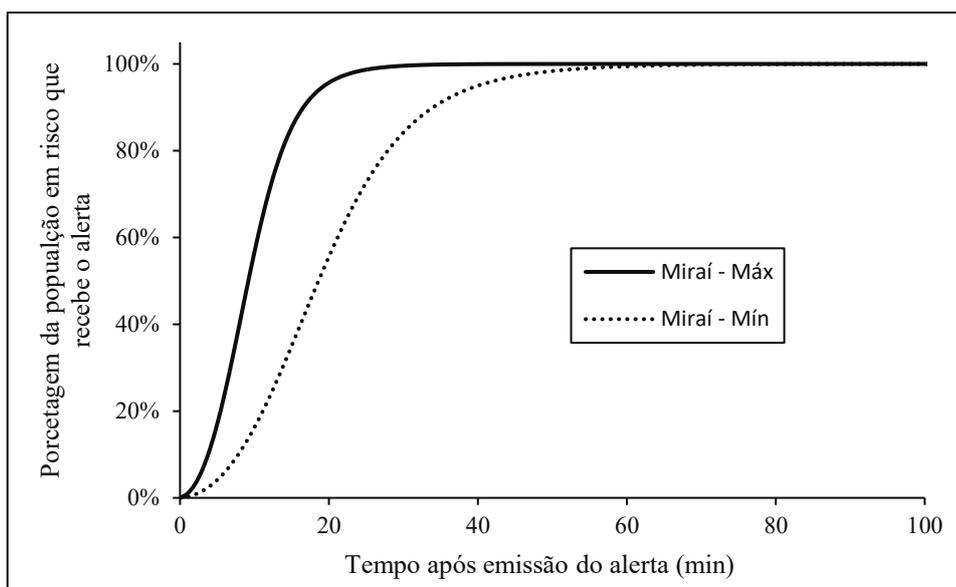


Figura 5.17: Intervalo de curvas de difusão do alerta segundo hipóteses adotadas para o cenário de base de evacuação em Mirai

Como a evacuação da população foi considerada de 50% a pé e 50% em veículos, o atraso para mobilização foi representado pela faixa limitada superiormente pela curva para evacuação a pé ($a_m = 0,7$ e $b_m = 12$) e inferiormente pela curva B proposta por Sorensen & Mileti (2015c) e considerada mais provável de mobilização em uma comunidade ($a_m = 1,2$ e $b_m = 45$). Para representar a incerteza, foi considerada uma distribuição uniforme entre os limites das curvas utilizadas.

A Figura 5.18 apresenta o intervalo obtido de curvas de mobilização da população em Mirai. Para a curva máxima, praticamente 100% da população se mobiliza em cerca de 23 minutos. Já para a curva mínima, a integral mobilização da população ocorre por volta de 126 minutos.

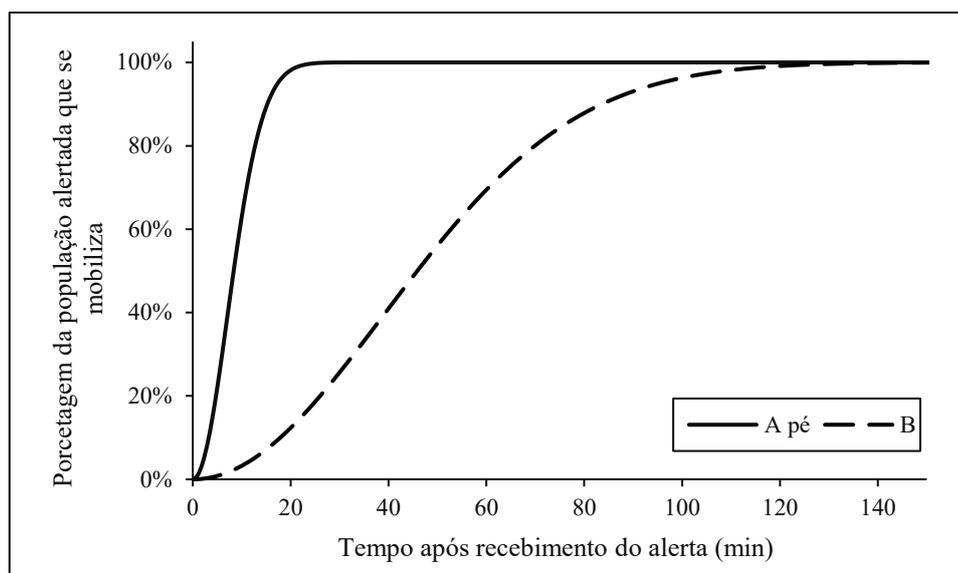


Figura 5.18: Intervalo de curvas de mobilização da população hipóteses adotadas para o cenário de base de evacuação em Miraf

Após a caracterização do alerta, a simulação com 1.000 interações foi realizada obtendo os seguintes valores dos quartis de fatalidades apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Quartis de estimativa de perdas de vidas para o cenário base em Miraf - HEC-LifeSim

Estimativa de fatalidades				
Menor	1º quartil	Mediana	3º quartil	Maior
0	0	0	0	4

Os valores obtidos estão de acordo com o evento real com nenhuma fatalidade observada. Em média, 99,96% da população foi mobilizada antes que a inundação a atingisse. Isso é justificado pela relação entre a linha do tempo da inundação e a linha do tempo do alerta, de evacuação, como ilustrado na Figura 4.8.

Como demonstrado na análise da propagação da onda de rejeitos, a inundação atinge o início e final da área urbana em 2,5 horas e entre de 3,5 e quatro horas, respectivamente. Tais períodos de tempo são suficientes para que ocorra a mobilização. Considerando a combinação mais extrema dos tempos definidos para o processo de alerta e evacuação, a população iria integralmente evacuar em aproximadamente três horas.

Foram observadas fatalidades em 111 interações, cujas frequências de ocorrência são apresentadas na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Relação entre fatalidades e número de interações realizadas no HEC-LifeSim para o cenário base de Miraf

Fatalidades	Número de interações
1	105
2	3
3	2
4	1

Em todas as interações que resultaram em uma fatalidade, a perda de vida foi relacionada à população acima de 65 anos que não se mobilizou para evacuação e que, logo, foi alocada em alguma das zonas de risco de inundação, como apresentado na Tabela 3.4, na qual a probabilidade de perda de vida é definida pelas distribuições de probabilidades da Figura 3.23. Para as interações com três e quatro fatalidades, a perda de vida foi causada durante o processo de evacuação a pé ou de carro com as características da inundação excedendo os valores dos critérios de estabilidade apresentados na Tabela 3.7. Já para as interações com duas fatalidades, ambas as situações apresentadas anteriormente foram presenciadas.

5.1.5 Análise de sensibilidade do modelo RCEM

A estimativa de perdas de vidas pelo RCEM utilizando os outros intervalos dos gráficos da Figura 3.14 e da Figura 3.15 é apresentada na Tabela 5.8. Para alerta adequado, só foram verificadas fatalidades no limite máximo. Já para o caso de pouco ou sem alerta, as fatalidades foram observadas entre os limites sugeridos e no limite máximo.

Tabela 5.8: Estimativa de fatalidades em Miraf utilizando outras faixas do RCEM

Gráfico	Intervalo			
	Sugerido		Limite	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Alerta adequado	0*	0*	0	2
Pouco ou sem alerta	4	7	0	17

*Cenário base

Para aplicação do RCEM, com a metodologia de determinação de DV proposta por USBR (2015), foram considerados quatro trechos. O primeiro foi delimitado apenas para área rural; já os outros três trechos foram escolhidos com base na concentração de construções: um trecho com número elevado de construções, mas dispersas; outro trecho com número elevado de

construções concentradas; e por último, um trecho da área urbana com apenas duas construções (Figura 5.19).

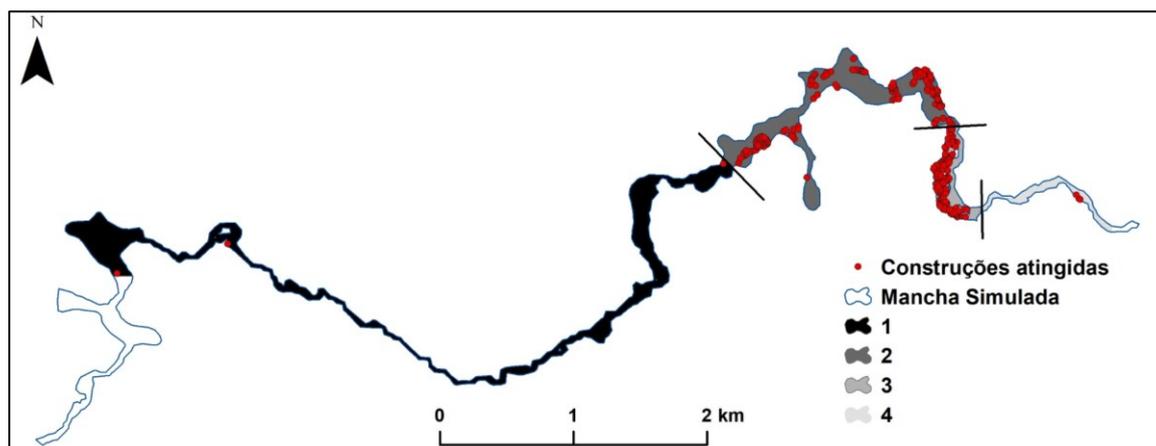


Figura 5.19: Trechos utilizados da mancha de inundação simulada para obtenção do parâmetro DV em Mirai por meio da proposta de USBR (2015)

Para os quatro trechos, os valores do DV médio obtidos foram próximos (Tabela 5.9). Nas regiões em que a vazão simulada foi maior, a largura também foi maior aproximadamente na mesma proporção, o que resultou nessa proximidade dos resultados.

Tabela 5.9: Determinação do DV nos trechos adotados da mancha de inundação simulada em Mirai

Trecho	Vazão (ft ³ /s) {m ³ /s}		Largura (ft) {m}		DV (ft ² /s) {m ² /s}		
	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Médio
1	13.288 {376}	10.957 {310}	452 {138}	387 {118}	29 {2,7}	28 {2,6}	29 {2,7}
2	10.957 {310}	8.485 {240}	387 {118}	214 {65}	28 {2,6}	40 {3,7}	34 {3,2}
3	8.485 {240}	8.469 {240}	214 {65}	319 {97}	40 {3,7}	27 {2,5}	33 {3,1}
4	8.469 {240}	8.435 {239}	319 {97}	197 {60}	27 {2,5}	43 {4,0}	35 {3,2}

Com isso, as taxas de fatalidades obtidas também foram próximas, o que resultou em uma superestimativa na estimativa de perdas de vidas em comparação ao evento real, com uma fatalidade para os dois trechos mais populosos (Tabela 5.10).

Tabela 5.10: Estimativa de fatalidades pelo modelo RCEM em cada trecho adotado da mancha de inundação simulada em Mirai

Trecho	População	Taxa de Fatalidade		Fatalidades	
		Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
1	8	0	0,0012	0	0
2	494	0	0,0014	0	1
3	449	0	0,0014	0	1
4	12	0	0,0015	0	0
Total				0	2

5.1.6 Análise de sensibilidade do modelo HEC-LifeSim

Na análise de sensibilidade do período do dia, foi observado um número menor de fatalidades, com redução de quatro para duas fatalidades durante o período da tarde no maior valor observado. Isso ocorreu por causa da quantidade de pessoas presentes nas construções em cada período.

Como identificado na análise de vulnerabilidade, à noite, 4.222 pessoas estariam presentes na área de risco determinada; já à tarde, a população seria reduzida para 2.186. A Figura 5.20 ilustra os resultados da modelagem.

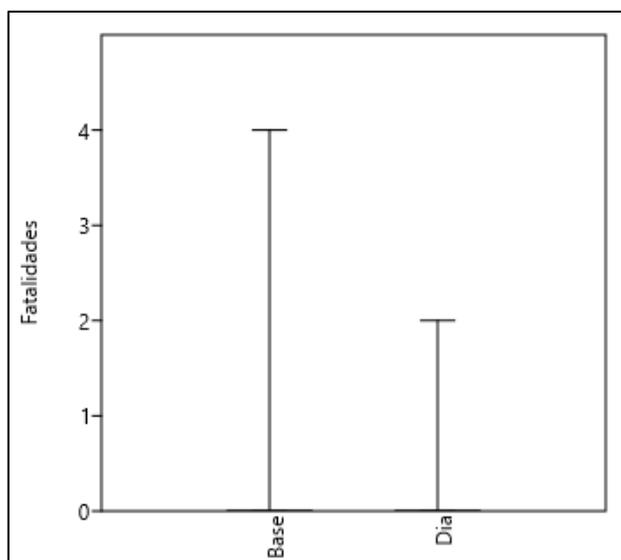


Figura 5.20: Análise de sensibilidade do período do dia na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Mirai

Em relação ao modo de evacuação, não foi verificado impacto na quantidade de fatalidades observadas com variabilidade das alternativas de evacuação a pé ou em veículo. O tempo de chegada da onda de inundação na região urbana do município de 2,5 a 3,5 horas foi suficiente para mobilização e chegada da população em risco aos destinos seguros independentemente do modo como a evacuação ocorreu. A Figura 5.21 ilustra os resultados obtidos com apenas uma pequena alteração no maior valor no cenário de evacuação da população de 25% em veículos e 75% a pé.

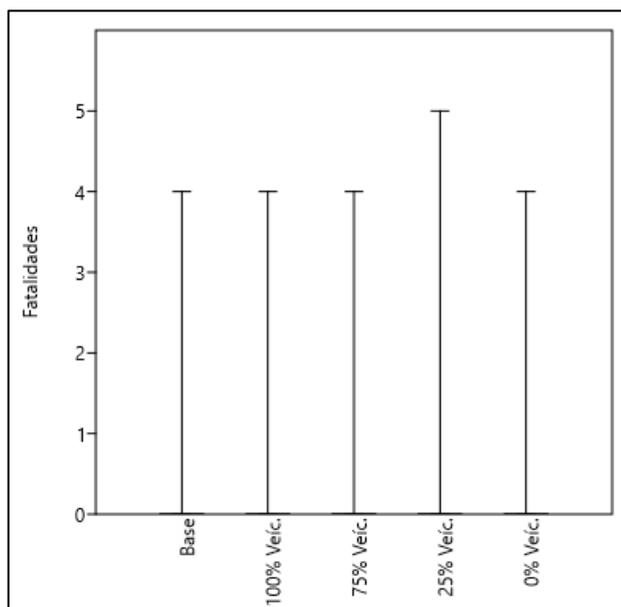


Figura 5.21: Análise de sensibilidade do modo de evacuação na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Miraf

Para verificação da influência do tempo da identificação da ameaça na estimativa de perdas de vidas, foram considerados quatro cenários com períodos de atrasos nessa identificação da ameaça iguais de 30 em 30 minutos e com distribuição uniforme para representar a incerteza. No caso mais extremo, foram observadas 13 fatalidades na medida de tendência central como apresentado na Tabela 5.11 (em que “+“ representa o atraso na identificação da ameaça) e ilustrado na Figura 5.22.

Tabela 5.11: Valores da análise de sensibilidade do tempo de identificação da ameaça na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Miraf

Cenário	Estimativa de fatalidades				
	Menor	1º quartil	Mediana	3º quartil	Maior
Base	0	0	0	0	4
+ 0 a 30 minutos	0	0	0	1	5
+ 30 a 60 minutos	0	0	1	3	14
+ 60 a 90 minutos	0	2	5	9	31
+ 90 a 120 minutos	0	7	13	20	45

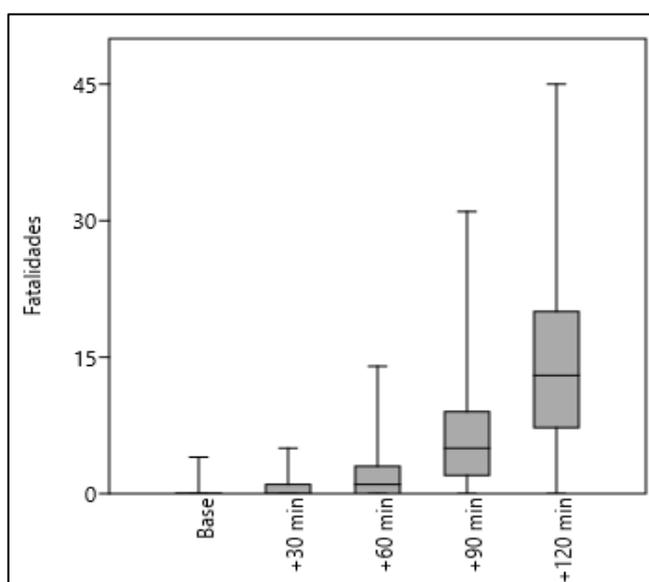


Figura 5.22: Análise de sensibilidade do tempo de identificação da ameaça na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Miraf

Utilizando as curvas padrão do HEC-LifeSim para os atrasos definidos por Sorensen & Miteli (2014a, 2014b e 2014c), foi observada uma maior variabilidade dos resultados para o atraso da emissão do alerta e um impacto maior na medida de tendência central para o atraso na mobilização.

Todas as curvas de atraso na emissão de alerta possibilitam a existência de probabilidades de ocorrência de tempo de atrasos muito elevadas (Figura 3.18). Já entre as curvas de mobilização, há diferenças impactantes e intensificadas pela consideração da preparação e percepção da

população (Figura 3.20). A Tabela 5.12, Tabela 5.13 e Tabela 5.14 apresentam os valores fatalidades obtidos e a Figura 5.23 e ilustra a modelagem realizada.

Tabela 5.12: Valores da análise de sensibilidade das curvas de atraso na emissão do alerta na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Mirai

Cenário	Estimativa de fatalidades				
	Menor	1º quartil	Mediana	3º quartil	Maior
Base	0	0	0	0	4
Bom	0	0	0	1	45
Moderado	0	0	0	3	51
Mínimo	0	0	0	16	53
<i>Ad-hoc</i>	0	1	2	26	57
Desconhecido	0	0	6	3	49

Tabela 5.13: Valores da análise de sensibilidade nas curvas de atraso da difusão do alerta na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Mirai

Cenário	Estimativa de fatalidades				
	Menor	1º quartil	Mediana	3º quartil	Maior
Base	0	0	0	0	4
Rápido	0	0	0	1	8
Moderadamente rápido	0	0	1	2	11
Moderado	0	1	2	4	20
Devagar	0	3	6	10	26
Desconhecido	0	3	8	14	38

Tabela 5.14: Valores da análise de sensibilidade nas curvas de atraso de mobilização da população na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Mirai

Cenário	Estimativa de fatalidades				
	Menor	1º quartil	Mediana	3º quartil	Maior
Base	0	0	0	0	4
Boa/provável	0	4	7	11	29
Boa/improvável	0	7	11	15	31
Pobre/provável	4	13	17	21	35
Pobre/improvável	4	17	21	24	38

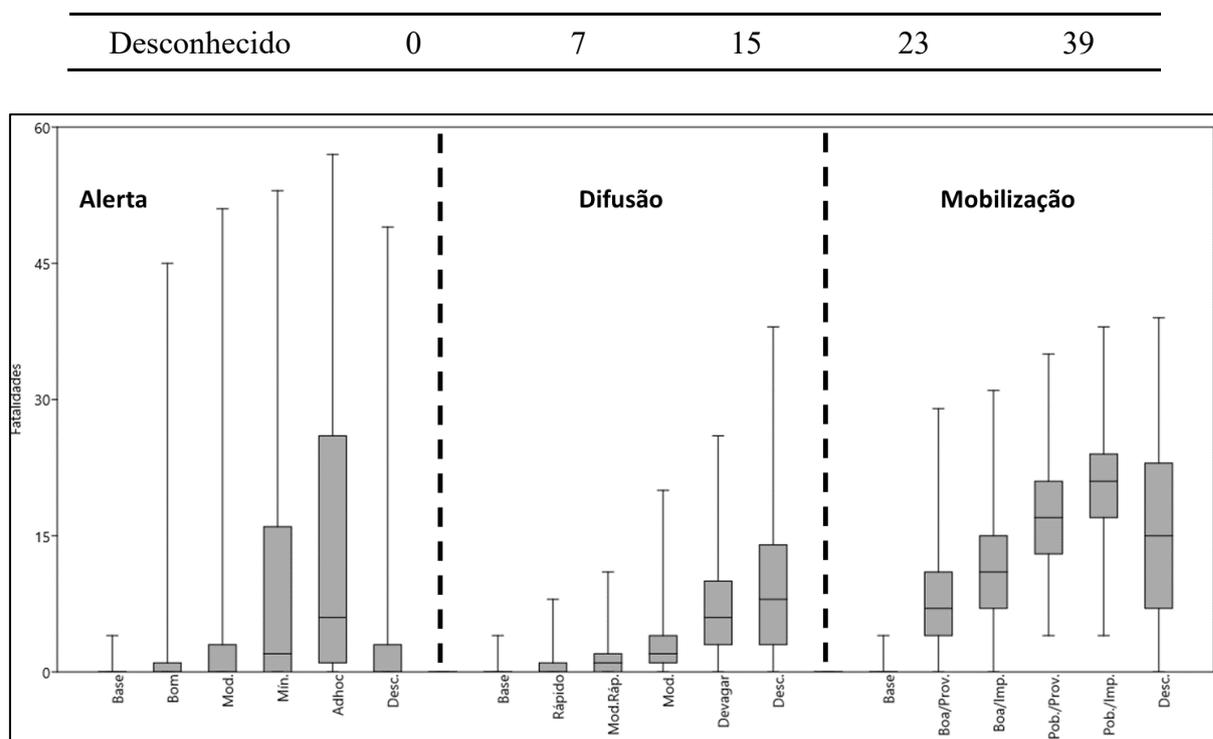


Figura 5.23: Comparação dos resultados das análises de sensibilidade das curvas de atraso de emissão, difusão e mobilização na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Mirai

5.2 Barragem de Fundão – Mariana/MG

O reservatório da barragem de rejeitos de Fundão se localizava no município de Mariana, pertencente a Região Metropolitana de Belo Horizonte (Figura 5.24), e pertencia ao Complexo Minerador de Germano, de propriedade da Samarco Mineração S.A. Os rejeitos armazenados na estrutura eram provenientes do efluente gerado pelo processo de mineração de ferro (MACHADO, 2017).

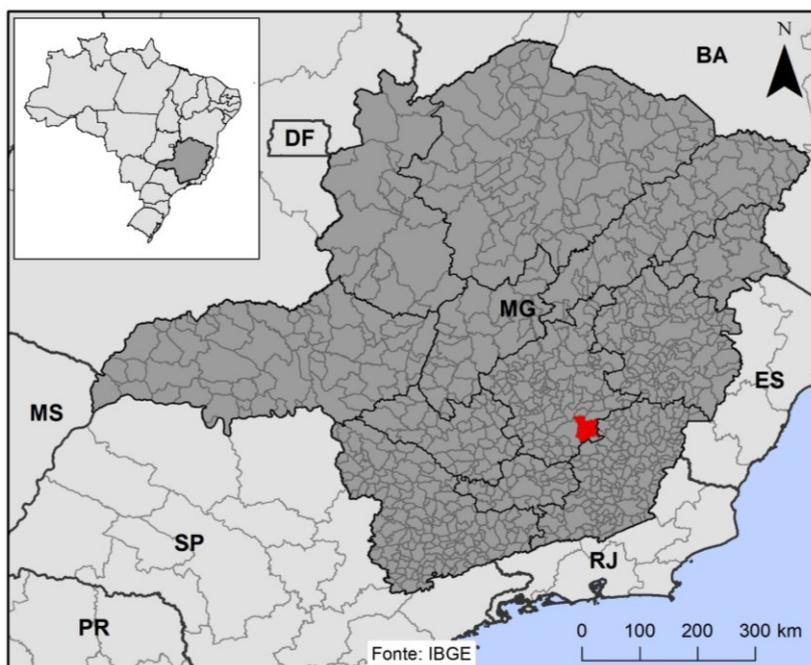


Figura 5.24: Localização do município de Mariana em Minas Gerais

No reservatório da Barragem do Fundão, a disposição dos rejeitos arenoso e fino (lama) era realizada separadamente. A primeira estrutura construída foi o dique de partida para o empilhamento de rejeitos arenosos na cota superior de 830 metros. Mais a montante, havia outro dique para contenção de lama na cota superior de 850 metros. Os alteamentos sucessivos do empilhamento de rejeitos arenosos estavam projetados para montante, até a cota prevista de 920 metros, utilizando-se o próprio rejeito arenoso como material de construção (BRANDT, 2005 *apud* MACHADO, 2017; MORGENSTERN *et al.*, 2016). A Figura 5.25 apresenta o esquema construtivo da barragem do fundão.

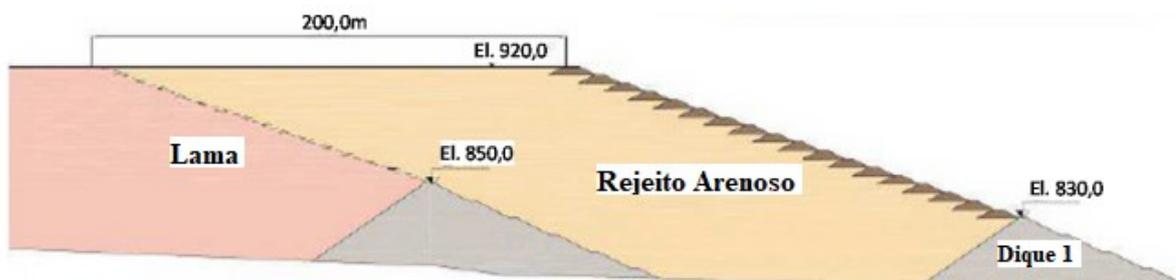


Figura 5.25: Esquema do corte do projeto da barragem de Fundão

Fonte: Adaptado de Morgenstern *et al.*, 2016.

No dia cinco de novembro de 2015, por volta das duas horas da tarde, foram sentidos tremores terra durante alguns minutos. Às 15h45, a barragem entrou em colapso e em menos de 30 minutos a onda de cheia já alcançava o distrito de Bento Rodrigues após galgamento, sem a ruptura, na barragem de Santarém, que possui a finalidade de controlar o carreamento de sedimentos e captação de água. A onda de rejeitos fluiu mais de 640 quilômetros, iniciando através do curso do córrego Santarém, adentrando em seguida o rio Gualaxo do Norte, que deságua no Rio do Carmo a aproximadamente 73 quilômetros a jusante, o qual, por sua vez, é tributário do Rio Doce (MORGENSTERN *et al.*, 2016; MACHADO, 2017). A Figura 5.26 apresenta o acidente de Mariana destacando as regiões de interesse para este estudo.

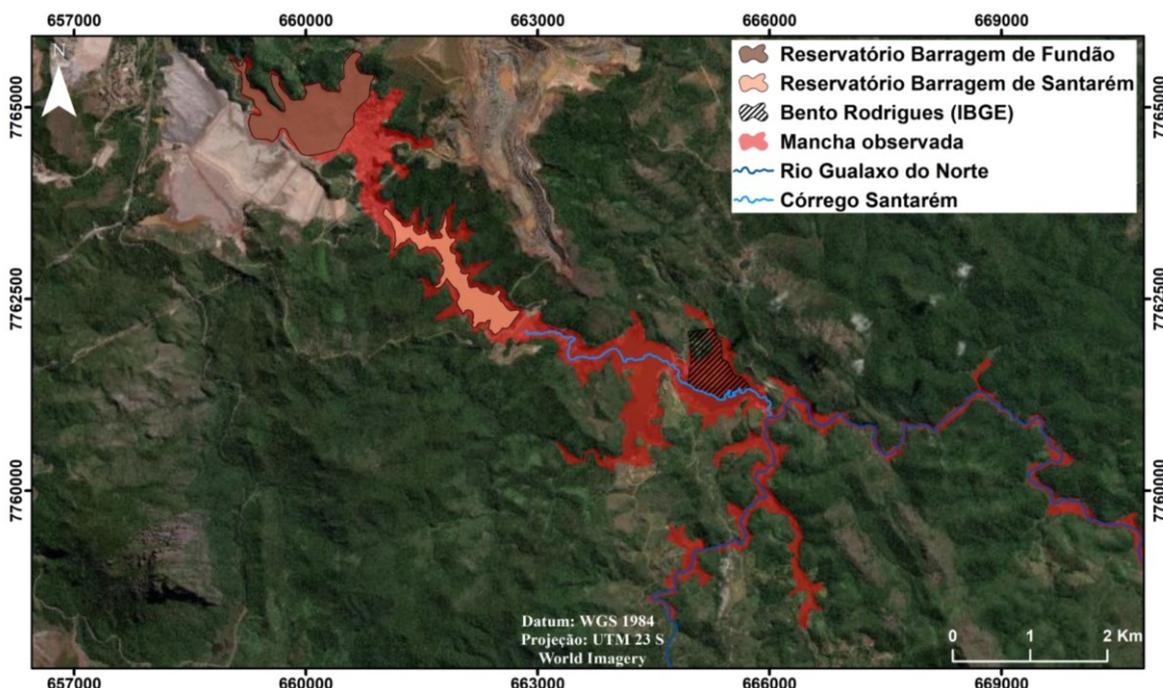


Figura 5.26: Região de interesse atingida pela inundação causada pela ruptura da barragem de Fundão, Mariana - MG

Foram desprendidos 32 milhões de metros cúbicos de rejeitos da barragem de Fundão, dos quais 1,2 milhão de métricos cúbicos foi retido durante o processo de galgamento na barragem de Santarém. O material propagado possuía uma concentração volumétrica de sólidos de 47 % (MACHADO, 2017).

O prejuízo apenas com danos em infraestrutura no município foi da ordem de 100 milhões de reais (MARANHÃO, 2015). Além disso, o abastecimento de água de cidades vizinhas ao longo do trecho afetado foi temporariamente suspenso e só retomando dias depois, após análises da potabilidade da água. Foram comprometidos quase 1.600 hectares de vegetação e a turbidez excessiva provocada pela lama foi responsável pela morte de milhares de peixes e outros animais. De acordo com o Instituto Brasileiro de Meio Ambiente (IBAMA) (BRASIL, 2015), das 80 espécies de peixes nativas, 11 eram classificadas como ameaçadas de extinção e 12 eram encontradas somente nos rios atingidos pelos rejeitos.

Uma funcionária terceirizada da empresa responsável pelo empreendimento recebeu um chamado de emergência logo após ao rompimento e percorreu as ruas do Distrito de motocicleta alertando as pessoas a fugirem. A partir disso, cerca de 300 pessoas que estavam em Bento Rodrigues no horário do evento começaram a se mobilizar e fugir até locais elevados (DIEGUEZ, 2016). No registro de 19 pessoas entre vítimas fatais e desaparecidos, 14 estavam trabalhando no complexo minerador e cinco estavam no distrito de Bento Rodrigues (G1, 2016).

5.2.1 Modelagem hidrodinâmica

O hidrograma de ruptura utilizado na modelagem hidráulica foi obtido por Machado (2017) considerando a propagação a partir do galgamento da barragem de Santarém. Para elaboração do hidrograma, Machado (2017) adotou as seguintes premissas:

- O volume de material (água e rejeito) desprendido da barragem de Fundão e retido na barragem de Santarém corresponde a 32 Mm³ e 1,2 Mm³, respectivamente;
- a geometria da brecha determinada a partir da conformação do terreno natural, obtida posteriormente a construção do maciço, pela topografia primitiva do vale; e
- o tempo de formação da brecha foi determinado pelas referências citadas de testemunhas e relatórios técnicos.

A brecha de ruptura determinada por meio do terreno natural com 90 metros de altura, largura de topo e base de 702 metros e 18 metros, respectivamente, é apresentada na Figura 5.27.

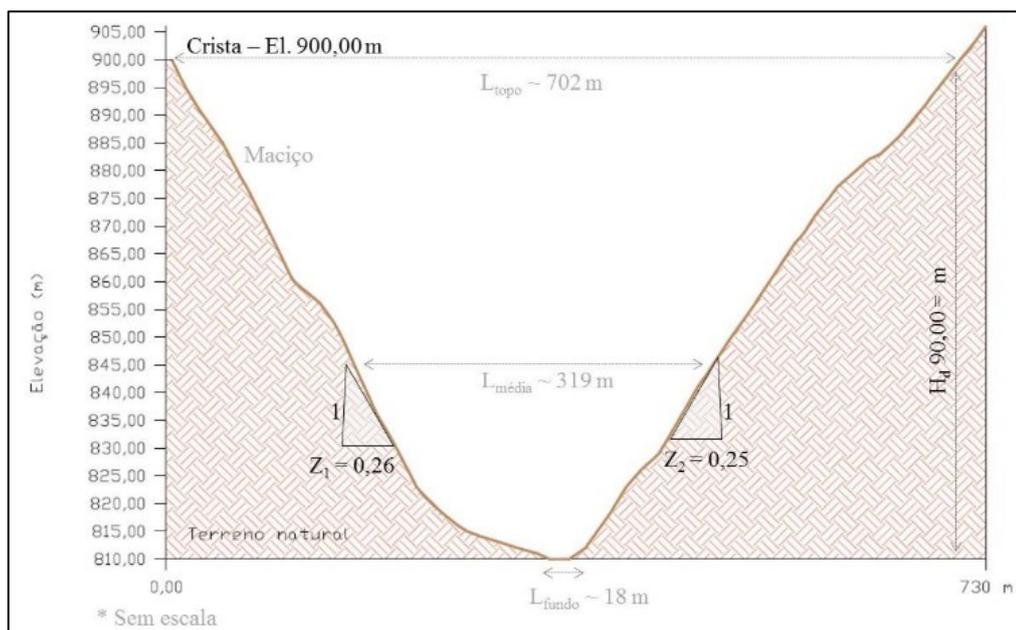


Figura 5.27: Brecha de ruptura de Fundão

Fonte: Machado, 2017.

Com isso, foram obtidos os hidrogramas da Figura 5.28 com vazão de pico de $21.842 \text{ m}^3/\text{s}$ e tempo de ocorrência do pico de 19 minutos na barragem de Santarém.

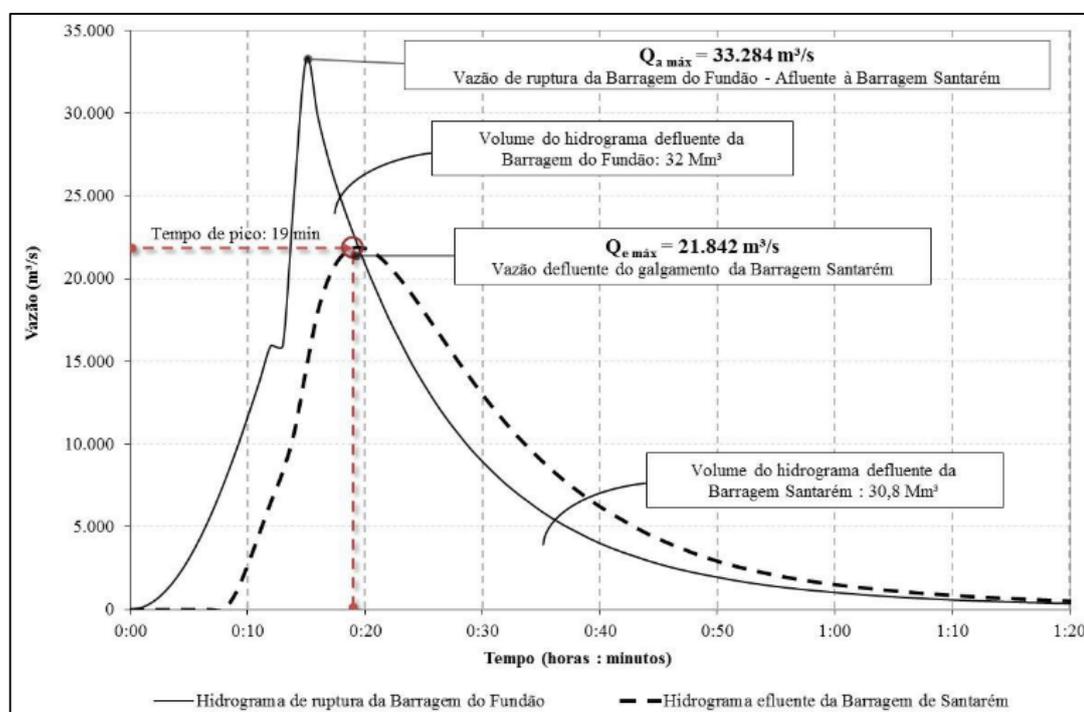


Figura 5.28: Hidrograma de ruptura de Fundão e de Santarém

Fonte: Machado, 2017.

Para tratamento do MDE bruto obtido do satélite ALOS, foram utilizadas informações de cota de fundo do córrego Santarém existentes no Plano de Ações Emergenciais elaborado por Pimenta de Ávila (2008). A ilustração da topografia utilizada a partir da barragem de Santarém até a parada da simulação hidráulica é apresentada na Figura 5.29. A malha adotada foi de 10 metros com um refinamento de cinco metros para região da calha do rio utilizado na modelagem.

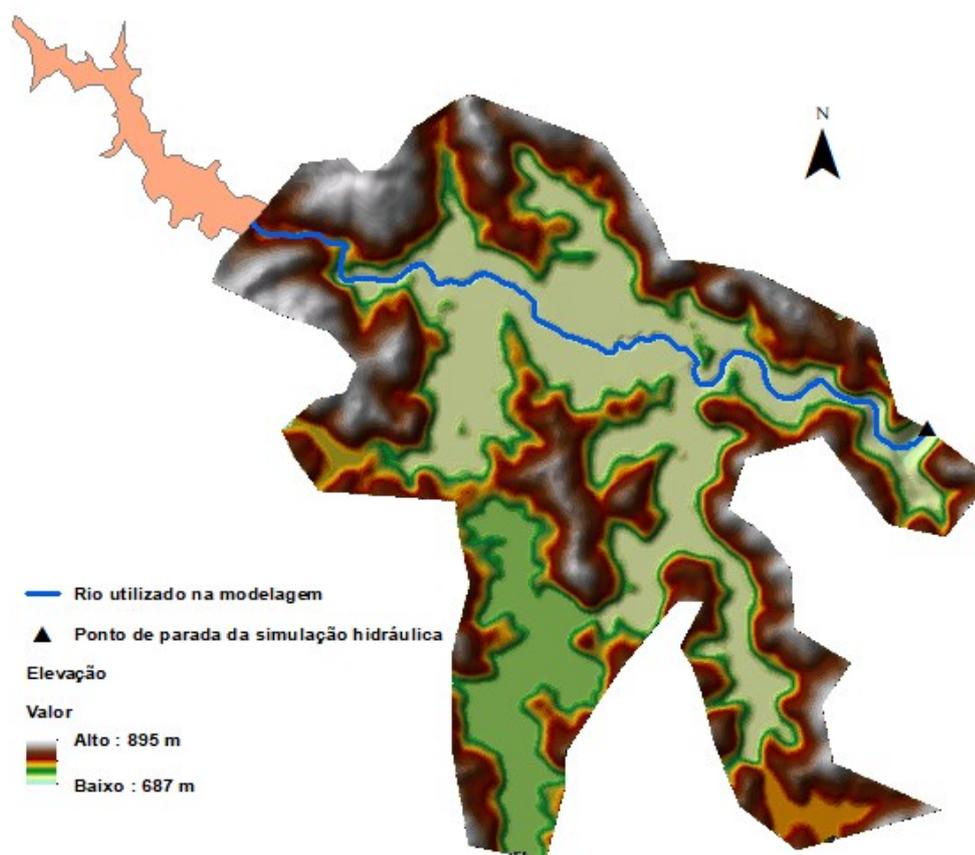


Figura 5.29: Topografia obtida pelo tratamento do MDE ALOS e utilizada na modelagem da ruptura de barragem de Fundão

Com base nos ensaios reológicos realizados nos rejeitos propagados em Mariana, Machado (2017) observou uma concentração volumétrica de 47,5% de sólidos. Analisando as curvas reológicas Figura 4.5 e considerações da seção 4.2.3, foi obtido um valor de viscosidade cinemática do rejeito de $2,57 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, o que resultou no valor de 1,43 para o fator $(v_{\text{fluxo-rejeitos}}/v_{\text{aquoso}})^{1/9}$ da Equação 3.9. Sendo assim, todos os coeficientes de *Manning* adotados para as classes de uso e ocupação do solo vale a jusante foram multiplicados por esse valor.

A imagem utilizada para classificação foi a do Landsat 8, órbita 217 e ponto 74, de 25/09/2015. Devido à resolução espacial de 30 metros da imagem e o pequeno tamanho do distrito de Bento Rodrigues, não foi possível determinar a classe de área urbana. A Figura 5.30 apresenta as classes de uso e ocupação do solo da região.

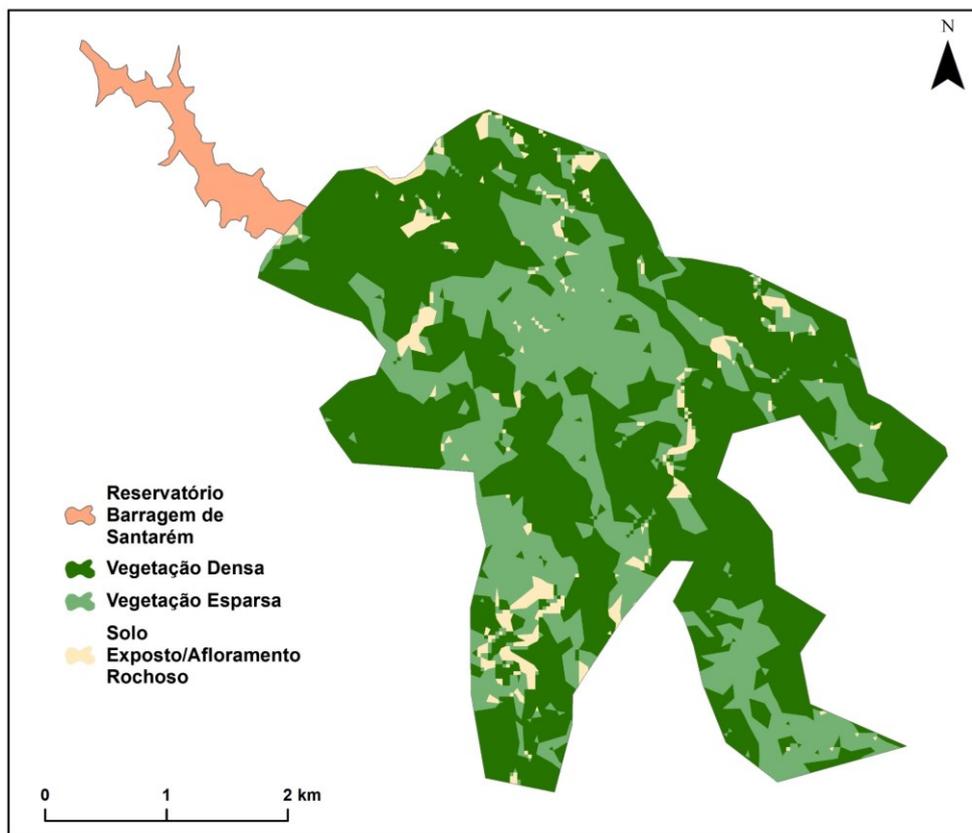


Figura 5.30: Classificação do uso e ocupação do solo da região afetada de Mariana com base em dados do Landsat de 25/09/2015

Assim como observado por Machado (2017), a mancha de inundação simulada apresentou maiores regiões que superestimaram (35%) a mancha observada. Tal resultado é muito perceptível na região mais montante do Rio Gualaxo do Norte, na qual a severidade da inundação é extremamente baixa, com profundidades e velocidades máximas inferiores a 0,5 metros e 0,5 m/s, respectivamente.

Essa superestimação se deve muito ao fato da topografia utilizada. Assim como no estudo realizado por Machado (2017), a disponibilização de dados de topografia se limitou apenas às cotas de fundo do córrego Santarém. Essa situação proporcionou uma maior suavização do terreno, aumentando as áreas de planícies durante o processo de tratamento do MDE como apresentado na Figura 5.29. A comparação entre as manchas observada e simulada, neste

presente trabalho, com destaque para a região de Bento Rodrigues, é apresentada na Figura 5.31.

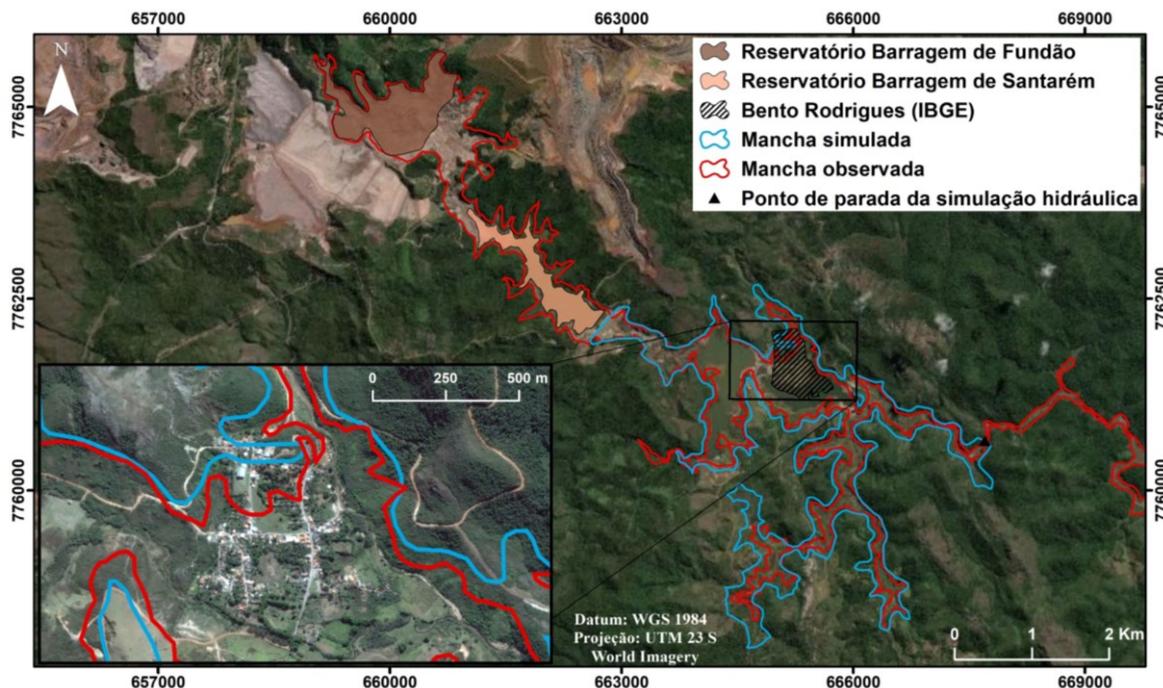


Figura 5.31: Envoltória da mancha de inundação simulada com HEC-RAS e observada causada pela ruptura da barragem de Fundão

Para análise hidráulica da propagação da onda de rejeitos, os resultados, para cada seção da Figura 5.32, foram analisados e comparados aos resultados obtidos no cenário da simulação bidimensional com fluxo hiperconcentrado no estudo de retroanálise de Machado (2017).

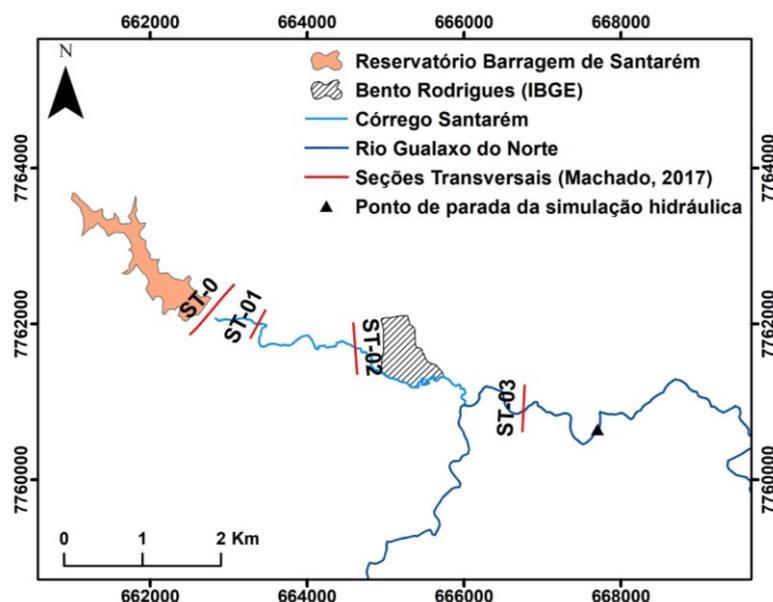


Figura 5.32: Seções utilizadas para análise hidráulica dos resultados obtidos pela simulação da propagação da onda de inundação causada pela ruptura da barragem de Fundão

Em concordância com o simulado por Machado (2017), foi observado um grande amortecimento na vazão a montante e logo jusante de Bento Rodrigues, devido ao espalhamento da onda de inundação causado por presença de grandes áreas planas. A Figura 5.33 apresenta os hidrogramas obtidos em cada seção considerada.

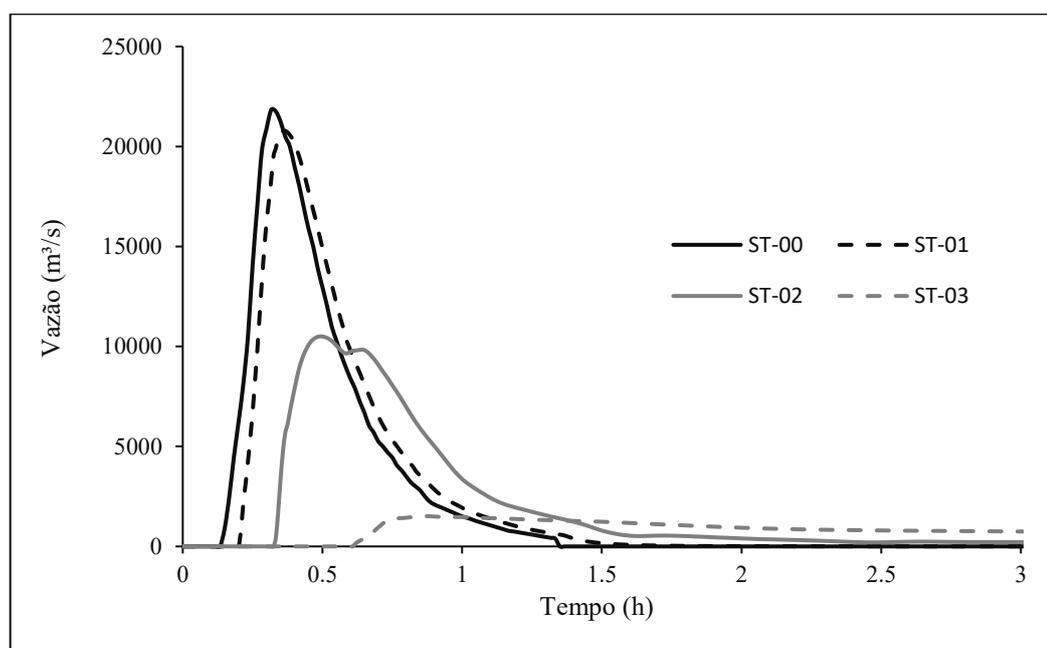


Figura 5.33: Propagação do hidrograma de cheia segundo a modelagem da ruptura da barragem de Fundão

Entre as seções ST-0 e ST-01, além da pequena distância existente, o trecho é caracterizado por apresentar uma menor largura de inundação com um vale encaixado, resultando em um amortecimento não significativo. Já entre as seções ST-01 e ST-03, a presença de grandes larguras da planície de inundação resultou em um elevado amortecimento da inundação. Sendo que especificamente para ST-03, esse amortecimento foi ainda mais significativo, pelo fato do menor volume de rejeitos alcançado devido à anterior divisão da inundação em dois sentidos diferentes.

Mesmo não possuindo os valores tabelados da propagação do hidrograma no estudo de Machado (2017), os resultados da simulação realizada foram próximos ao estudo citado considerando uma comparação subsidiada apenas em uma análise gráfica. A Tabela 5.15 apresentam os valores de vazão de pico e de tempo para profundidade máxima obtidos para cada seção analisada.

Tabela 5.15: Resultados da propagação da onda de cheia segundo a modelagem da ruptura da barragem de Fundão

Seção transversal	Localização a jusante da barragem de Santarém (m)	Vazão de pico (m ³ /s)	Tempo para profundidade máxima (min)
ST-0	0	21.842	19
ST-01	464	20.786	22
ST-02	2.108	10.503	40
ST-03	5.259	1.513	62

As possíveis pequenas diferenças existentes entre este estudo e o de Machado (2017) podem ser justificadas pelo divergente processo de tratamento do MDE, as equações utilizadas (onda difusiva ou equações completas de *Saint-Venant*) e, principalmente, por causa dos coeficientes de *Manning* utilizados.

O MDE utilizado por Machado (2017) foi obtido pelo SRTM com precisão de 30 metros e o tratamento realizado não considerou a aplicação da ferramenta ArcHydro (MAIDMENT, 2002). Além disso, não está explícito no texto se foram utilizadas as equações completas de *Saint-Venant* ou modelo simplificado de onda difusiva. Tschiedel & Paiva (2018) verificaram uma impactante sensibilidade desse parâmetro em relação à vazão de pico tanto para regiões planas quanto para regiões com vales encaixados.

Em relação ao coeficiente de *Manning*, enquanto Machado (2017) adotou um coeficiente corrigido para simular a resistência de fluxo de 0,152 para toda planície de inundação, o presente trabalho utilizou um coeficiente específico corrigido em cada célula da malha considerando as classes de uso e ocupação do solo obtidas.

Na simulação hidráulica realizada, foi adotado um coeficiente de *Manning* de 0,229 e de 0,050, para vegetação densa e vegetação esparsa, respectivamente, que são as classes mais predominantes na área atingida pela inundação (Figura 5.30). Tschiedel e Paiva (2018) consideraram uma sensibilidade média, existente em estudos de rupturas de barragens para esse parâmetro em regiões de vales encaixados, a menos de quatro quilômetros do barramento, e em

regiões com presença de áreas planas, a mais de quatro quilômetros do barramento, como é observado no caso da barragem de Fundão.

Ressalta-se a dificuldade de uma comparação mais detalhada dos resultados face à não disponibilidade do modelo e de mais informações sobre o trabalho de Machado (2017). Porém, em relação ao real ocorrido, a simulação realizada está em conformidade com o evento.

Segundo Machado (2017), diversos documentos e testemunhas relatam que o tempo de chegada da onda de inundação em Bento Rodrigues foi de menos de 30 minutos. Na simulação realizada, o tempo chegada da inundação foi de aproximadamente de 23 minutos. A Figura 5.34 ilustra a progressão da onda de cheia destacando essa chegada da inundação, com a região de Bento Rodrigues totalmente afetada em 30 minutos e com a profundidade máxima observada aproximadamente entre 8 e 10 metros em torno de uma hora após a ruptura.

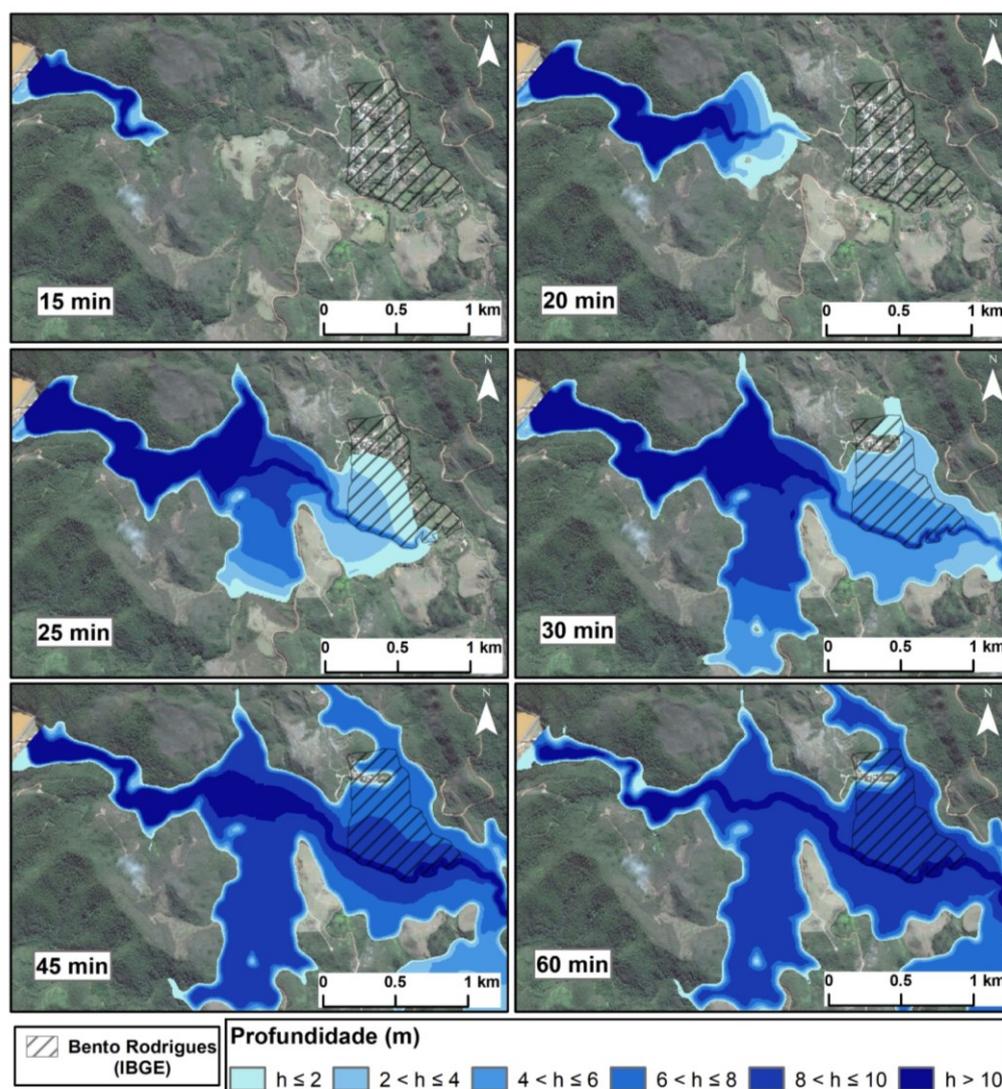


Figura 5.34: Progressão da onda de inundação obtida pela simulação da ruptura da barragem de Fundão

5.2.2 Análise de vulnerabilidade e exposição

Por meio da análise das grades estatísticas atingidas pela inundação, foram observados 104 domicílios com uma população de 506 pessoas. Em relação às considerações adotadas para análise dos microdados, foi utilizada apenas uma área de ponderação do município de Mariana que englobava os setores censitários afetados pela inundação.

A Tabela 5.16 apresenta os resultados obtidos na caracterização dos domicílios. Foram obtidos 10.407 domicílios na área de ponderação utilizada, nos quais há uma predominância de tipologia residencial unifamiliar e do material de construção de alvenaria.

Tabela 5.16: Dados obtidos por meio da análise dos microdados do censo demográfico de 2010 em relação aos domicílios na região atingida em Bento Rodrigues

Tipo de dados	Tipo de ocupação				Material de construção	
	RES1	RES4	RES5	RES6	Madeira	Alvenaria
Microdados	10.293	9	74	31	108	4.209
%	98,9	0,1	0,7	0,3	1,0	99,0
Região de interesse	103	0	1	0	1	103

Para caracterização da população, a Tabela 5.17 apresenta a quantidade de pessoas em casa à noite e à tarde considerando o critério de mobilidade baseado na idade. Entre a população total da 34.693 da área de ponderação utilizada, foi observado que 96,8% estaria presente em casa à noite e que 58,3% permaneceria nos domicílios durante à tarde.

Tabela 5.17: Dados obtidos por meio da análise dos microdados do censo demográfico de 2010 em relação à população na região atingida em Bento Rodrigues

Tipo de dados	População à noite em casa			População à tarde em casa		
	Total	< 65 anos	> 65 anos	Total	< 65 anos	> 65 anos
Microdados	33.576	31.234	2.342	20.234	18.098	2.136
%	96,8	90,0	6,8	58,3	52,1	6,2
Região de interesse	490	456	34	295	264	31

Analisando os mapas dos setores censitários de Mariana, foram identificadas uma escola e uma igreja. Utilizando a população total estimada para região de interesse (506), visto o isolamento

do distrito de Bento Rodrigues, as populações estimadas em cada tipologia de construção são apresentadas Tabela 5.18.

Tabela 5.18: Dados obtidos por meio da análise dos microdados do censo demográfico de 2010 em relação à população presente na escola e na igreja no período da tarde na região atingida em Bento Rodrigues

População	Tipo de ocupação	
	Escola	Igreja
Total	61	0
< 65 anos	61	0
> 65 anos	0	0

Mesmo apresentado dificuldades para obtenção de informações reais da população existente no evento, há relatos sobre a presença de cerca de 300 pessoas em Bento Rodrigues, com 60 pessoas na escola no dia do evento (DIEGUEZ, 2016). Tal informação demonstra consonância do estimado neste trabalho com o ocorrido. A Figura 5.35 ilustra a análise de vulnerabilidade realizada em Mariana para o período da tarde com destaque para Bento Rodrigues.

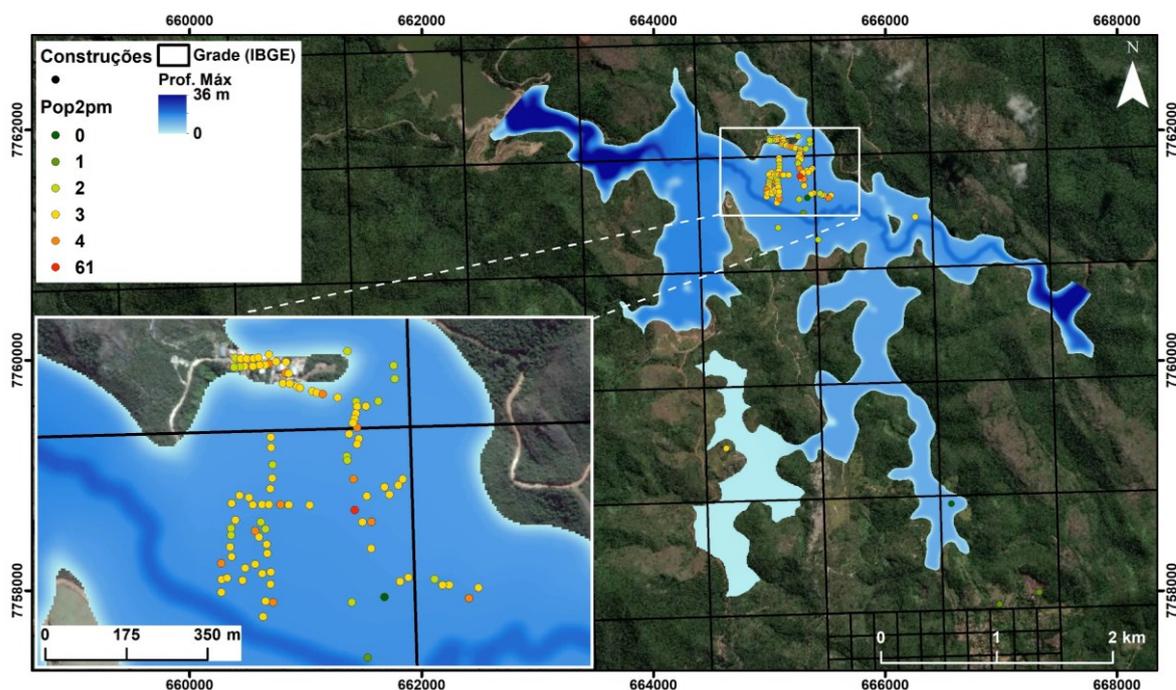


Figura 5.35: Análise de vulnerabilidade e exposição da região afetada pela onda de inundação simulada durante o período da tarde em Bento Rodrigues

5.2.3 Modelagem de perdas de vidas com RCEM

Foram verificadas 87 construções presentes dentro do limite da mancha de inundação simulada com uma população total de 304 no período da tarde. Analisando o risco hidrodinâmico ou fator DV, foram observados valores elevados de até 6773 ft²/s (629 m²/s), devido à alta profundidade e à elevada velocidade, no trecho inicial da simulação, no qual não há construções.

Na região com maior aglomeração de construções, o maior valor e a média observada para o risco hidrodinâmico foi de 535 ft²/s (49,7 m²/s) e de 242 ft²/s (22,5 m²/s), respectivamente. Entre as 87 construções atingidas, apenas três não alcançaram 10 ft²/s, valor inicial da aplicação das taxas de fatalidade do método. A Figura 5.36 ilustra o fator DV máximo e construções atingidas.

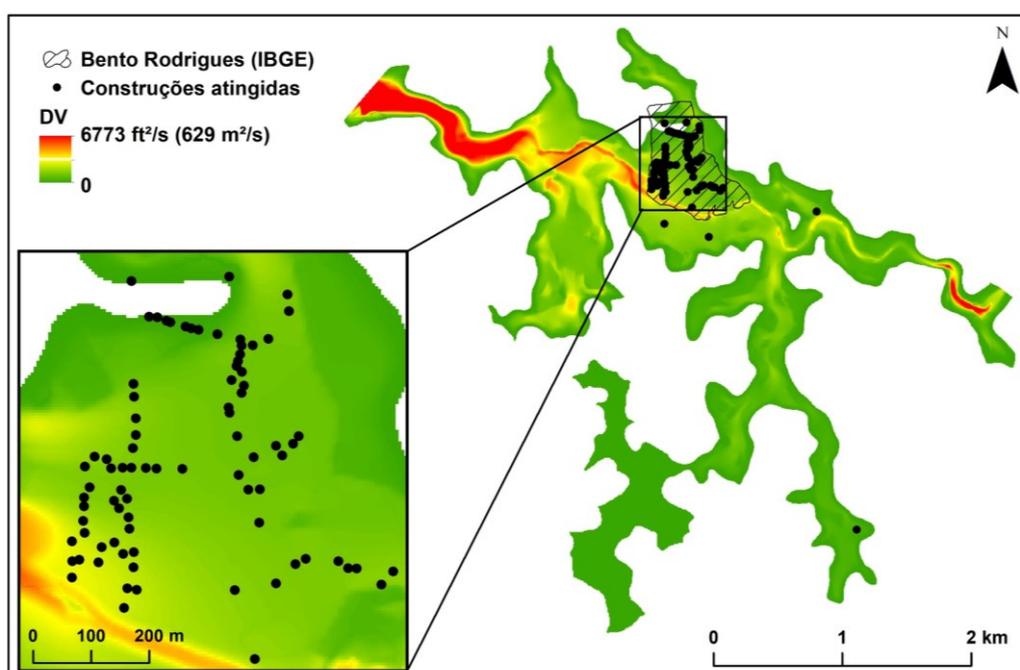


Figura 5.36: Fator DV (risco hidrodinâmico) e construções atingidas pela inundação simulada em Bento Rodrigues

Adotou-se o intervalo entre o limite mínimo e o mínimo sugerido do gráfico de pouco ou sem alerta, região que é próxima dos casos de alerta parcial e que contém o único caso de ruptura de barragens de rejeitos (Buffalo Creek) (Figura 5.37). Mesmo que observada a mobilização, não houve um aviso oficial emitido para a população. Além disso, o tempo de chegada da onda de inundação é muito curto, o que limita o tempo para evacuação.

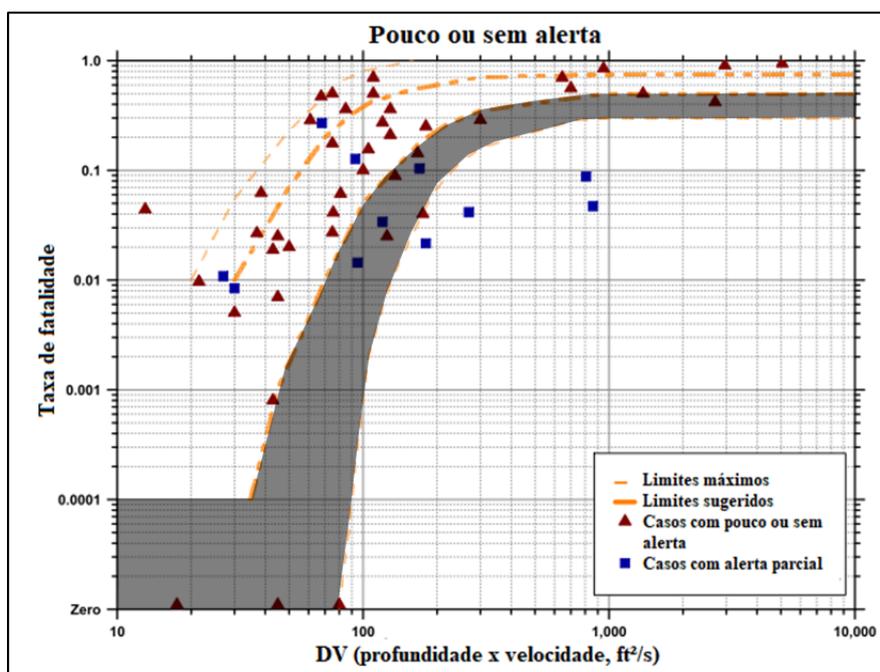


Figura 5.37: Intervalo do gráfico do RCEM adotado no cenário base de estimativa de perdas de vidas em Bento Rodrigues

Utilizando a metodologia de determinação do DV e da taxa de fatalidade por construção proposta por Meneses *et al.* (2015), foi obtida uma faixa de fatalidades de 31 a 77, superestimando o evento real ocorrido.

Além da incerteza presente na análise de vulnerabilidade e exposição para estimativa da população, essa superestimação possivelmente também tem influência da superestimação da mancha da inundação. Pela simulação hidráulica, foram atingidas 12 construções e 36 pessoas a mais que o observado.

Outro fator é a alta mobilização da população existente. Mesmo não sendo verificado um alerta adequado, houve a evacuação da maioria da população. Essas tipologias de casos dificilmente são presenciadas e, com isso, não devem estar presentes na compilação dos casos históricos considerados para elaboração do modelo.

5.2.4 Modelagem de perdas de vidas com HEC-LifeSim

A Figura 5.38 ilustra os dados de entrada utilizados no HEC-LifeSim indicando a mancha simulada obtida na modelagem hidráulica realizada no HEC-RAS, o inventário de construções obtido na etapa de análise de vulnerabilidade e exposição, o sistema viário retirado do

OpenStreetMap e os destinos adotados neste trabalho para evacuação na região afetada pela ruptura da barragem de Fundão.

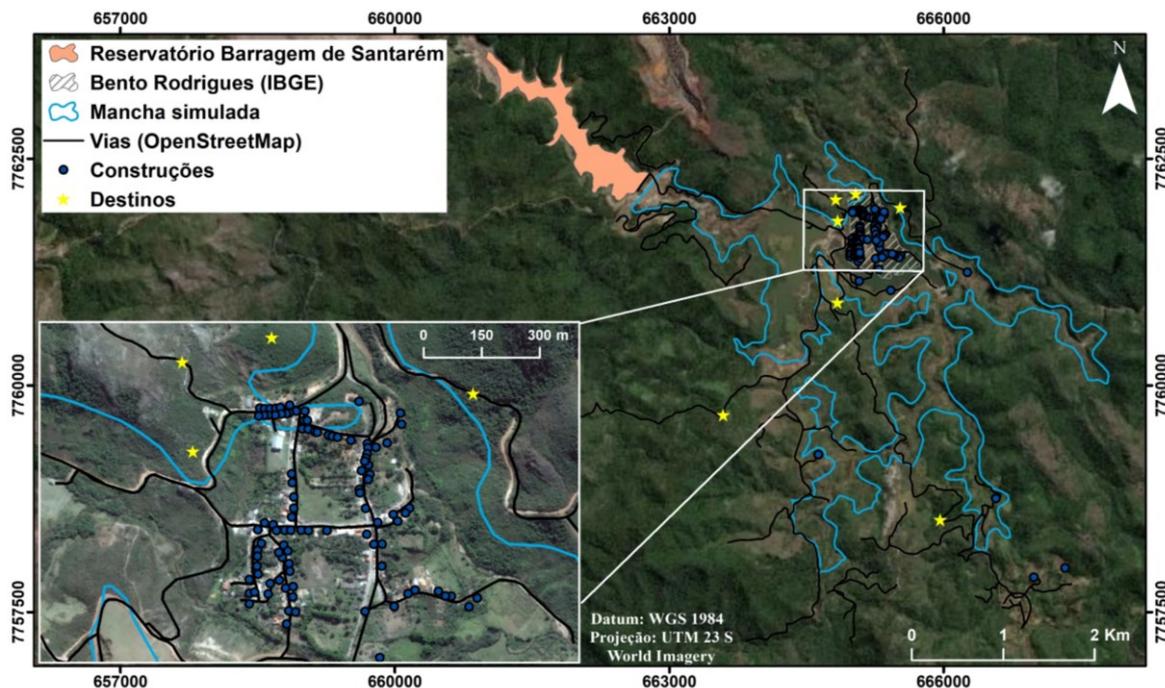


Figura 5.38: Dados de vias, construções e destinos utilizados para estimativa de perdas de vidas no HEC-LifeSim na região afetada pela ruptura da barragem de Fundão

Para complementar os dados necessários para execução do modelo do HEC-LifeSim, foram analisados e determinados os marcos e os atrasos existentes para caracterização do alerta e evacuação existente em Bento Rodrigues segundo a linha do tempo demonstrada na Figura 3.17.

Não houve identificação do perigo iminente antes da ocorrência da ruptura. Por isso, o tempo de identificação da ameaça foi considerado zero. O atraso da comunicação da ameaça adotado também foi zero pelo fato da existência de uma comunicação interna no momento imediato da ruptura.

Após notificação por meio da comunicação interna da empresa, uma funcionária de uma companhia terceirizada percorreu, em uma motocicleta, o distrito de Bento Rodrigues alertando a população antes que inundações alcançassem o povoado. A escolha dos coeficientes da Equação 3.32, que caracteriza o atraso para emissão do alerta, possibilita a existência de probabilidade de ocorrência de tempo de atrasos de emissão de alerta muito elevados, como demonstrado na Figura 3.18. Logo, para tentativa de representação dessa situação de alerta, adotou-se uma

distribuição de probabilidades triangular com valores mínimo, mais provável e máximo de 0, 5 e 10 minutos, respectivamente.

Para o atraso na difusão do alerta, a faixa de valores do coeficiente da Equação 3.33 escolhido para eficácia do alerta foi a recomendada de 5 a 10 para alerta rápido e do coeficiente de eficácia indireta foi de 0,1 a 0,2, indicando o alto alerta informal existente. Para representar a incerteza, foi considerada uma distribuição uniforme entre os limites das curvas utilizadas.

A Figura 5.39 apresenta o intervalo de curvas de difusão do alerta obtido para Bento Rodrigues. Para curva máxima, praticamente 100% da população é notificada em cerca de 26 minutos. Já para curva mínima, a integral difusão do alerta ocorre por volta de 53 minutos.

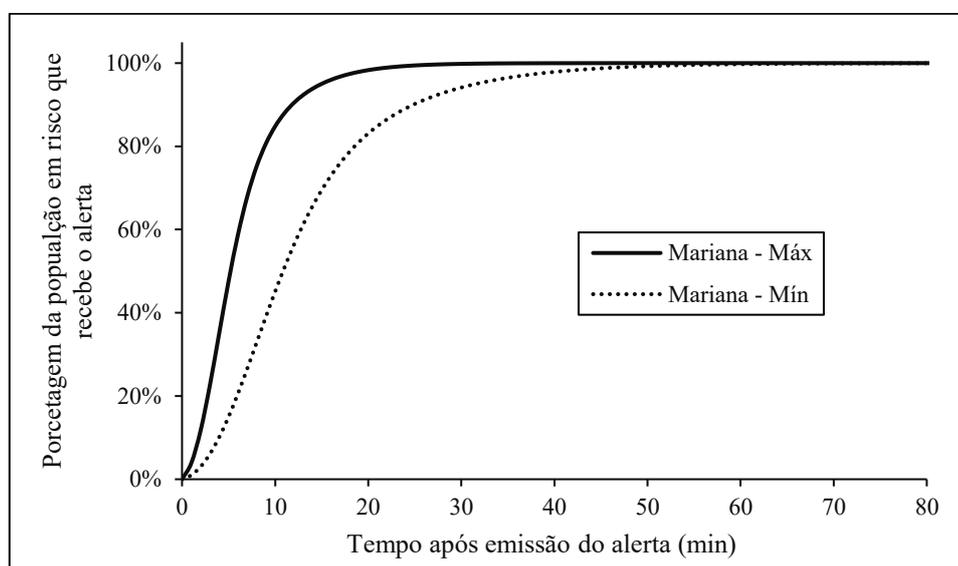


Figura 5.39: Intervalo de curvas de difusão do alerta segundo hipóteses adotadas para o cenário de base de evacuação em Bento Rodrigues

Para o cenário base, foi definido que evacuação da população ocorreria 50% a pé e 50% em veículos. Com isso, o atraso para mobilização foi representado pela faixa limitada superiormente pela curva para evacuação a pé ($a_m = 0,7$ e $b_m = 12$) e inferiormente pela curva B proposta por Sorensen & Mileti (2015c) e considerada mais provável de mobilização em uma comunidade ($a_m = 1,2$ e $b_m = 45$). Para representar a incerteza, foi considerada uma distribuição uniforme entre os limites das curvas utilizadas.

A Figura 5.40 apresenta o intervalo obtido de curvas de mobilização da população em Bento Rodrigues. Para a curva máxima, praticamente 100% da população se mobiliza em cerca de 23

minutos. Já para a curva mínima, a integral mobilização da população ocorre por volta de 126 minutos.

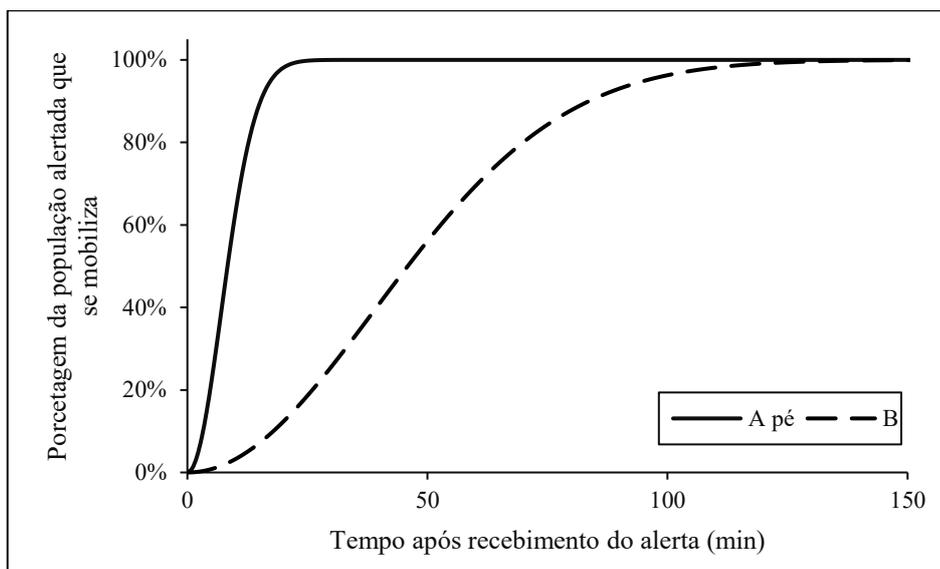


Figura 5.40: Intervalo de curvas de mobilização da população segundo hipóteses adotadas para o cenário de base de evacuação em Bento Rodrigues

Após a caracterização do alerta, a simulação com 1.000 interações foi realizada obtendo os seguintes valores dos quartis de fatalidades apresentadas na Tabela 5.19.

Tabela 5.19: Estimativa de perdas de vidas para o cenário base em Bento Rodrigues - HEC-LifeSim

Estimativa de fatalidades				
Menor	1º quartil	Mediana	3º quartil	Maior
36	156	189	217	265

Os valores obtidos superestimam os do evento real ocorrido de cinco pessoas entre vítimas fatais e desaparecidos em Bento Rodrigues. Mesmo sem alerta, o caso possuiu uma rápida evacuação da população, o que é de difícil representação nos modelos em casos de inundações com tempo de chegada da onda de inundação muito curto.

Essa superestimação também é presenciada por Risher *et al.* (2017) em um estudo de validação de uma inundação causada por ruptura de dique no Japão, possuindo as mesmas características de evacuação e de severidade, na qual foi verificado um número de fatalidades entre 10 e 20 vezes maior que o real ocorrido.

Além da simulação hidráulica atingir 12 construções e 36 pessoas a mais que o observado, na análise da propagação da onda de rejeitos, a inundação alcança o distrito de Bento Rodrigues em torno de 23 minutos. Tal período de tempo não foi suficiente para que o modelo representasse a real evacuação ocorrida. Na situação mais favorável, analisando a caracterização do alerta e da evacuação adotada, seriam necessários 49 minutos para integral evacuação da população. A Tabela 5.20 apresenta os quartis de porcentagem da população mobilizada nas interações realizadas.

Tabela 5.20: Porcentagem da população mobilizada no cenário base em Bento Rodrigues - HEC-LifeSim

População mobilizada (%)				
Menor	1º quartil	Mediana	3º quartil	Maior
1,64	19,00	33,25	45,39	89,80

Entre os atrasos definidos na caracterização do alerta e da evacuação, a faixa de curvas adotadas para representar o atraso na mobilização é a mais impactante na estimativa de fatalidades. Isso ocorre pelo fato de essa faixa escolhida ser mais ampla comparada aos outros atrasos.

As interações que utilizaram curvas próximas ao limite inferior do intervalo obtiveram uma concentração de fatalidades bem elevada. Já para interações que utilizaram curvas mais próximas ao limite superior, foram observados números de fatalidade menores e menos concentrados devido à influência dos outros atrasos. A Figura 5.41 ilustra essa tendência apresentada anteriormente.

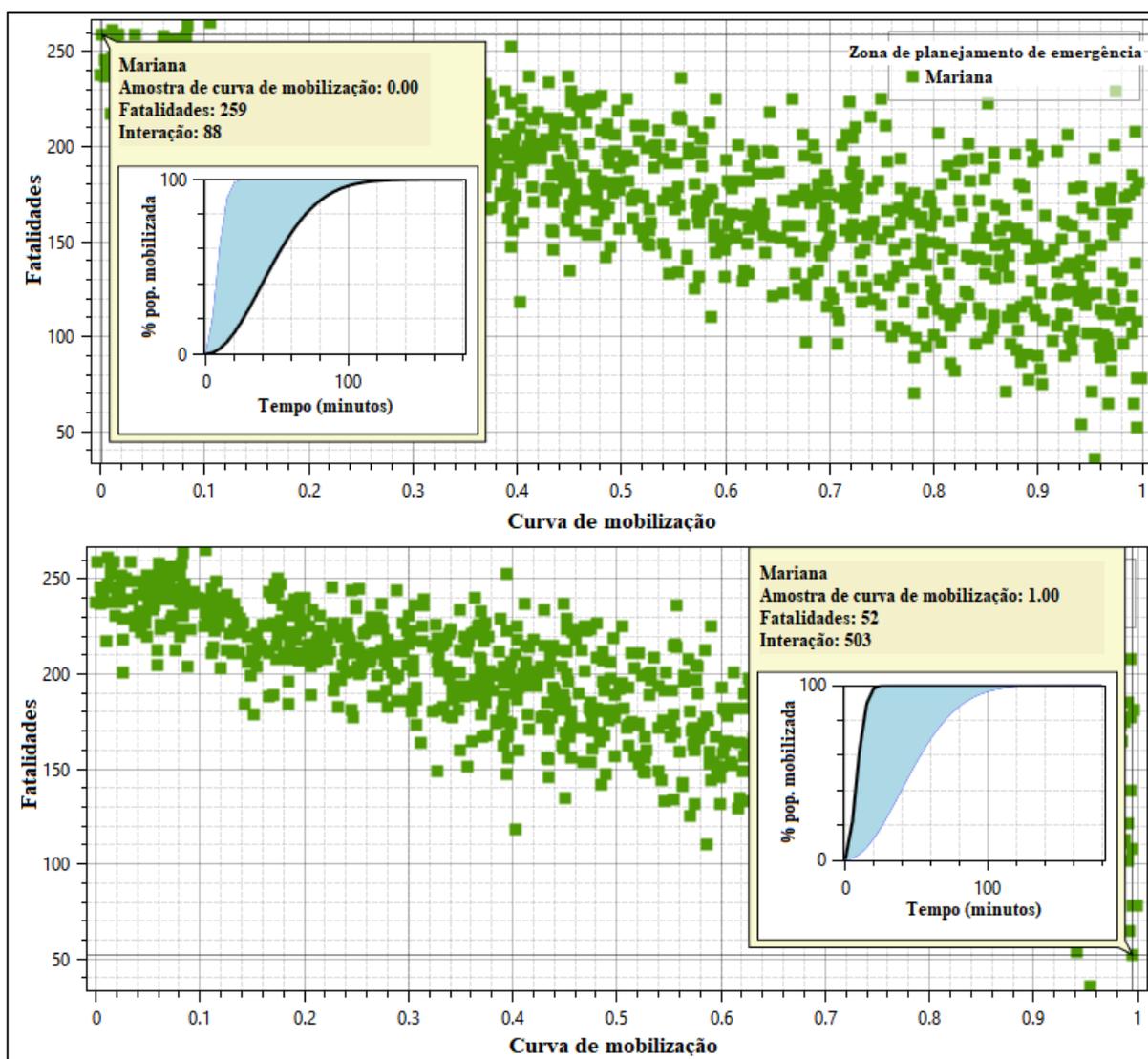


Figura 5.41: Relação entre número de fatalidades e o intervalo de curvas de mobilização adotado no cenário base em Bento Rodrigues

5.2.5 Análise de sensibilidade do modelo RCEM

A estimativa de perdas de vidas pelo RCEM utilizando os outros intervalos dos gráficos da Figura 3.14 e da Figura 3.15 é apresentada na Tabela 5.21. Para alerta adequado, não foram observadas fatalidades nos limites mínimos. Já para o caso de pouco ou sem alerta, as fatalidades observadas foram maiores que o evento real ocorrido em todos os limites.

Tabela 5.21: Estimativa de fatalidades em Bento Rodrigues utilizando outras faixas do RCEM

Gráfico	Intervalo			
	Sugerido		Limite	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Alerta adequado	0	4	0	37
Pouco ou sem alerta	77*	175	31*	275

*Cenário base

Para aplicação do RCEM, com a metodologia de determinação de DV proposta por USBR (2015), foram considerados três trechos: o trecho de contendo Bento Rodrigues e outros dois para duas construções isoladas (Figura 5.42).

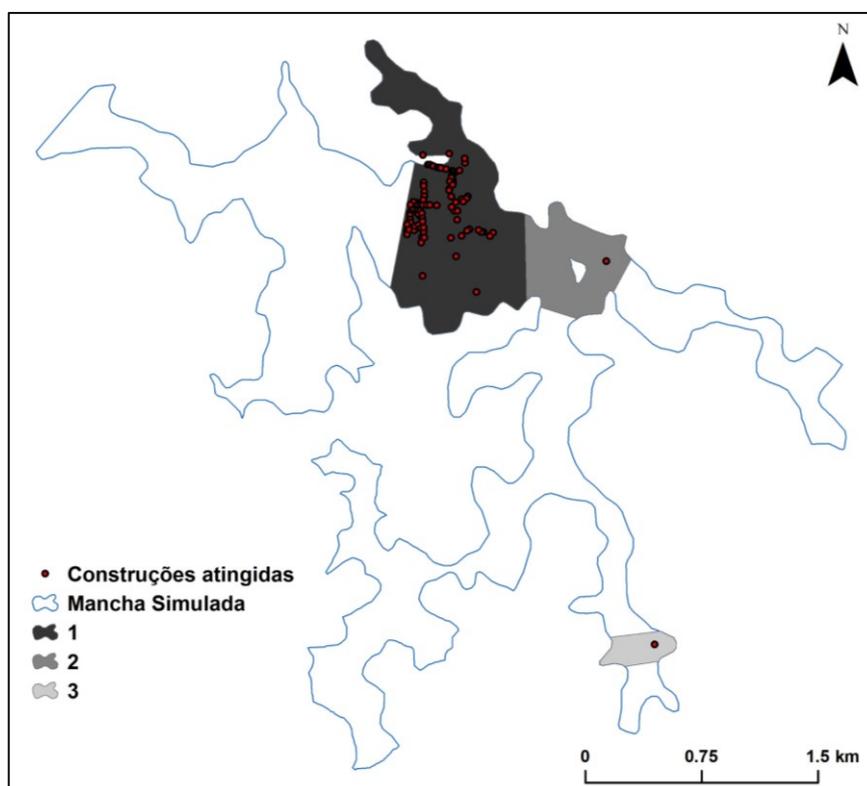


Figura 5.42: Trechos utilizados da mancha de inundação simulada para obtenção do parâmetro DV em Bento Rodrigues por meio da proposta de USBR (2015)

Nos dois primeiros trechos, os valores do DV médios obtidos foram próximos (Tabela 5.22). No primeiro trecho a vazão simulada foi maior, porém a largura também foi maior aproximadamente na mesma proporção, o que resultou nessa proximidade dos resultados. No último trecho, é observado um menor volume de rejeitos devido à anterior divisão da inundação

em dois sentidos diferentes. Assim, as vazões são muito baixas comparadas às vazões mais a montante, o que resultou no valor muito pequeno do DV médio.

Tabela 5.22: Determinação do DV nos trechos adotados da mancha de inundação simulada em Bento Rodrigues

Trecho	Vazão (ft ³ /s) {m ³ /s}		Largura (ft) {m}		DV (ft ² /s) {m}		
	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Médio
1	358.340	213.042	2.732	1.857	131	115	123
	{10.141}	{6.029}	{833}	{566}	{12,2}	{10,7}	{11,4}
2	213.042	87.427	1.857	805	115	109	112
	{6.029}	{2.474}	{566}	{245}	{10,7}	{10,1}	{10,4}
3	13.319	8.386	1.054	720	13	12	12
	{377}	{237}	{321}	{219}	{1,2}	{1,1}	{1,1}

Praticamente toda população foi observada no primeiro trecho, no qual foi verificada uma estimativa de perdas de vidas mais próxima do evento real comparado ao simulado no cenário base (Tabela 5.23).

Tabela 5.23: Estimativa de fatalidades pelo modelo RCEM em cada trecho adotado da mancha de inundação simulada em Bento Rodrigues

Trecho	População	Taxa de Fatalidade		Fatalidades	
		Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
1	301	0,0073	0,0844	2	25
2	3	0,0040	0,0675	0	0
3	0	0,0000	0,0001	0	0
Total				2	25

5.2.6 Análise de sensibilidade do modelo HEC-LifeSim

Na análise de sensibilidade do período do dia, foi observado um número maior de fatalidades durante a noite comparado ao dia face à quantidade de pessoas presentes nas construções em cada período. Como identificado na análise de vulnerabilidade, à noite 490 pessoas estão presentes na área de risco determinada; já à tarde, a população é reduzida para 356. A Tabela 5.24 apresenta os valores e a Figura 5.43 ilustra os resultados da modelagem.

Tabela 5.24: Valores da análise de sensibilidade do período do dia na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Bento Rodrigues

Cenário	Estimativa de fatalidades				
	Menor	1º quartil	Mediana	3º quartil	Maior
Base	36	156	189	217	265
Dia	65	201	247	286	336

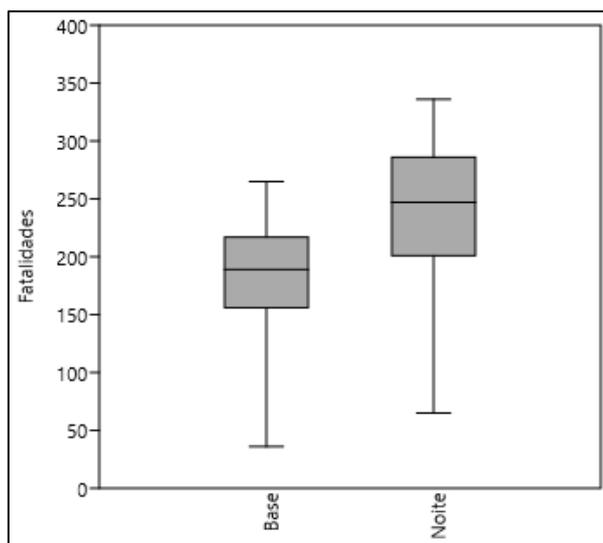


Figura 5.43: Análise de sensibilidade do período do dia na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Bento Rodrigues

Mesmo apresentando o tempo de chegada da onda de inundação muito curto, fatores envolvidos no modo de evacuação, como velocidade do veículo e do pedestre e tráfego, não foram bastante impactantes no resultado. A maior diferença observada na mediana foi de 6,2% entre evacuação da população integralmente em veículos e integralmente a pé (Tabela 5.25 e Figura 5.44). Além disso, não há uma tendência idêntica explícita nos quartis do resultado probabilístico entre o número de fatalidades e o modo de evacuação.

Tabela 5.25: Valores da análise de sensibilidade do modo de evacuação na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Bento Rodrigues

Cenário	Estimativa de fatalidades				
	Menor	1º quartil	Mediana	3º quartil	Maior
Base	36	156	189	217	265
100% Veículo	42	144	181	215	260
75% Veículo	38	148	185	218	265
25% Veículo	43	158	193	222	269
0% Veículo	42	162	193	224	264

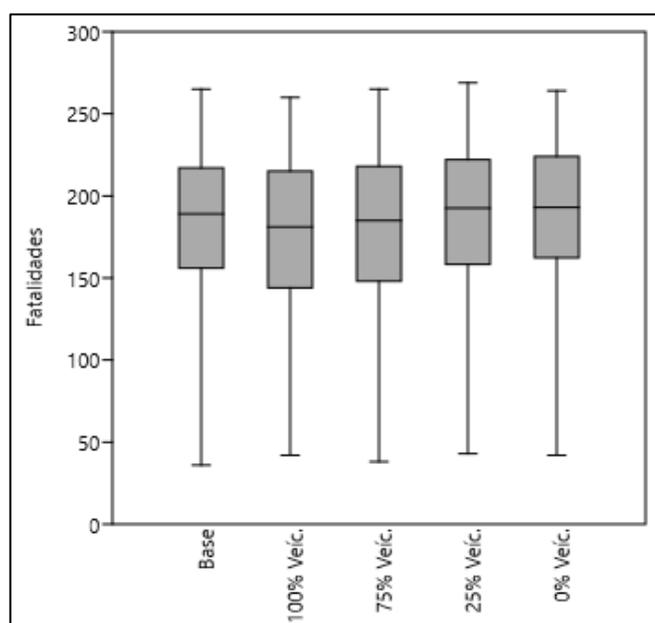


Figura 5.44: Análise de sensibilidade do modo de evacuação na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Bento Rodrigues

Para verificação da influência do tempo da identificação da ameaça na estimativa de perdas de vidas, foram considerados quatro cenários com períodos de adiantamentos nessa identificação da ameaça iguais de 30 em 30 minutos e com distribuição uniforme para representar a incerteza. No caso mais extremo, foi observada uma redução na mediana de 189 fatalidades do cenário base para uma fatalidade como apresentado na Tabela 5.26 (em que “—” representa o adiantamento na identificação da ameaça) e ilustrado na Figura 5.45.

Tabela 5.26: Valores da análise de sensibilidade do tempo de identificação da ameaça na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Bento Rodrigues

Cenário	Estimativa de fatalidades				
	Menor	1º quartil	Mediana	3º quartil	Maior
Base	36	156	189	217	265
-0 a 30 minutos	0	72	123	169	252
-30 a 60 minutos	0	22	47	76	190
-60 a 90 minutos	0	5	12	23	79
-90 a 120 minutos	0	0	1	4	26

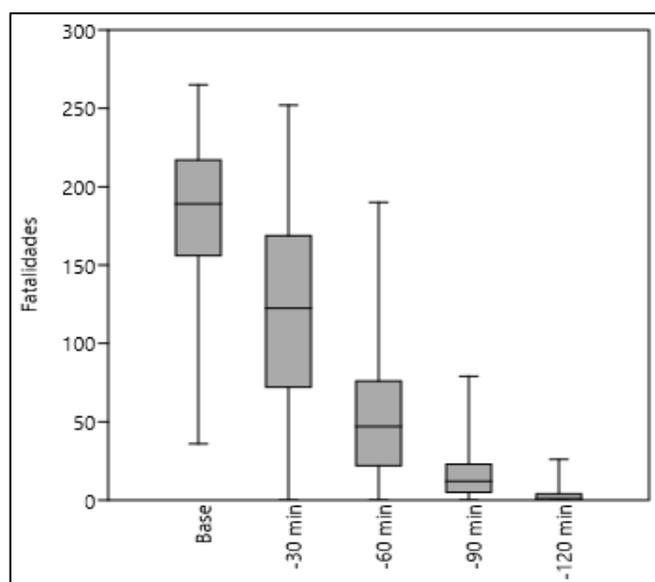


Figura 5.45: Análise de sensibilidade do tempo de identificação da ameaça na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Bento Rodrigues

Utilizando as curvas padrão do HEC-LifeSim para os atrasos definidos por Sorensen e Miteli (2014a, 2014b e 2014c), foi observada uma maior variabilidade das estimativas de perdas de vidas para o atraso da emissão do alerta e um impacto maior na medida de tendência central para o atraso na mobilização.

Todas as curvas de atraso na emissão de alerta permitem probabilidades de ocorrência de tempo de atrasos muito elevadas (Figura 3.18). Já entre as curvas de mobilização, há diferenças impactantes e que se tornam intensificadas pela consideração da preparação e percepção da população (Figura 3.19 e Figura 3.20). A Tabela 5.27, Tabela 5.28 e Tabela 5.29 apresentam os valores e a Figura 5.46 ilustra os resultados da modelagem realizada.

Tabela 5.27: Valores da análise de sensibilidade das curvas de atraso na emissão do alerta na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Bento Rodrigues

Cenário	Estimativa de fatalidades				
	Menor	1º quartil	Mediana	3º quartil	Maior
Base	36	156	189	217	265
Bom	27	187	240	257	303
Moderado	39	239	254	261	315
Mínimo	80	250	257	262	313
<i>Ad-hoc</i>	139	250	257	262	315
Desconhecido	50	246	255	261	289

Tabela 5.28: Valores da análise de sensibilidade nas curvas de atraso da difusão do alerta na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Bento Rodrigues

Cenário	Estimativa de fatalidades				
	Menor	1º quartil	Mediana	3º quartil	Maior
Base	36	156	189	217	265
Rápido	60	190	216	237	267
Moderadamente rápido	89	221	240	251	269
Moderado	209	250	256	261	272
Devagar	213	250	257	262	274
Desconhecido	53	195	226	246	267

Tabela 5.29: Valores da análise de sensibilidade nas curvas de atraso de mobilização da população na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Bento Rodrigues

Cenário	Estimativa de fatalidades				
	Menor	1º quartil	Mediana	3º quartil	Maior
Base	36	156	189	217	265
Boa/provável	173	230	242	250	267
Boa/improvável	180	233	244	252	267
Pobre/provável	213	250	255	260	272
Pobre/improvável	213	250	256	261	274
Desconhecido	149	222	237	248	271

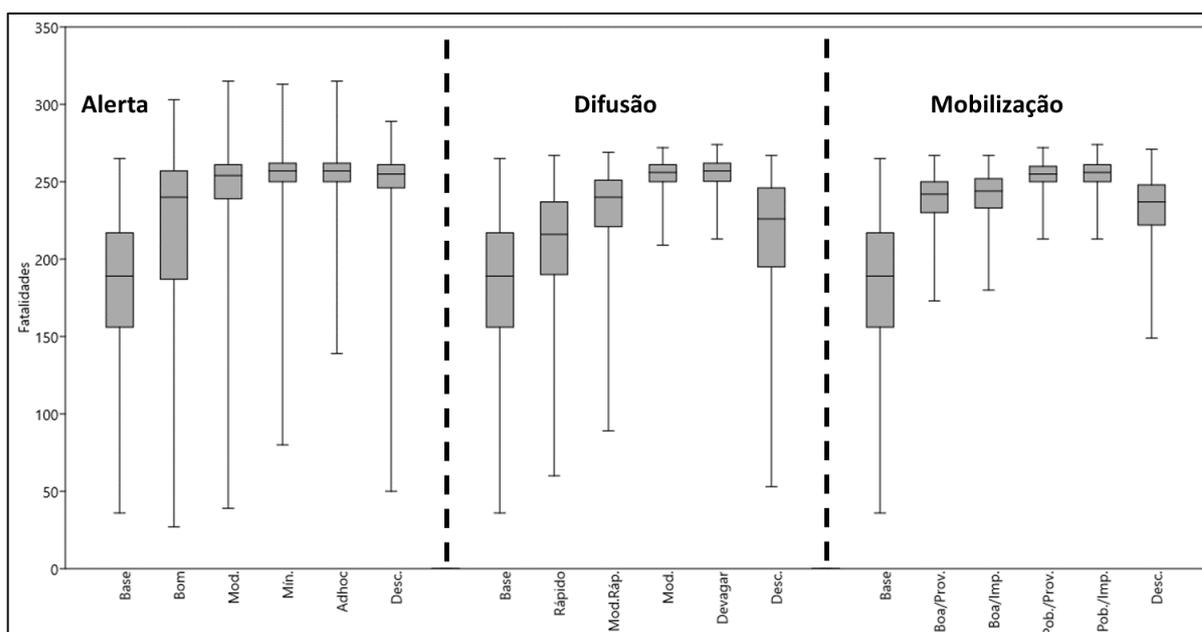


Figura 5.46: Comparação dos resultados das análises de sensibilidade das curvas de atraso de emissão, difusão e mobilização na estimativa de fatalidades do modelo HEC-LifeSim em Bento Rodrigues

6 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Os casos analisados apresentaram alta variabilidade nos parâmetros da inundação. A potencialidade do evento observado em Mirai, com valor de vazão de pico 422 m³/s no hidrograma de rutpura, foi muito menor que o ocorrido em Mariana, com valor de vazão de pico 21.842 m³/s no hidrograma de ruptura observado na barragem de Santarém.

Com isso, a onda de cheia que atingiu a zona urbana de Mirai casou menores valores de profundidades e de velocidades comparados aos valores simulados em Bento Rodrigues. Também como resultado, o tempo de chegada da inundação foi bem divergente, com a onda simulada atingido a área urbana de Mirai em um tempo aproximadamente seis vezes superior ao obtido em Bento Rodrigues. Conseqüentemente, tais resultados impactaram as estimativas de perdas de vidas. O risco hidrodinâmico (DV) e a taxa da população evacuada foram bem divergentes comparando os casos.

Face à utilização de bases de dados semelhantes de entrada, as modelagens hidrodinâmicas trouxeram representações dos acidentes bastante similares aos dos estudos de Rocha (2015) e Machado (2017). Diferenças encontradas, principalmente para o caso de Mirai, estão muito relacionadas ao tipo de modelagem (uni ou bidimensional) utilizada e aos divergentes coeficientes de *Manning* adotados. Tal parâmetro apresenta grande sensibilidade na simulação, principalmente para regiões de vales encaixados e estreitos, como é observado em Mirai. De maneira geral, é observado ainda, em casos de inundações causadas por rupturas de barragens, alta sensibilidade nos resultados da propagação da onda de cheia em relação à brecha, à topografia e ao tipo de modelo utilizado (equações completas de *Saint-Venant* ou onda difusa).

Mesmo com as observações apresentadas e com as hipóteses adotadas neste estudo para propagação da onda de rejeitos, os resultados obtidos foram considerados satisfatórios, principalmente pelo acordo do tempo de chegada da onda de inundação simulado ao observado no evento ocorrido pelo fato de tal parâmetro possuir grande impacto na estimativa de perdas de vidas por meio de sua relação com as etapas presentes no processo de evacuação.

Em relação à análise de vulnerabilidade e exposição, foi verificada uma dificuldade de conferência dos resultados devido à falta de informações precisas sobre o evento real. Contudo, para o caso de Fundão, há relatos sobre a presença de cerca de 300 pessoas em Bento Rodrigues, com 60 pessoas na escola no momento do evento, se aproximando do valor estimado.

Nessa análise de vulnerabilidade e exposição realizada existem diversas incertezas e limitações. A análise se limitou aos domicílios e algumas outras tipologias de construções. Além disso, devido à limitação de informação, foi considerado que todos os domicílios possuíam apenas um pavimento, não dispondo de porões. Nos casos analisados, por serem núcleos populacionais de pequeno porte, tais hipóteses provavelmente não afetaram muito os resultados. Em regiões mais populosas, as análises se tornariam mais incertas pelo fato da existência de uma grande quantidade de construções comerciais e com mais de um pavimento.

Uma outra fonte de incertezas está relacionada à data de produção dos dados. O censo demográfico ocorre no intervalo de tempo de 10 anos. Logo, informações sobre as construções e sobre a população podem estar desatualizadas.

A inserção de incertezas nas estimativas também ocorre nas hipóteses adotadas para caracterização e determinação da população presente nas construções em períodos distintos do dia. Além disso, a unidade geográfica para análise de vulnerabilidade e exposição foi maior do que da região de interesse. Com isso, os valores obtidos pela análise foram arranjados de maneira proporcional e distribuídos de forma homogênea na região afetada.

Tais incertezas verificadas na análise de vulnerabilidade e exposição são observadas de maneira geral em diversos estudos. Como afirmado por Lang (2018), em estudos em inundações na Austrália, a utilização de modelos de estimativa de perdas de vidas baseados em agentes (*agent based*), que necessitam de dados em microescala, ainda é limitada devido à grande quantidade e qualidade de dados requeridos para execução desses modelos.

A tendência é que, cada vez mais, haja a diminuição dessas incertezas na análise de vulnerabilidade e exposição de regiões afetadas por inundações devido aos avanços de gestão e tecnológicos. Algumas metrópoles no Brasil, como Belo Horizonte, possuem dados vetoriais com informações caracterizando construções, porém ainda está muito distante do observado nos Estados Unidos, onde há um inventário de construções com a caracterização detalhada dessas construções e da população no banco de dados do *National Structure Inventory* (NSI).

Para modelagem de perdas de vidas, mais especificamente na aplicação do RCEM, confirmou-se a subjetividade do modelo. A delimitação de trechos e a determinação do risco hidrodinâmico em cada um desses trechos, como recomendado pelo USBR (2015), permitem a existência de um número menor ou maior de trechos, podendo causar diferentes estimativas de fatalidades.

Outro fator de subjetividade é a escolha da faixa do gráfico a utilizar. A recomendação do USBR (2015) é que a escolha deve se basear na comparação com os casos históricos utilizados na elaboração do modelo semelhantes ao caso analisado.

Porém, além de não semelhantes em relação ao tipo de armazenamento, os casos históricos são de países onde o gerenciamento de emergências de segurança de barragens é divergente do contexto brasileiro. Entre os 60 casos analisados, apenas o da barragem de Buffalo Creek era de rejeitos de mineração, o qual foi caracterizado por um cenário de pouco alerta, e assim, sendo utilizado para escolha do intervalo de aplicação do RCEM no cenário base do caso de Fundão.

Com a adoção do cenário base, utilizando considerações na aplicação do modelo recomendadas por Meneses *et al.* (2015), buscou-se contornar a subjetividade existente. A determinação do DV foi realizada construção por construção, face à possibilidade de a simulação bidimensional determinar a profundidade e a velocidade máxima em todas as células da região inundada. Já para escolha da taxa de fatalidade optou-se pela adoção da faixa com base no alerta observado.

Foram considerados satisfatórios os resultados no cenário base adotado para os dois estudos de casos. Em Mirai, houve concordância entre o número de fatalidades simuladas e observadas. Nas 80 construções atingidas com risco hidrodinâmico superior a $10 \text{ ft}^2/\text{s}$ ($0,9 \text{ m}^2/\text{s}$), valor inicial para aplicação do RCEM, a média desse fator DV foi de $26 \text{ ft}^2/\text{s}$ ($2,4 \text{ m}^2/\text{s}$). Aplicando a taxa de fatalidade máxima desse DV médio e considerando apenas a população presente nessas 80 construções (223), é estimado um número de fatalidade inferior a um.

Em Bento Rodrigues, a superestimação obtida foi observada pela superestimação da mancha de inundação. Pela simulação hidráulica e considerando a análise de vulnerabilidade realizada neste trabalho, foram atingidas 12 construções e 36 pessoas a mais que o evento observado. Além disso, casos com grande mobilização, mesmo sem possuir um alerta adequado, como o caso de Mariana, não são presenciados na compilação de eventos históricos utilizados para elaboração de modelo.

A confirmação da subjetividade do modelo pode ser observada na análise de sensibilidade. Para determinação do DV, aplicando a metodologia do USBR (2015), foi superestimado e subestimado o número de fatalidades para Mirai e Mariana, respectivamente. Já a escolha da região do gráfico a utilizar apresentou uma variabilidade elevada nos valores das estimativas.

Já em relação ao HEC-LifeSim, observou-se que a análise *a posteriori* realizada neste trabalho, por meio da escolha direta dos coeficientes das Equações 3.32, 3.33 e 3.34 para caracterização da evacuação, resultou em um cenário base conservador, com a maior porcentagem de mobilização da população em relação ao processo alerta padrão existente no modelo.

Os valores obtidos para o caso de Mirai estão de acordo com o evento real com nenhuma fatalidade observada. A onda de rejeitos atinge o início e o final da área urbana em 2,5 horas e entre de 3,5 e quatro horas, respectivamente. Esse período de tempo foi suficiente para que ocorresse, em média, a mobilização de 99,96% da população.

Apesar desse cenário conservador da evacuação, a estimativa de fatalidades para o caso de Fundão foi muito maior em comparação ao real ocorrido. Além da mancha simulada atingir mais construções e pessoas em relação ao observado, na análise da propagação da onda de rejeitos, a inundação alcançou o distrito de Bento Rodrigues em torno de 23 minutos. Esse período de tempo não foi suficiente para que o modelo representasse a real evacuação ocorrida.

Esse resultado não foi uma peculiaridade do caso, visto que Risher *et al.* (2017), em um estudo de validação de uma inundação causada por ruptura de dique no Japão possuindo as mesmas características de evacuação e de severidade, estimaram fatalidades de 10 a 20 vezes maior que o real ocorrido.

A análise de sensibilidade, além de verificar o alto impacto da existência ou não de mecanismos que permitam identificar o perigo iminente antes da ruptura e a importação do sistema de alerta e evacuação bem concebidos, confirmou o cenário base otimista adotado no processo de evacuação. Em todas as curvas padrão do modelo para representar o atraso na emissão do alerta, na difusão do alerta e na mobilização, as estimativas de perdas de vidas foram superiores às obtidas no cenário base.

Além disso, para ambos os casos analisados, foi observada uma maior variabilidade dos resultados para o atraso na emissão do alerta e um impacto maior na medida de tendência central para o atraso na mobilização, destacando a necessidade de atenção ao determinar os coeficientes relacionados à velocidade e ao tempo médio para mobilização da Equação 3.34.

Por fim, comparando os dois modelos de estimativa de perdas de vidas, foi observado que os resultados se assemelham ao observado por Hill *et al.* (2018). Assim como no estudo de caso

de Mariana, a estimativa de fatalidades causadas por ruptura de barragens de água na Austrália pelo HEC-LifeSim foi superior ao RCEM nos locais que possuíam uma grande concentração de população próxima a barragem, em que a onda de inundação com tempo de chegada curto limitou o tempo disponível para população em risco receber e agir sobre uma ordem de evacuação e em locais que possuíam alta severidade de inundação causando a destruição de construções.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A estimativa de fatalidades, por meio de modelagens computacionais e simulações matemáticas, podem fornecer importantes subsídios ao planejamento de emergência. Os modelos de estimativa de perdas de vidas disponíveis foram desenvolvidos considerando o fluido aquoso. Com isso, neste trabalho, buscou-se avaliar a aplicabilidade de dois modelos de estimativa de perdas de vidas com abordagens divergentes, o modelo empírico RCEM e o baseado em agentes HEC-LifeSim, em situações de inundações causadas por rupturas de barragens de rejeitos de mineração, casos em que o fluido não é aquoso, por meio da análise de acidentes que já ocorreram.

Atualmente, além de um cenário de diversos eventos de rupturas de barragens de rejeitos de mineração, existem 219 barragens dessa tipologia classificadas com dano potencial associado alto e que, logo, necessitam de elaboração ou revisão periódica do PAEBM. Com isso, essa avaliação de aplicabilidade apresentou como maior intuito a possibilidade de inserir a estimativa de perdas de vidas na verificação da qualidade e da eficácia do sistema de alerta propostos em PAEBMs.

Foram analisados dois estudos de caso em acidentes ocorridos em Minas Gerais: Fundão, em Mariana, e São Francisco, em Mirai. A análise desses casos permitiu a verificação da resposta dos modelos para estimativa de perdas de vidas de diferentes ordens de grandeza. Os casos apresentaram variabilidade de fatalidades observadas, desde nenhuma em Mirai e 19 pessoas entre vítimas fatais e desaparecidos em Mariana, sendo que 14 estavam trabalhando no complexo minerador e cinco estavam no distrito de Bento Rodrigues.

A modelagem hidrodinâmica, apesar de algumas diferenças observadas em relação aos estudos de retroanálise de Rocha (2015) e Machado (2017), apresentou resultado de acordo com o observado principalmente em relação ao tempo de chegada da onda da inundação, que é um dos principais parâmetros na modelagem de perdas de vidas por estar totalmente vinculado ao tempo disponível para evacuação da população em risco.

A utilização de dados censitários para realização da análise de vulnerabilidade e exposição, objetivando a caracterização das construções e da população das regiões atingidas, gerou uma aproximação do resultado obtido em relação ao observado em Bento Rodrigues. Porém, a metodologia aplicada neste trabalho para realização de análise de vulnerabilidade e exposição

apresentou diversas limitações devido às inúmeras hipóteses adotadas, sendo assim, a replicação dessa metodologia em qualquer outro estudo de caso deve ser analisada com critério para evitar impactos consideráveis na caracterização das construções e da população.

Em relação aos modelos de estimativa de perdas de vidas utilizados neste estudo. As vantagens do modelo baseado em agentes HEC-LifeSim em comparação ao modelo empírico RCEM incluem a possibilidade de simulações de Monte Carlo para avaliar as incertezas das estimativas e a capacidade de avaliar as fatalidades de maneira detalhada e de avaliar de maneira dinâmica a resposta da população em uma situação de inundação. Além disso, no HEC-LifeSim, há também ferramentas de animações que fornecem um modo mais ilustrativo de comunicação das possíveis consequências da ruptura de uma barragem para as partes interessadas, como os serviços de gerenciamento de emergência e a comunidade em risco.

Quanto à aplicabilidade desses modelos de estimativa de perdas de vidas, foi verificado que o modelo empírico RCEM, além de possuir uma série de desvantagens comparados aos baseados em agentes e de também possuir apenas um caso de ruptura de barragem de rejeitos na compilação de históricas de eventos, apresenta grande subjetividade na determinação dos parâmetros para aplicação, o que resulta em uma alta variabilidade nas estimativas de fatalidades.

Com isso, a aplicabilidade do RCEM, em inundações causadas por ruptura de barragens de rejeitos de mineração, fica restringida a análises preliminares ou em casos em que não existam dados suficientes para uma análise de vulnerabilidade e exposição detalhada, sem o intuito de verificação da eficácia do planejamento de emergência, possuindo apenas a intenção de se obter, a curto prazo, uma ordem de grandeza das fatalidades.

Como citado, uma das grandes vantagens do HEC-LifeSim no processo de avaliação da eficácia dos mecanismos adotados no planejamento emergência é a possibilidade de simulação, de modo dinâmico, da evacuação da população. Porém, o modelo possui, de maneira geral, limitações em representar situações com alta mobilização da população e com tempo de chegada da inundação muito curto.

A partir dos resultados deste trabalho, foi verificado que as curvas padrão do modelo para representar o atraso na emissão do alerta, na difusão do alerta e na mobilização geram uma alta variabilidade nas estimativas. Com isso, é altamente recomendável a utilização do guia de

entrevista de Sorensen e Mileti (2015b) (ANEXO A) juntamente aos intervalos de ponderações determinados para cada fator que impacta cada etapa da evacuação de Sorensen e Mileti (2015a) (ANEXO B) para estimativa dos valores máximos, mínimos e mais prováveis dos parâmetros das Equações 3.32, 3.33 e 3.34.

Atualmente, esforços vêm sendo realizados para melhora da caracterização do processo de evacuação da população. Por meio da análise de estudos recentes na área, possíveis atualizações do guia de entrevistas e das ponderações estão sendo consideradas. Em complementação a esses avanços, é necessária a verificação de potenciais alterações em ambos os documentos de Sorensen e Mileti (2015a e 2015b) buscando a adequação em relação ao contexto nacional, visto que esses documentos possuem tópicos que retratam o gerenciamento de emergências de segurança de barragens divergente do contexto brasileiro.

A melhor adequação da aplicabilidade do HEC-LifeSim em situações de ruptura de barragens de rejeitos pode ser realizada a partir das alterações de diversos padrões do modelo. Os critérios de estabilidade de construções e de pessoas em inundações, os limiares das zonas de inundação e as distribuições de probabilidade de taxas de fatalidade para essas zonas de inundação são editáveis. Logo, alterações nesses padrões podem auxiliar na representação das características físicas dos rejeitos no evento de inundação.

Outro fator a ser considerado no HEC-LifeSim é a extensão da análise de vulnerabilidade e exposição. Como verificado por Hill *et al.* (2018), alertas antecipados podem causar mais fatalidades que alertas mais tardios, visto que uma determinada população que não está na área de risco pode adentrar nessa área durante o processo de evacuação. Com isso, para todas as tipologias de inundações, é recomendada uma análise de vulnerabilidade e exposição que possua uma extensão além da mancha da inundação, como foi executado neste trabalho.

A pesquisa realizada se apresentou como um início da exploração da utilização de modelos de estimativa de perdas em inundações causadas por rupturas de barragens de rejeitos de mineração. No cenário nacional, esse início da exploração se estende a todas as tipologias de inundações, visto que os trabalhos na área de estimativa de perdas de vidas, de maneira geral, são escassos.

A partir de uma maior compreensão desses modelos de perdas de vidas, este trabalho pode trazer subsídios para que a legislação brasileira direcionada à segurança de barragens insira a estimativa de fatalidades no conteúdo mínimo necessário nos planos de ações emergências.

Por fim, durante a elaboração da pesquisa, foram observados os seguintes aspectos que são potenciais estudos futuros:

- a análise da legislação em relação à segurança de barragens realizada neste trabalho foi direcionada apenas para o contexto nacional. Desse modo, recomenda-se a avaliação da legislação no cenário internacional, verificando o conteúdo mínimo exigido na elaboração do PAE, com ênfase para existência da obrigatoriedade ou não da análise de perdas de vidas;
- há diversas fontes de incertezas presentes na modelagem hidrodinâmica, como por exemplo: brecha de ruptura, topografia, coeficiente de *Manning*, equação utilizada (equações completas de *Saint-Venant* ou onda difusa) e tipo de fluido adotado (newtoniano ou não-newtoniano). Nesse sentido, indica-se a realização de estudos que possam quantificar essas incertezas para identificação de quais fontes possuem maior impacto nos resultados da modelagem;
- o caso da ruptura da barragem B1 da Mina Córrego do Feijão em Brumadinho não foi analisado neste trabalho pela não disponibilidade de dados necessários para realização do estudo a tempo suficiente. Com o registro de 270 pessoas entre vítimas fatais e desaparecidos (WISE, 2020), a análise desse caso permitiria a verificação da resposta dos modelos de estimativa de perda de vida em uma ordem de grandeza diferente dos casos de Miraf e Mariana. Nesse sentido, a partir da aquisição desses dados necessários, recomenda-se análise similar à realizada neste estudo, com a elaboração do modelo de propagação da onda de inundação do evento ocorrido com a posterior análise de vulnerabilidade e exposição e verificação da aplicabilidade de modelos estimativa de perdas de vidas para o caso;
- em uma análise prospectiva, são analisadas diversas possíveis cheias com diferentes características de formação da brecha para o mapeamento de inundação. Com isso, a elaboração de manchas probabilísticas para cada cenário é uma alternativa à representação das probabilidades dos valores dos parâmetros de formação da brecha.

Lara (2016), através da utilização do controlador externo do HEC-RAS, McBreach, realizou a geração de manchas probabilísticas para diversos cenários em uma barragem de água em Tucuruí, Pará. Nesse sentido, recomenda-se a inserção dessa análise probabilística da inundação na estimativa de perdas de vidas;

- além da estimativa de perdas de vidas, a análise econômica de danos também é de extrema relevância em análises de investimentos, de seguros e de planejamento. Com isso, recomenda-se identificar a influência das características físicas dos rejeitos por meio da comparação entre a quantificação monetária de danos relatada em documentos sobre os acidentes e a estimativa de perdas econômicas obtida por meio de curvas de danos existentes na literatura. Almeida & Eleutério (2019) apresentam diversas tipologias de curvas de danos potenciais elaboradas em diferentes países;
- não há modelo de estimativa de perdas de vidas elaborado, exclusivamente, com dados de inundações causadas por rupturas de barragens de rejeitos. Entre os 60 casos considerados para elaboração do RCEM, apenas o da barragem de Buffalo Creek era relacionado a uma estrutura destinada à armazenamento dessa tipologia. Com isso, por meio do levantamento rigoroso das principais informações sobre a inundação e evacuação de casos históricos de rupturas de barragens de rejeitos, um modelo empírico poderia ser proposto e posteriormente aplicado para essas situações; e
- o HEC-LifeSim possui grande utilidade na verificação dos mecanismos adotados no planejamento de emergência para qualquer tipologia de inundação por permitir a simulação dinâmica da evacuação. Porém, além de vários critérios utilizados no modelo não considerarem as características físicas dos rejeitos, a caracterização do processo de evacuação é baseada em estudos e em regiões diferentes do contexto nacional. Com isso, é indicado o estudo de possíveis alterações nesses critérios, no guia de entrevista de Sorensen & Mileti (2015b) e nos intervalos de ponderações para determinação dos parâmetros das equações das principais etapas da evacuação de Sorensen & Mileti (2015a) visando melhorar a aplicabilidade desse modelo de estimativa de perdas de vidas em cenários inundações causadas por rupturas de barragens de rejeitos.

REFERÊNCIAS

ABOELATA, M. A.; BOWLES, D. S.; MCCLELLAND, D. M. GIS model for estimating dam failure life loss. In: RISK-BASED DECISION MAKING IN WATER RESOURCES, 10., 2002. Santa Barbara, Califórnia, Estados Unidos. *Anais...* Estados Unidos: Engineering Foundation Conference, 2002.

ABOELATA, M. A.; BOWLES, D. S.; MCCLELLAND, D. M. A Model for Estimating Dam Failure Life Loss. In: AUSTRALIAN COMMITTEE ON LARGE DAMS RISK WORKSHOP, 2003. Launceston, Tasmania, Australia. *Anais...* Hobart, Tasmânia, Austrália: Comitê Nacional Australiano de Grandes Barragens, 2003.

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.

ABT, S. R.; WITTIER, R. J.; TAYLOR, A.; LOVE, D. J. Human stability in a high flood hazard zone. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 25, n. 4, p. 881-890, 1989.

ALMEIDA, L. V. Q.; ELEUTÉRIO, J. C. Estado da Arte de Curvas de Danos Potenciais de Inundações para o Setor Habitacional. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 23., 2019, Foz do Iguaçu, Paraná. *Anais...* Porto Alegre, Rio Grande do Sul: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2019.

ANCEY, C. Plasticity and geophysical flows: a review. *Journal of non-Newtonian fluid mechanics*, v. 142, n. 1-3, p. 4-35, 2007.

ANM – Agência Nacional de Mineração. Classificação das Barragens de Mineração Brasileiras. Data base: Fevereiro de 2019. Superintendência de Produção Mineral, Gerência de Segurança de Barragens de Mineração, Brasília, Distrito Federal. Disponível em <<http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/pasta-cadastro-nacional-de-barragens-de-mineracao>> Acesso em 05/05/2019.

AZAM, S.; LI, Q. Tailings dam failures: a review of the last one hundred years. *Geotechnical News*, v. 28, n. 4, p. 50-54, 2010.

BARNES, H. A.; HUTTON, J. F.; WALTERS, K. An introduction to rheology: 1. ed. Nova Iorque: Elsevier, 1989.

BECKER, A. B.; JOHNSTONE, W. M.; LENCE, B. J. Wood frame building response to rapid-onset flooding. *Natural Hazards Review*, v. 12, n. 2, p. 85-95, 2010.

BERNERDO, C. E.; JULIEN, P.; LEON, A. Dam Breach Analysis in Tailings Storage Facilities (TMF). In: ASCE WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS, 2011. Palm Springs, Califórnia. *Anais...* Reston, Virgínia: Sociedade Americana de Engenheiros Civis, 2011.

BONABEAU, E. Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 99, n. suppl 3, p. 7280-7287, 2002.

BOWKER, L.; CHAMBERS, D. In the dark shadow of the supercycle tailings failure risk & public liability reach all time highs. *Environments*, v. 4, n. 4, p. 75, 2017.

BOWLES, D. S. Life Loss Estimation for RAMCAP, Appendix D in Conventional Dams and Navigation Locks, Sector-Specific Guidance (SSG), Risk Analysis and Management for Critical Asset Protection (RAMCAP) Phase III for Dams, Locks and Levees. Prepared for the Department of Homeland Security by ASME Innovative Technologies Institute, LLC. 2007.

BRANDT Meio Ambiente. EIA, Estudo de Impacto Ambiental. Barragem de Rejeitos do Fundão. 289 p. Belo Horizonte, 2005.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. Resolução nº 13, de 8 de agosto de 2019. Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante" ou por método declarado como desconhecido e dá outras providências. Brasília, 2019.

BRASIL. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução nº 143, de 10 julho de 2012. Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo volume do reservatório. Brasília, 2012a.

BRASIL. Congresso Nacional. Projeto de Lei nº 1.181 de julho de 2003. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB e cria o Conselho Nacional de Segurança de Barragens – CNSB e o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens – SNISB. Brasília, 2003.

BRASIL. Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei n. 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei n. 9.984, de 17 de julho de 2000. Brasília, 2010.

BRASIL. Lei nº 12.608 de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres; altera as Leis nºs 12.340, de 1º de dezembro de 2010, 10.257, de 10 de julho de 2001, 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.239, de 4 de outubro de 1991, e 9.394, de 20 de dezembro de 1996; e dá outras providências. Brasília, 2012b.

BRASIL - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Laudo Técnico Preliminar: Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais. Brasília, Distrito Federal, 2015. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo_tecnico_preliminar_ibama.pdf>. Acesso em 21/12/2019.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Defesa Civil. Banco de dados e registros de desastres: Sistema Integrado de Informações sobre Desastres - S2ID. 2013.

BRASIL. Portaria nº 70.389 de 17 de maio de 2017. Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem,

das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração, conforme art. 8º, 9º, 10, 11 e 12 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens – DNPM, Brasília, 2017.

BROWN, C. A.; GRAHAM, W. J. Assessing the threat to life from dam failure. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 24, n. 6, p. 1303-1309, 1988.

BUENO, M. C. D. *Grade estatística: uma abordagem para ampliar o potencial analítico de dados censitários*. 239f. Tese (Doutorado em Demografia) — Instituto de Filosofia e Ciências Humanas de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2014.

CAO-MA – Centro de Apoio Operacional das Promotorias de Justiça de Defesa do Meio Ambiente, Patrimônio Cultural, Urbanismo e Habitação. Laudo de Vistoria. Ofício Nº 120/05, referência SGDP Nº 435.354, Mirai, 2006a.

CAO-MA – Centro de Apoio Operacional das Promotorias de Justiça de Defesa do Meio Ambiente, Patrimônio Cultural, Urbanismo e Habitação. Informe técnico sobre vazamento de lama/barragem de rejeitos da lavagem de bauxita da Mineração Rio Pomba Ltda. Ofício Nº 03/06, referência SGDP Nº 507.433, Mirai, 2006b.

CONCHA LARRAURI, P.; LALL, U. Tailings dams failures: updated statistical model for discharge volume and runout. *Environments*, v. 5, n. 2, p. 28, 2018.

DEKAY, M. L.; MCCLELLAND, G. H. Predicting loss of life in cases of dam failure and flash flood. *Risk Analysis*, v. 13, n. 2, p. 193-205, 1993.

DIEGUEZ, C. A onda. Uma reconstituição da tragédia de Mariana, o maior desastre ambiental do país. *Folha de São Paulo*, julho de 2016. Disponível em: <<https://piaui.folha.uol.com.br/materia/a-onda-de-mariana/>>. Acesso em 10/10/2019.

DI MAURO, M.; DE BRUIJN, K. M.; MELONI, M. Quantitative methods for estimating flood fatalities: towards the introduction of loss-of-life estimation in the assessment of flood risk. *Natural Hazards*, v. 63, p.1083-1113, 2012.

DI MAURO, M.; LUMBROSO, D. Hydrodynamic and loss of life modelling for the 1953 Canvey Island flood. In: EUROPEAN CONFERENCE ON FLOOD RISK MANAGEMENT, 1., 2008. Oxford, Reino Unido. *Anais...*, Wallingford, Oxfordshire, Reino Unido: HR Wallingford, 2008.

DOOCY, S.; DANIELS, A.; MURRAY, S.; KIRSCH, T. D. The human impact of floods: a historical review of events 1980-2009 and systematic literature review. *PLoS Currents Disasters*, v.5, 2013.

FERREIRA, E. E.; BRANDÃO, P. R. G.; KLEIN, B.; PERES, A. E. C. Reologia de suspensões minerais: uma revisão. *Revista Escola de Minas*, v. 58, n. 1, p. 83-87, 2005.

FRIEDMAN, D. G. Computer simulation in natural hazard assessment. Boulder, Colorado: Institute of Behavioral Science, University of Colorado, 1975.

FROEHLICH, D. C. Embankment dam breach parameters and their uncertainties. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 134, n. 12, p. 1708-1721, 2008.

FROEHLICH, D. C. Predicting peak discharge from gradually breached embankment dam. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 21, n. 11, 2016.

G1. Veja lista de mortos e desaparecidos no rompimento de barragem em MG. *G1*, 15 de julho de 2016. Disponível em: <<https://piaui.folha.uol.com.br/materia/a-onda-de-mariana/>>. Acesso em 14/01/2020.

GALLEGOS, H. A.; SCHUBERT, J. E.; SANDERS, B. F. Structural damage prediction in a high-velocity urban dam-break flood: field-scale assessment of predictive skill. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 38, n. 10, p. 1249-1262, 2012.

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.

GRAHAM, W. J. A procedure for estimating loss of life caused by dam failure. Dam safety office report DSO-99-6. United States Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, 1999.

GREENSHIELDS, B. D.; CHANNING, W.; MILLER, H. A study of traffic capacity. In: ANNUAL MEETING OF THE HIGHWAY RESEARCH BOARD HELD AT WASHINGTON, 14., 1934. Washington DC, Estados Unidos. *Anais...* Estados Unidos: Conselho de Pesquisa Rodoviária, 1935.

GUTENSON, J. L.; ERNEST, A. N. S.; OUBEIDILLAH, A. A.; ZHU, L.; ZHANG, X.; SADEGHI, S. T. Rapid flood damage prediction and forecasting using public domain cadastral and address point data with fuzzy logic algorithms. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 54, n. 1, p. 104-123, 2018.

HELBING, D.; FARKAS, I.; VICSEK, T. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, v. 407, n. 6803, p. 487-490, 2000.

HELLWEGER, F.; MAIDMENT, D. R. AGREE-DEM surface reconditioning system. Universidade do Texas, Austin, 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.

HKV. Standard method for Predicting Damage and Casualties as a Result of Floods. 2000.

HUFF, F. A. Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water resources research*, v. 3, n. 4, p. 1007-1019, 1967.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Base de informações do Censo Demográfico 2010: Resultados do Universo por setor censitário. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Rio de Janeiro, 2011.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Descrição das variáveis da amostra do Censo Demográfico 2010. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Rio de Janeiro, 2010.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Grade Estatística. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Rio de Janeiro, 2016.

ICOLD – International Commission on Large Dams. Tailings Dams - Risk of Dangerous Occurrences, Lessons Learnt from Practical Experiences, Bulletin 121. Paris, França, 2001, 146p.

JEYAPALAN, J. K.; DUNCAN, J. M.; SEED, H. B. Analyses of flow failures of mine tailing dams. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 109, n. 2, p. 150 – 171, 1983a.

JEYAPALAN, J. K.; DUNCAN, J. M.; SEED, H. B. Investigation of flow failures of tailings dams. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 109, n. 2, p. 172 – 189, 1983b.

JIN, M.; FREAD, D. 1D modeling of mud/debris unsteady flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 125, n. 8, p. 827-834, 1999.

JONKMAN, S. N. *Overstromingsrisico's: een onderzoek naar de toepasbaarheid van risicomaten*. Dissertação — Universidade de Tecnologia de Delft., Holanda, 2001.

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

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.; KOLEN, B.; ZETHOF, M.; LEHMAN, W. P.; NEEDHAM, J. T. A comparative study on methods for loss of life estimation: Applications to case studies in the United States. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLOOD MANAGEMENT, 6., 2014. São Paulo, Brasil. *Anais...*, Pequim, China: Instituto de Pesquisa em Recursos Hídricos e Hidroeletricidade da China, 2014.

JONKMAN, S. N.; VAN GELDER, P.H.A.J.M.; VRIJLING, J. K. An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage. *Journal of hazardous materials*, v. 99, n. 1, p. 1-30, 2003.

JONKMAN, S. N.; VAN GELDER, P.H.A.J.M.; VRIJLING, J. K. Loss of life models for sea and river floods. *Flood defence*, v. 1, p. 196-206, 2002.

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, n.3, p. 353-389, 2008.

JOHNSTONE, W. M.; SAKAMOTO, D.; ASSAF H.; BOURBAN, S. Architecture, modelling framework and validation of BC Hydro's virtual reality life safety model. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON STOCHASTIC HYDRAULICS, 9., 2005. Nimegue,

Holanda. *Anais...* Pequim, China: Associação Internacional de Pesquisa Hidráulica, 2005.

KAWATRA, S. K.; BAKSHI, A. K. On-line measurement of viscosity and determination of flow types for mineral suspensions. *International Journal of Mineral Processing*, v. 47, n. 3-4, p. 275-283, 1996.

KOSSOFF, D.; DUBBIN, W. E.; ALFREDSSON, M.; EDWARDS, S. J.; MACKLIN, M. G.; HUDSON-EDWARDS, K. A. Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, v. 51, p. 229-245, 2014.

LANG, S. Current Australian and international practices for dam failure consequence assessments. In: AUSTRALIAN COMMITTEE ON LARGE DAMS CONFERENCE, 2018. Melbourne, Victoria, Austrália. *Anais...*, Hobart, Tasmânia, Austrália: Comitê Nacional Australiano de Grandes Barragens, 2018.

LANG, S.; MENESES, C.; HILL, P.; SIH, K. Comparing methods for estimating loss of life from dambreak flooding for two Australian dams. In: AUSTRALIAN COMMITTEE ON LARGE DAMS CONFERENCE, 2011. Melbourne, Victoria, Austrália. *Anais...*, Hobart, Tasmânia, Austrália: Comitê Nacional Australiano de Grandes Barragens, 2011.

LARA, P. G. *Metodologia Probabilística de Previsão de Brecha de Ruptura de Barragens*. 181f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2016.

LIND, N.; HARTFORD, D. Probability of human instability in a flooding: A hydrodynamic model, In: Proceedings Applications of statistics and probability; Melcher, R.E.; Stewart, M.G. (editors); Balkema, Rotterdam, p-1151. 2000.

LUCIA, P. *Review of experiences with flow failures of tailings dams and waste impoundments*. 228 f. PhD. Tese — Universidade da Califórnia, Berkeley, 1981.

MACDONALD, T. C.; LANGRIDGE-MONOPOLIS, J. Breaching characteristics of dam failures. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 110, n. 5, p. 567-586, 1984.

MACHADO, M. L., NASCIMENTO, N., BAPTISTA, M., GONÇALVES, M., SILVA, A., LIMA, J. D., DIAS, R.; SILVA, A.; MACHADO, E.; FERNANDES, W. Curvas de danos de inundação versus profundidade de submersão: desenvolvimento de metodologia. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, v.2, n.1, p.35-52, 2005.

MACHADO, N. C. *Retroanálise da Propagação Decorrente da Ruptura da Barragem do Fundão com Diferentes Modelos Numéricos e Hipóteses de Simulação*. 2017. 159f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) — Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2017.

MAIDMENT, D. R. ARC HYDRO: GIS for water resources. ESRI, Redlands, Califórnia, 2002.

MARANHÃO, F. Prejuízo causado por ruptura de barragens é de R\$ 100 mi, estima prefeitura. *Cotidiano, UOL*. Disponível em: <<https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2015/11/11/prejuizo-causado-por-ruptura-de-barragens-e-de-r-100-mi-estima-prefeitura.htm>>. Acesso em 21/12/2019.

MARSHALL, J. Tailings dam spills at Mount Polley and Mariana - Chronicles of Disasters Foretold. Centro Canadense de Políticas Alternativas, Vancouver, Canadá, 2018.

MARTIN, V.; AKKERMAN, A. Challenges with conducting tailings dam breach assessments. In: ANNUAL MEETING OF INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS, 85., 2017. Praga, República Tcheca. *Anais...* Paris, França: Comitê Internacional de Grandes Barragens, 2017.

MARTIN, V.; FONTAINE, D.; CATHCART, J. Challenges with conducting tailings dam breach studies. In: TAILINGS AND MINE WASTE, 2015. Vancouver, Colúmbia Britânica. *Anais...* Vancouver, Colúmbia Britânica, 2015.

MASCARENHAS, F. C. B. *Modelação Matemática de Ondas Provocadas por Ruptura de Barragens*. 291 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990.

MATOS, A. C. S.; ELEUTÉRIO, J. C. Análise de Perdas de Vidas Associadas à Ruptura Hipotética da Barragem de Fundão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 23., 2019, Foz do Iguaçu, Paraná. *Anais...*Porto Alegre, Rio Grande do Sul: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2019.

MCCLELLAND, D. M.; BOWLES, D. S: Estimating Life Loss for Dam Safety Risk Assessment - a Review and New Approach. Instituto de Recursos Hídricos, Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos, Alexandria, Virgínia. Estados Unidos, 2002.

MELO, L. P. R. de. *Análise comparativa de metodologias de previsão de inundação decorrente da ruptura de barragens de rejeitos: caso hipotético da barragem Tico-Tico*. 2013. 183f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) — Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2013.

MENESES, C.; LANG, S.; HILL, P.; ARNOLD, M. Towards consistency in potential loss of life estimates: Testing the new Reclamation Consequence Estimating Methodology. In: AUSTRALIAN COMMITTEE ON LARGE DAMS CONFERENCE, 2015. Brisbane, Queensland, Austrália. *Anais...*, Hobart, Tasmânia, Austrália: Comitê Nacional Australiano de Grandes Barragens, 2015.

MERZ, B.; KREIBICH, H.; SCHWARZE, R.; THIEKEN, A. Review article “assessment of economic flood damage.” *Natural Hazards and Earth System Science*, v.10, p.1697–1724, 2010.

MOEL, H.;ASSELMAN, N. E. M.; AERTS, J. C. J. H. Uncertainty and sensitivity analysis of coastal flood damage estimates in the west of the Netherlands. *Natural Hazards and Earth System Science*, v.12, p1045-1058, 2012.

MORGENSTERN, N. R.; VICK, S. G.; VIOTTI, C. B.; WATTS, B. D. Fundão Tailings Dam Review Panel. Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam. 88 p. 2016.

NEEDHAM, J.; FIELDS, W.; LEHMAN, W. The US Army Corps of Engineers Scalable Approach to Estimating Loss of Life from Flooding. In: EUROPEAN CONFERENCE ON FLOOD RISK MANAGEMENT, 3., 2016. Lyon, França. *Anais...*, Les Ulis, França: E3S Web

of Conferences, 2016a.

NEEDHAM, J.; SORENSEN, J.; MILETI, D.; LANG, S. Warning and mobilization of populations at risk of dam failure. In: AUSTRALIAN COMMITTEE ON LARGE DAMS CONFERENCE, 2016. Adelaide, Austrália Meredional, Austrália. *Anais...*, Hobart, Tasmânia, Austrália: Comitê Nacional Australiano de Grandes Barragens, 2016b.

NEEDHAM, J.; SORENSEN, J.; MILETI, D. Warnings and the human response in the Oroville Dam crisis, February 2017. In: ANNUAL UNITED STATES SOCIETY ON DAMS CONFERENCE AND EXHIBITION, 38., 2018. Miami, Flórida, Estados Unidos. *Anais...*, Denver, Colorado: Sociedade Americana de Barragens, 2018.

NRCS - National Water and Climate Center. *Manning's n Values for Various Land Covers to Use for Dam Breach Analyses by NRCS in Kansas*. Disponível em: <<https://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/H&H/HecRAS/NEDC/lectures/docs/Manning%20s%20n-values%20for%20Kansas%20Dam%20Breach%20Analyses%20-%20Adopted%20071216.pdf>>. Acesso em 15/05/2019.

NRCS - National Water and Climate Center. *National Engineering Handbook: Part 360, Hydrology*. Washington DC, 1997.

O'BRIEN, J. S.; JULIEN, P. Y. Physical properties and mechanics hyperconcentrated sediment flows. In: SPECIALTY CONFERENCE - DELINEATION OF LANDSLIDE, FLASH FLOOD AND DEBRIS FLOW HAZARDS IN UTAH, Logan, Utah, Estados Unidos, 1984. *Anais...* Utah: Universidade do Estado de Utah, 1985.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach. *Journal of Hydrology*, v. 406, n. 3-4, p. 170-181, 2011.

PENG, M.; ZHANG, L. M. Analysis of human risks due to dam-break floods—part 1: A new model based on Bayesian networks. *Natural Hazards*, v. 64, n. 1, p. 903-933, 2012.

PENNING-ROWSELL, E.; FLOYD, P.; RAMSBOTTOM, D.; SURENDRAN, S. Estimating injury and loss of life in floods: a deterministic framework. *Natural Hazards*, v. 36, n. 1-2, p. 43-64, 2005.

PIERCE, M. W.; THORNTON, C. I.; ABT, S. R. Predicting peak outflow from breached embankment dams. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 15, n. 5, p. 338-349, 2009.

PIMENTA DE ÁVILA CONSULTORIA LTDA. Germano / Planta II. Disposição de Rejeitos no Vale do Córrego Fundão. Plano de Ações Emergenciais (PAE). Estudo de Ruptura Hipotética da Barragem de Rejeitos do Córrego do Fundão. Relatório Técnico. Nova Lima, Minas Gerais: Pimenta de Ávila Consultoria Ltda, 47 p. 2008.

RESCDAM - Rescue Actions Based on Dam-Break Flood Analysis. The Use of Physical Models in Dam-Break Flood Analysis., Relatório Final da Universidade de Tecnologia de Helsínquia, Helsínquia, Finlândia, 2000.

REITER, P. RESCDAM: loss of life caused by dam failure, the Rescdam LOL method and its application to Kyrkosjarvi dam in Seinajoki (summary of the final report), Helsinki: PR Water

Consulting Ltd, 2001.

RICO, M.; BENITO, G.; DIEZ-HERRERO, A. Floods from tailings dam failures. *Journal of hazardous materials*, v. 154, n. 1-3, p. 79-87, 2008.

RISHER, P.; ACKERMAN, C.; MORRILL-WINTER, J.; FIELDS, W.; NEEDHAM, J. Levee Breach Consequence Model; Validated by Case Study in Joso, Japan. In: ASSOCIATION OF STATE DAM SAFETY CONFERENCE, 10., 2017, San Antônio, Estados Unidos. *Anais...* Lexington, Kentucky, Estados Unidos: Associação de Segurança de Barragens do Estado, 2017.

ROCHA, F. F. *Retroanálise da ruptura da barragem São Francisco – Mirai, Minas Gerais, Brasil*. 2015. 184f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) — Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

SILVA, A. F. R.; ELEUTÉRIO, J. C. Simulação de Perdas de Vidas Causadas por Inundações: Modelos Disponíveis e Aplicações Comparativas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 23., 2019, Foz do Iguaçu, Paraná. *Anais...* Porto Alegre, Rio Grande do Sul: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2019.

SORENSEN, J.; MILETI, D. First Alert and/or Warning Issuance Time Estimation for Dam Breaches, Controlled Dam Releases, and Levee Breaches or Overtopping. Projeto de Documento preparado pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos. Instituto de Recursos Hídricos, Centro de Gerenciamento de Crise. Davis, Califórnia, 2014a.

SORENSEN, J.; MILETI, D. First Alert or Warning Diffusion Time Estimation for Dam Breaches, Controlled Dam Releases and Levee Breaches or Overtopping. Projeto de Documento preparado pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos. Instituto de Recursos Hídricos, Centro de Gerenciamento de Crise. Davis, Califórnia, 2014b.

SORENSEN, J.; MILETI, D. Protective Action Initiation Time Estimation for Dam Breaches, Controlled Dam Releases, and Levee Breaches or Overtopping. Projeto de Documento preparado pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos. Instituto de Recursos Hídricos, Centro de Gerenciamento de Crise. Davis, Califórnia, 2014c.

SORENSEN, J.; MILETI, D. Influence Weights and Measures for the Factors Shaping First Alert/Warning Delay, Diffusion and Protective Action Initiation Curves for Dam Breaches, Controlled Dam Releases, and Levee Breaches or Overtopping. Documento preparado pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos. Instituto de Recursos Hídricos, Centro de Gerenciamento de Crise. Davis, Califórnia, 2015a.

SORENSEN, J.; MILETI, D. Interview Schedule – Community Warning Issuance, Diffusion, and Protective Action Initiation Estimation. Documento preparado pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos. Instituto de Recursos Hídricos, Centro de Gerenciamento de Crise. Davis, Califórnia, 2015b.

STRAUSS, A. J.; MARTIN V.; FONTAINE D. D.; CATHCART J. G. Key Steps for Conducting Tailings Dam Breach Studies. In: ANNUAL MEETING OF INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS, 84., 2016, Joanesburgo, África do Sul. *Anais...* Paris, França: Comitê Internacional de Grandes Barragens, 2016.

TRAVIS, B.; TEAL, M.; GUSMAN, J. Best methods and inherent limitations of bulked flow modeling with HEC-RAS. In: WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONFERENCE, 2012, Albuquerque, Novo México, Estados Unidos. *Anais...* Reston, Virgínia: Sociedade Americana de Engenheiros Civis, 2012.

TSCHIEDEL, A. F.; PAIVA, R. C. D. Uncertainty assessment in hydrodynamic modeling of floods generated by dam break. *Brazilian Journal of Water Resources*, v.23, n.30, 17p., 2018.

USACE – United States Army Corps of Engineers. Engineering Institute for Water Resources. Business Depth Damage Analysis Procedure. Relatório de Pesquisa 85-R-5, Alexandria, Virgínia, 1985.

USACE – United States Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center's – 2D Modeling User's Manual. Version 5.0.7. Davis, Califórnia, 2016a.

USACE – United States Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center's – Flood Impacts Analysis (HEC-FIA). Version 3.0. Davis, Califórnia, 2015.

USACE – United States Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center's – Hydraulic Reference Manual. Version 5.0. Davis, Califórnia, 2016b.

USACE – United States Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center's – Life Loss Estimation – User's Manual. Version 1.0.1. Davis, Califórnia, 2018a.

USACE – United States Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center's – Life Loss Estimation (HEC-LifeSim). Version 1.0.1. Davis, Califórnia, 2018b.

USACE – United States Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center's – Using HEC-RAS for Dam Break Studies. Davis, Califórnia, 2014.

USBR – United States Bureau of Reclamation. RCEM – Reclamation Consequence Estimating Methodology – Dam Failure and Flood Event Case History Compilation. Denver, Colorado, 2014a.

USBR – United States Bureau of Reclamation. Downstream Hazard Classification Guidelines. Denver, Colorado, 1988.

USBR – United States Bureau of Reclamation. RCEM – Reclamation Consequence Estimating Methodology – Examples of Use. Denver, Colorado, 2014b.

USBR – United States Bureau of Reclamation. RCEM – Reclamation Consequence Estimating Methodology – Interim Guidelines for Estimating Life Loss for Dam Safety Risk Analysis. Denver, Colorado, 2015.

USDHS – United States Department of Homeland Security. Dam Sector - Estimating Loss of Life for Dam Failure Scenarios. Washington, D.C., 2011.

USSD – United States Society on Dams. Changing Times —The Challenges and Risks of Managing Aging Infrastructure Under a New Financial Reality. In: ANNUAL UNITED STATES SOCIETY ON DAMS CONFERENCE AND EXHIBITION, 33., 2013. Phoenix, Arizona, 2013. *Anais...* Denver, Colorado: Sociedade Americana de Barragens, 2013.

VEIZAGA, F. M.; DE PAES, R. P.; ELEUTÉRIO, J. C.; ROCHA, F. F.; PALMIER, L. R. Modelagem hidráulica de inundação e estimativa de danos diretos causados por rompimento real da barragem São Francisco, Mirai, Minas Gerais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22., 2017, Florianópolis, Santa Catarina. *Anais...Porto Alegre*. Rio Grande do Sul: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 2017.

VON THUN, J. L.; GILLETTE, D. R. Guidance on breach parameters. Internal Memorandum, U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, 17, 1990.

VROUWENVELDER, A. C. W. M.; STEENHUIS, C. M. Tweede waterkeringen Hoeksche Waard, berekening van het aantal slachtoffers bij verschillende inundatiescenario's. Report TNO 97-CON-R0332. 1997.

XU, Y.; ZHANG, L. M. Breaching parameters for earth and rockfill dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v.135, n.12, p. 1957-197, 2009.

WAARTS, P. Methode voor de bepaling van het aantal doden als gevolg van inundatie. Report TNO B-91-1099. 1992.

WAHL, T. L. Uncertainty of predictions of embankment dam breach parameters. *Journal of hydraulic engineering*, v. 130, n. 5, p. 389-397, 2004.

WHITE, G. F. Human adjustment to floods. Departamento de Geografia. Universidade de Chicago. Chicago, Estados Unidos, 1945. 238p.

WISE. World Information Service on Energy Uranium Project. Chronology of Major Tailings Dam Failures. Disponível em: <<http://www.wise-uranium.org/mdaf.html>> Acesso em 14/01/2020.

YAMAZAKI, D.; BAUGH, C. A.; BATES, P. D.; KANAE, S.; ALSDORF, D. E.; OKI, T. Adjustment of a spaceborne DEM for use in floodplain hydrodynamic modeling. *Journal of Hydrology*, v. 436, p. 81-91, 2012.

ZHAI, G.; FUKUZONO, T.; IKEDA, S. An empirical model of fatalities and injuries due to floods in Japan. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 42, n. 4, p. 863-875, 2006.

APÊNDICE A

Script para seleção das variáveis dos microdados do censo demográfico de 2010

Amostra de domicílios

dictionary using "Diretório da amostra de domicílios"

```
{
_columnn(1)      float      uf          %2g    "Unidade da Federação"
_columnn(3)      float      mun          %5g    "Código do município"
_columnn(8)      double     areap       %13g   "Área de Ponderação"
_columnn(21)     double     inddom      %8g    "Identificação do domicílio "
_columnn(29)     double     pessoa     %16.13f "Peso amostral"
_columnn(46)     float      meso        %2g    "Código de mesoregião"
_columnn(48)     float      micro       %3g    "Código da microregião"
_columnn(51)     float      rme        %2g    "Código da região metropolitana"
_columnn(53)     float      sitdom     %1g    "Situação do domicílio "
_columnn(54)     float      espécie    %2g    "Espécie de domicílio"
_columnn(56)     float      tdom       %2g    "Tipo de Domicílio"
_columnn(74)     float      mate       %1g    "Material Externo"
}
```

Amostra de pessoas

dictionary using "Diretório da amostra de pessoas"

```
{
_column(1)      float      uf          %2g      "Unidade da Federação"
_column(3)      float      mun          %5g      "Código do município"
_column(8)      double     areap        %13g     "Área de Ponderação"
_column(21)     double     inddom       %8g      "Identificação do domicílio"
_column(29)     double     pesoa        %16.13f  "Peso amostral"
_column(46)     float      meso         %2g      "Código de mesorregião"
_column(48)     float      micro        %3g      "Código da microrregião"
_column(53)     float      sitdom       %1g      "Situação do domicílio"
_column(62)     float      idade        %3g      "Idade"
_column(148)    float      curso        %2g      "Curso que frequenta"
_column(200)    float      ocupação     %4g      "Ocupação"
_column(204)    float      atividade    %5g      "Atividade"
_column(150)    float      seriefund    %2g      "Série Ensino Fundamental"
_column(152)    float      seriemed     %2g      "Série Ensino Médio"
_column(168)    float      localestudo %1g      "Local de estudo"
_column(328)    float      localtrabalho %1g     "Local de Trabalho"
_column(350)    float      retornocasa %1g      "Retorno para casa pós trabalho"
_column(394)    float      posicaotrab %1g      "Posição no trabalho"
_column(395)    float      subgrutrab  %1g      "Categoria do trabalho principal"
}
```

APÊNDICE B

Script para caracterização da população e das construções

Amostra Domicílios – Miraf

```
infile using "Diretório das variáveis selecionadas (.dct) da amostra de domicílios"
compress
```

```
keep if mun == 42205
```

```
gen RES1 = 0
```

```
replace RES1 = 1 if (tdom == 11 | tdom == 12 | tdom == 13 | tdom == 14 | tdom == 51 | tdom
== 52 | tdom == 53 | tdom == 65)
```

```
gen RES6 = 0
```

```
replace RES6 = 1 if (tdom == 61)
```

```
gen RES4 = 0
```

```
replace RES4 = 1 if (tdom == 62 | tdom == 63)
```

```
gen RES5 = 0
```

```
replace RES5 = 1 if (tdom == 64)
```

```
gen WOOD = 0
```

```
replace WOOD = 1 if (mate == 3 | mate == 4 | mate == 5 | mate == 6 | mate == 7)
```

```
gen MASONRY = 0
```

```
replace MASONRY = 1 if (mate == 1 | mate == 2 | mate == 8 | mate == 9 | mate == .)
```

```
gen RES1pesoa = 0
```

```
replace RES1pesoa = RES1*pesoa
```

```
gen RES6pesoa = 0
```

```
replace RES6pesoa = RES6*pesoa
```

```
gen RES4pesoa = 0
```

```
replace RES4pesoa = RES4*pesoa
```

```
gen RES5pesoa = 0
```

```
replace RES5pesoa = RES5*pesoa
```

```
gen WOODpesoa = 0
```

```
replace WOODpesoa = WOOD*pesoa
```

```
gen MASONRYpesoa = 0
```

```
replace MASONRYpesoa = MASONRY*pesoa
```

```
label variable RES1 "Residencia Unifamiliar"
```

```
label variable RES4 "Hotéis, alojamento, etc.."
```

```
label variable RES5 "Penitenciarias, casas de recuperação, etc.."
```

```
label variable RES6 "Asilo"
```

```
label variable WOOD "Domicilio de Madeira"
```

```
label variable MASONRY "Domicilio de Alvenaria"
```

```
save "Diretório para salvar os dados (.dta)", replace
```

```
log using "Diretório para salvar a tabela de resultados (.smcl)",replace
```

```
total pesoa
```

```
total RES1pesoa
```

```
total RES4pesoa
```

```
total RES5pesoa
```

```
total RES6pesoa
```

```
total WOODpesoa
```

```
total MASONRYpesoa
```

log close

Amostra de domicílios - Mariana

infile using "Diretório das variáveis selecionadas (.dct) da amostra de domicílios"
compress

keep if mun == 40001

keep if areap == 3140001003002

gen RES1 = 0

replace RES1 = 1 if (tdom == 11 | tdom == 12 | tdom == 13 | tdom == 14 | tdom == 51 | tdom == 52 | tdom == 53 | tdom == 65)

gen RES6 = 0

replace RES6 = 1 if (tdom == 61)

gen RES4 = 0

replace RES4 = 1 if (tdom == 62 | tdom == 63)

gen RES5 = 0

replace RES5 = 1 if (tdom == 64)

gen WOOD = 0

replace WOOD = 1 if (mate == 3 | mate == 4 | mate == 5 | mate == 6 | mate == 7)

gen MASONRY = 0

replace MASONRY = 1 if (mate == 1 | mate == 2 | mate == 8 | mate == 9 | mate == .)

gen RES1pesoa = 0

replace RES1pesoa = RES1*pesoa

gen RES6pesoa = 0

replace RES6pesoa = RES6*pesoa

```
gen RES4pesoa = 0
replace RES4pesoa = RES4*pesoa

gen RES5pesoa = 0
replace RES5pesoa = RES5*pesoa

gen WOODpesoa = 0
replace WOODpesoa = WOOD*pesoa

gen MASONRYpesoa = 0
replace MASONRYpesoa = MASONRY*pesoa

label variable RES1 "Residencia Unifamiliar"
label variable RES4 "Hoteis, alojamento, etc.."
label variable RES5 "Penitenciarias, casas de recuperação, etc.."
label variable RES6 "Asilo"
label variable WOOD "Domicilio de Madeira"
label variable MASONRY "Domicilio de Alvenaria"

save "Diretório para salvar os dados (.dta)", replace

log using "Diretório para salvar a tabela de resultados (.smcl)",replace

total pesoa
total RES1pesoa
total RES4pesoa
total RES5pesoa
total RES6pesoa
total WOODpesoa
total MASONRYpesoa

log close
```

Amostra de pessoas - Mirai

```
infile using " Diretório das variáveis selecionadas (.dct) da amostra de pessoas"  
compress
```

```
keep if mun == 42205
```

```
gen aux1= 0
```

```
gen aux2= 0
```

```
gen POP2am = 0
```

```
gen POP2amu65 = 0
```

```
gen POP2amo65 = 0
```

```
gen POP2pm = 0
```

```
gen POP2pmu65 = 0
```

```
gen POP2pmo65 = 0
```

```
gen EDU = 0
```

```
gen EDUu65 = 0
```

```
gen EDUo65 = 0
```

```
gen POLI = 0
```

```
gen POLIu65 = 0
```

```
gen POLIo65 = 0
```

```
gen FORUM = 0
```

```
gen FORUMu65 = 0
```

```
gen FORUMo65 = 0
```

```
gen FABRICA = 0
```

```
gen FABRICAu65 = 0
```

```
gen FABRICAo65 = 0
```

```
gen PREF = 0
```

```
gen PREFu65 = 0
```

```
gen PREFo65 = 0
```

```
gen REL = 0
```

```
gen RELu65 = 0
```

```
gen RELo65 = 0
```

```
gen POP2ampeso = 0
```

gen POP2amu65peso = 0
 gen POP2amo65peso = 0
 gen POP2pmpeso = 0
 gen POP2pmu65peso = 0
 gen POP2pmo65peso = 0
 gen EDUpeso = 0
 gen EDUu65peso = 0
 gen EDUo65peso = 0
 gen POLIpeso = 0
 gen POLIu65peso = 0
 gen POLIo65peso = 0
 gen FORUMpeso = 0
 gen FORUMu65peso = 0
 gen FORUMo65peso = 0
 gen FABRICApeso = 0
 gen FABRICAu65peso = 0
 gen FABRICAo65peso = 0
 gen PREFpeso = 0
 gen PREFu65peso = 0
 gen PREFo65peso = 0
 gen RELpeso = 0
 gen RELu65peso = 0
 gen RELo65peso = 0

replace aux1 = 1 if (((seriefund >= 6 & seriefund <= 10) | seriemed != .))

replace aux2 = 1 if (aux1 == 1 & posicaotrab ==.)

replace POP2pm = 1 if (((subgrutrab == 1 | subgrutrab == 2) & (localtrabalho == 1 |
 localtrabalho == 2)) | localtrabalho == 1 | aux2 == 1 |(posicaotrab == . & (seriefund != 1 &
 seriefund != 2 & seriefund != 3 & seriefund != 4 & seriefund != 5 & seriefund != 10 & curso
 != 1 & curso != 2)))

replace POP2pm = 0 if (curso == 1 | curso == 2 | curso == 3)

replace POP2pmu65 = 1 if (POP2pm == 1 & idade <65)

replace POP2pmo65 = 1 if (POP2pm == 1 & idade >= 65)

replace POP2am = 1 if ((retornocasa != 2))

replace POP2amu65 = 1 if (POP2am == 1 & idade < 65)

replace POP2amo65 = 1 if (POP2am == 1 & idade >= 65)

replace EDU = 1 if (((seriefund >= 1 & seriefund <= 5) | (curso == 1 | curso == 2 | curso == 3)) & localestudo == 1) | (((ocupacao == 2341 | ocupacao == 2342) & localtrabalho == 2)))

replace EDUu65 = 1 if (EDU == 1 & idade < 65)

replace EDUo65 = 1 if (EDU == 1 & idade >= 65)

replace POLI = 1 if ((ocupacao == 2211 | ocupacao == 2212 | ocupacao == 2221 | ocupacao == 2261 | ocupacao == 2262 | ocupacao == 2263 | ocupacao == 2264 | ocupacao == 2265 | ocupacao == 2266 | ocupacao == 2267 | ocupacao == 2269) & localtrabalho == 2)

replace POLIu65 = 1 if (POLI == 1 & idade < 65)

replace POLIo65 = 1 if (POLI == 1 & idade >= 65)

replace FORUM = 1 if ((ocupacao == 2611 | ocupacao == 2612 | ocupacao == 2614) & localtrabalho == 2)

replace FORUMu65 = 1 if (FORUM == 1 & idade < 65)

replace FORUMo65 = 1 if (FORUM == 1 & idade >= 65)

replace FABRICA = 1 if ((ocupacao == 8151 | ocupacao == 8152 | ocupacao == 8153 | ocupacao == 8154 | ocupacao == 8157 | ocupacao == 8159) & localtrabalho == 2)

replace FABRICAu65 = 1 if (FABRICA == 1 & idade < 65)

replace FABRICAo65 = 1 if (FABRICA == 1 & idade >= 65)

replace PREF = 1 if ((ocupacao == 1112 | ocupacao == 3343) & localtrabalho == 2)

replace PREFu65 = 1 if (PREF == 1 & idade < 65)

replace PREFo65 = 1 if (PREF == 1 & idade >= 65)

replace REL = 1 if (atividade == 91091 & localtrabalho == 2)

replace RELu65 = 1 if (REL == 1 & idade < 65)

replace RELo65 = 1 if (REL == 1 & idade >= 65)

replace POP2pmpeso = POP2pm*pesoa

replace POP2pmu65peso = POP2pmu65*pesoa

replace POP2pmo65peso = POP2pmo65*pesoa

replace POP2ampeso = POP2am*pesoa

replace POP2amu65peso = POP2amu65*pesoa

replace POP2amo65peso = POP2amo65*pesoa

replace EDUpeso = EDU*pesoa

replace EDUu65peso = EDUu65*pesoa

replace EDUo65peso = EDUo65*pesoa

replace POLIpeso = POLI*pesoa

replace POLIu65peso = POLIu65*pesoa

replace POLIo65peso = POLIo65*pesoa

replace FORUMpeso = FORUM*pesoa

replace FORUMu65peso = FORUMu65*pesoa

replace FORUMo65peso = FORUMo65*pesoa

replace FABRICApeso = FABRICA*pesoa

replace FABRICAu65peso = FABRICAu65*pesoa

replace FABRICAo65peso = FABRICAo65*pesoa

replace PREFpeso = PREF*pesoa

replace PREFu65peso = PREFu65*pesoa

replace PREFo65peso = PREFo65*pesoa

replace RELpeso = REL*pesoa

replace RELu65peso = RELu65*pesoa

replace RELo65peso = RELo65*pesoa

```
label variable POP2am "Em casa 2am"  
label variable POP2amu65 "Em casa 2am menos 65 anos"  
label variable POP2amo65 "Em casa 2am mais 65 anos"  
label variable POP2pm "Em casa 2pm"  
label variable POP2pmu65 "Em casa 2pm menos 65 anos"  
label variable POP2pmo65 "Em casa 2pm mais 65 anos"  
label variable EDU "População na escola 2pm"  
label variable POLI "População na policlinica 2pm"  
label variable FORUM "População no forum 2pm"  
label variable FABRICA "População na fabrica 2pm"  
label variable REL "População na igreja 2pm"  
label variable PREF "População na prefeitura 2pm"  
  
save "Diretório para salvar os dados (.dta)", replace  
  
log using "Diretório para salvar a tabela de resultados (.smcl)",replace  
  
total pesoa  
total POP2ampeso  
total POP2amu65peso  
total POP2amo65peso  
total POP2pmpeso  
total POP2pmu65peso  
total POP2pmo65peso  
total EDUpeso  
total EDUu65peso  
total EDUo65peso  
total POLIpeso  
total POLIu65peso  
total POLIo65peso  
total FORUMpeso  
total FORUMu65peso
```

total FORUMo65peso
total FABRICApeso
total FABRICAu65peso
total FABRICAo65peso
total RELpeso
total RELu65peso
total RELo65peso
total PREFpeso
total PREFu65peso
total PREFo65peso

log close

Amostra de pessoas - Mariana

infile using " Diretório das variáveis selecionadas (.dct) da amostra de pessoas"
compress

keep if mun == 40001
keep if areap == 3140001003002

gen aux1= 0
gen aux2= 0
gen POP2am = 0
gen POP2amu65 = 0
gen POP2amo65 = 0
gen POP2pm = 0
gen POP2pmu65 = 0
gen POP2pmo65 = 0
gen EDU = 0
gen EDUu65 = 0
gen EDUo65 = 0
gen REL = 0
gen RELu65 = 0

```

gen RELo65 = 0
gen POP2ampeso = 0
gen POP2amu65peso = 0
gen POP2amo65peso = 0
gen POP2pmpeso = 0
gen POP2pmu65peso = 0
gen POP2pmo65peso = 0
gen EDUpeso = 0
gen EDUu65peso = 0
gen EDUo65peso = 0
gen RELpeso = 0
gen RELu65peso = 0
gen RELo65peso = 0

replace aux1 = 1 if (((seriefund >= 6 & seriefund <= 10) | seriemed != .))
replace aux2 = 1 if (aux1 == 1 & posicaootrab == .)

replace POP2pm = 1 if (((subgrutrab == 1 | subgrutrab == 2) & (localtrabalho == 1 |
localtrabalho == 2)) | localtrabalho == 1 | aux2 == 1 |(posicaootrab == . & (seriefund != 1 &
seriefund != 2 & seriefund != 3 & seriefund != 4 & seriefund != 5 & seriefund != 10 & curso
!= 1 & curso != 2)))
replace POP2pm = 0 if (curso == 1 | curso == 2 | curso == 3)
replace POP2pmu65 = 1 if (POP2pm == 1 & idade < 65)
replace POP2pmo65 = 1 if (POP2pm == 1 & idade >= 65)

replace POP2am = 1 if ((retornocasa != 2))
replace POP2amu65 = 1 if (POP2am == 1 & idade < 65)
replace POP2amo65 = 1 if (POP2am == 1 & idade >= 65)

replace EDU = 1 if (((((seriefund >= 1 & seriefund <= 5)|(curso == 1 | curso == 2 | curso ==
3))& localestudo == 1)|(((ocupacao == 2341 | ocupacao == 2342) & localtrabalho == 2)))
replace EDUu65 = 1 if (EDU == 1 & idade < 65)
replace EDUo65 = 1 if (EDU == 1 & idade >= 65)

```

replace REL = 1 if (atividade == 91091 & localtrabalho == 2)

replace RELu65 = 1 if (REL == 1 & idade < 65)

replace RELo65 = 1 if (REL == 1 & idade >= 65)

replace POP2pmpeso = POP2pm*pesoa

replace POP2pmu65peso = POP2pmu65*pesoa

replace POP2pmo65peso = POP2pmo65*pesoa

replace POP2ampeso = POP2am*pesoa

replace POP2amu65peso = POP2amu65*pesoa

replace POP2amo65peso = POP2amo65*pesoa

replace EDUpeso = EDU*pesoa

replace EDUu65peso = EDUu65*pesoa

replace EDUo65peso = EDUo65*pesoa

replace RELpeso = REL*pesoa

replace RELu65peso = RELu65*pesoa

replace RELo65peso = RELo65*pesoa

label variable POP2am "Em casa 2am"

label variable POP2amu65 "Em casa 2am menos 65 anos"

label variable POP2amo65 "Em casa 2am mais 65 anos"

label variable POP2pm "Em casa 2pm"

label variable POP2pmu65 "Em casa 2pm menos 65 anos"

label variable POP2pmo65 "Em casa 2pm mais 65 anos"

label variable EDU "População na escola 2pm"

label variable REL "População na igreja 2pm"

save "Diretório para salvar os dados (.dta)", replace

```
log using "Diretório para salvar a tabela de resultados (.smcl)",replace
```

```
total pessoa
```

```
total POP2ampeso
```

```
total POP2amu65peso
```

```
total POP2amo65peso
```

```
total POP2pmpeso
```

```
total POP2pmu65peso
```

```
total POP2pmo65peso
```

```
total EDUpeso
```

```
total EDUu65peso
```

```
total EDUo65peso
```

```
total RELpeso
```

```
total RELu65peso
```

```
total RELo65peso
```

```
log close
```

ANEXO A

Guia de Entrevista – Sorensen e Mileti (2015b)

INTERVIEW SCHEDULE Community Warning Issuance, Diffusion, and Protective Action Initiation Estimation

(DO NOT READ CAPITALIZED WORDS TO INTERVIEWEES)

RESPONDENT: EMERGENCY MANAGER PUBLIC INFO. OFFICER

Name: _____

Title: _____

Organization: _____

Telephone: _____

Email: _____

The purpose of this interview is to collect information about the issuance, diffusion, and content of public alerts, warnings, and press releases for dam breaches, controlled dam releases, and levee breaches or overtopping flooding in your community. The first questions ask about which of these threats exist in your community and about plan types you may have.

Q 1. Which of the following flood threats could affect your community?

- Dam breaches? YES/NO
- Controlled dam releases? YES/NO
- Levee breach or overtopping? YES/NO
- Flash flooding? YES/NO
- Riverine flooding? YES/NO
- Other flood types? YES/NO

(IF YES) What other flood types? _____

Q 2. Are the boundaries identified for the areas of your community that would be flooded for the full range of potential flood scenarios? YES/NO/LIMITED (Not full range)

(IF YES) Please describe those scenarios. _____

Q 3. Do you have a general emergency plan? YES/NO

Q 4. Do you have a general warning plan or warning plan annex to a general plan? YES/NO

Q 5. Do you have standard operating procedures for warnings? YES/NO

Q 6. Do you have a hazard-specific warning plan for the flood scenario in question (i.e. dam breaches, levee breaches, riverine flooding, etc.)?

Q 7. Do you have hazard-specific standard operating procedures for the flood scenario in question?

The next questions are about the first public alert or warning that would be issued in the event of a dam breach, controlled dam release, or levee breach or overtopping.

Q 8. Is a particular person or position responsible for getting a first alert or warning out to the public? YES/NO

(IF YES) What is their name and title? _____

Do they have legal authority to do so? YES/NO

(IF NO) What is the name and title of who does? _____

Is the responsible person or position written down? YES/NO

(IF YES) Where? _____

Q 9. Would responsibilities pass from one person to another if someone were not available to perform their first alert or warning roles, for example, if it were nighttime and the responsible person were off duty? YES/NO

(IF YES) How would it be done? _____

How would the people involved know how to do it? _____

Is how to do it written down? YES/NO

(IF YES) Where? _____

Q 10. Do you have a staffed contact point that operates 24 hours per day 7 days a week to receive threat information from those who might detect it? YES/NO

Q 11. Do your plans, procedures, or other written documents classify threat levels into different categories (for example, flood watch and flood warning), and link them to different public actions for each level? Here's an example (SHOW MATRIX CARD) of what I mean. YES/NO

Q 12. What would trigger getting a first alert or warning out to the public? _____

How would you know when the trigger is reached? _____

Is anything about the trigger written down? YES/NO

(IF YES) Where? _____

Q 13. Would you seek to confirm the flood threat before distributing a first public alert or warning? YES/NO

(IF YES) Are there written procedures about threat confirmation? YES/NO

Q 14. Would you communicate with the agency responsible for the dam or levee before distributing a first public alert or warning, for example, so you could ask questions and get answers? YES/NO

(IF YES) How would it be done? _____

How would you know how to do that? _____

Is how to do it written down? YES/NO

(IF YES) Where? _____

Q 15. Are the name(s) and number(s) of the people to talk with in the agency responsible for the dam or levee written down and readily available? YES/NO

(IF YES) Where? _____

Q 16. Do you have redundant technologies available for communicating with people in the agency responsible for the dam or levee? YES/NO

(IF YES) What are they? _____

Would any work if the electricity were out? YES/NO

Would any work if the community were damaged? YES/NO

Q 17. Do the people who would issue a first alert or warning routinely communicate with the people responsible for the dam or levee? YES/NO

(IF YES) How often? _____

Q 18. Are the people who would issue a first alert or warning allowed and encouraged to get that job done in innovative ways if circumstances keep them from doing it according to procedures? YES/NO

(IF YES) Is their ability to do this part of your written procedures? YES/NO

Q 19. Do you have unique ways to provide first alerts or warnings in events in which impact could occur in an hour or less, for example, send a first alert or warning out without getting clearance from anyone? YES/NO

(IF YES) How would it be done? _____

Is how to do it written down? YES/NO

Q 20. How many people would likely be involved in deciding and/or approving issuing a first alert or warning? _____

Q 21. Do the people who have a role in getting a first alert or warning to the public practice doing that job, for example, in drills or exercises? YES/NO

(IF YES) How often? _____

The next questions are about how you might disseminate alert and warning messages to the public. Some of these questions are about first alerts and warnings while others are about subsequent warnings. Please recall that all of these questions are about public warning for dam breaches, controlled dam releases, and/or leveed area flooding.

Q 22. Which of the following ways to disseminate alerts and warnings would you use to get the first alert or warning to the public, note that some of the dissemination channels I'm about to read to you may not apply? (CIRCLE ALL THAT APPLY) (IF THEY NAME A MULTIPLE CHANNEL DISTRIBUTION SYSTEM, ASK ABOUT WHAT DISTRIBUTION CHANNELS THAT SYSTEM USES AND RECORD THEM)

- Route alerting (door to door or from vehicles)
- Fixed location loudspeakers & public address systems
- Wireless emergency alerts that use the WEA opt out system
- Wireless emergency alerts that use an SMS opt in system
- Radio
- Television
- NOAA Weather Radio
- Tone alert radios dedicated to dam or levee emergencies
- Audio sirens and alarms (not including voice sirens)
- Broadcast voice sirens
- Message signs

- Aircraft
- Visual alerting
- Email to the public
- Text messages to the public
- Social media, e.g., Twitter and Facebook
- Website(s)
- Reverse auto-dial telephone distribution system
- TDD/TTY (only dedicated systems, do not credit users side technology)
- Other _____
- ADD FOR TOTAL INCLUDING EACH “OTHER” ITEM MENTIONED EXCLUDING TDD/TYY= _____

Q 23. What percentage of the population that could be at risk to flooding would you estimate could be reached by the following ways to distribute alerts and warnings? (ONLY ASK ABOUT ITEMS SELECTED IN QUESTIONS 22 AND 23)

- How many patrol cars and officers would be dedicated to route alerting?
- What percentage of the public has a NOAA Weather Radio or dedicated tone-alert radios?
- Would a significant portion (> 30% or most of those closest to the hazard) of the at risk population be alerted by audio or broadcast sirens or fixed location loudspeakers?
- How many aircraft would be dedicated to spreading warnings?
- What percentage of the public is engaged with your social media activities?
- What percentage of the public has signed up their cell phone number in the reverse autodial system?
- How many calls/hours can the reverse autodial system make?

Q 24. If an update to a warning message were not needed, would the original message be repeated more than once? YES/NO

(IF YES) How frequently would it be repeated? _____

Q 25. Do you have ways to monitor what other organizations or people in the public might be saying about the threat, for example, over social media? YES/NO

(IF YES) How would monitoring be done? _____

(IF YES) Would you attempt to correct wrong information?

Q 26. Could there be a significant number of people engaged in any of the following activities, in any of the following locations, or in any of the following groups when alerts or warnings are issued, and do you have special ways to provide them with a first alert or warning?

	<u>SIGNIFICANT NUMBER</u>	<u>WAY TO WARN</u>
Boating	YES/NO	YES/NO
Camping	YES/NO	YES/NO
Hiking	YES/NO	YES/NO
Recreational activities near water	YES/NO	YES/NO

Hospitals	YES/NO	YES/NO
Group homes	YES/NO	YES/NO
Prisons/jails	YES/NO	YES/NO
Shopping centers	YES/NO	YES/NO
Schools	YES/NO	YES/NO
Agricultural	YES/NO	YES/NO
Out-of-town visitors	YES/NO	YES/NO
Homeless YES/NO	YES/NO	YES/NO
Unique subcultures, e.g., the Amish	YES/NO	YES/NO
Other areas where people congregate	YES/NO	YES/NO

Q 27. Do you have a special way to deliver a first alert or warning message to people very close to the dam and/or levee? YES/NO

(IF YES) How would it be done? _____

Q 28. Do you have a way to wake people up who are sleeping to provide them with a first alert or warning? YES/NO

(IF YES) How would it be done? _____

Q 29. Do you have a way to deliver alerts and warnings to people who are hearing impaired? YES/NO

(IF YES) How? _____

What has been done to assist the hearing impaired in obtaining the specialized equipment or technology they need to be able to receive alerts and warnings? _____

Q 30. Do you have a way to deliver alerts and warnings to people who are visually impaired? YES/NO

(IF YES) How? _____

What has been done to assist the visually impaired in obtaining the specialized equipment or technology they need to be able to receive alerts and warnings?

Q 31. Do you provide alerts and warnings in more than one language? YES/NO

(IF YES) Which ones? _____

(IF YES OR NO) Are you missing languages that a significant portion of the non-English speaking population use? YES/NO

(IF YES) Which ones? _____

Q 32. Do you have the plans and technology in place to alert and warn people if infrastructure were disrupted, for example, from a lack of electricity, damage to streets that might be used for route alerting, or damage to an outdoor siren system? YES/NO

(IF YES) What are they? _____

The next questions are about the alerts, warnings and press releases that you may distribute across the entire pre-impact public warning period. When the terms alert or warning are used in the questions that follow, we mean formal messages issued by, for example, the Incident

Commander in the Emergency Operations Center. When the term press release is used, we mean information provided to the media by a Public Information Officer, for example, at the Joint Information Center during a press briefing.

Q 33. Do you have example alerts, warnings and/or emergency press releases or templates to use as guides during an event? YES/NO

(IF YES) May I have copies of them? _____

Q 34. Have you recently issued any alerts, warnings and/or emergency press releases to the public? YES/NO

(IF YES) May I have copies of them? _____

Q 35. Would you name a source in the public alerts, warnings, and press releases that you issue? YES/NO

(IF YES) Who would be named? _____

Q 36. Would you recommend in alerts, warnings and press releases that the public take specific protective actions, for example, evacuate, move vertically, or check local media? YES/NO

Q 37. Would the alerts, warnings and emergency press releases you issue tell the public about any of the following?

A. The consequences of the flood and why taking the recommended protective action(s) would reduce them? YES/NO

(IF YES) What would they say? _____

B. The time people should begin and complete taking the recommended protective action? YES/NO

(IF YES) What would they say? _____

C. The boundaries of the areas that would be flooded? YES/NO

(IF YES) What would they say? _____

D. Why people who are safe who are close to an area being evacuated have no reason to evacuate? YES/NO

(IF YES) What would they say? _____

E. What parents should do about their children who might still be in school? YES/NO

(IF YES) What would they say? _____

F. What to do with pets and animals when taking a protective action? YES/NO

(IF YES) What would they say? _____

G. The weather outside if a flood was happening on a sunny day? YES/NO

(IF YES) What would they say? _____

Q 38. Would the alerts, warnings and emergency press releases you issue have either of the following characteristics?

A. Would they be specific, for example, if people are asked to evacuate by describing the details of evacuation such as the routes they should take, what boundaries they should cross to reach safety, and the time by when they should get there? YES/NO

B. Would they be clear, for example, by not using words like probable maximum flood, uncontrolled release, and breach, and instead use words that everyone can understand? YES/NO

Q 39. Would the alerts, warnings and emergency press releases you issue say anything different for people who might be close to where the flooding would begin and have less time to respond versus people who are far away who have more time? YES/NO

(IF YES) How would they be different?

Q 40. Would the alerts, warnings and emergency press releases you issue be worded differently if impact were imminent, for example, within minutes to an hour than if people had more time to respond? YES/NO

(IF YES) How would they be different?

Q 41. Would you work with other flood threatened political jurisdictions, for example, other counties or cities, to coordinate the content of public alerts, warnings and/or emergency press releases? YES/NO

(IF YES) How would you do that? _____

Q 42. Do the people who write and issue public alerts, warnings and press releases practice their skills in drills, exercises or in other ways?

The next few questions ask about public education, the level of public knowledge and preparedness, and about recent warning events that might have happened in your community.

Q 43. Do you have a program in place to provide public education to motivate household preparedness among people in your community who live in areas that could flood? YES/NO

(IF YES) Please describe that public education program and any material that might be part of it? _____

Q 44. Would you say the people in your community who live in areas that could flood are adequately prepared? YES/NO

Q 45. Has your community experienced a flood in the last 20 years? YES/NO

(IF YES, ASK THE FOLLOWING QUESTIONS FOR EACH EVENT)

A. In what year did it happen? _____

B. How severe was it? _____

C. Were members of the public asked to evacuate? YES/NO

(IF YES TO C, ASK THE FOLLOWING QUESTIONS)

D. What percentage of the total population that could be at risk to flooding in your community were asked to evacuate? _____

E. What percentage of the population asked to evacuate complied with the evacuation order? _____ %

F. How many hours did it take to accomplish the evacuation? _____ G. Did you encounter any problems in managing the emergency? YES/NO

(IF YES TO G, ASK THE FOLLOWING QUESTIONS)

H. What were those problems? _____

I. What have you done to correct for those problems since then? _____

J. Have you made other emergency management changes since then that would influence your response to a future emergency? YES/NO

(IF YES) What were they? _____

Q 46. Have warnings been issued in your community recently about an impending emergency of any types that asked people to take some sort of protective action? YES/NO

(IF YES) How many times? _____

When? _____

Q. 47. If a flood event were to occur in your community, what percentage of the people advised to take the following actions would you expect to actually do so?

A. Evacuate vertically (either in home or nearby structure/high ground _____ %

B. Evacuate out of the flood inundation area? _____ %

The last questions ask about the personal characteristics of the people who live in areas of the community that could be flooded. Most can be found from Census.gov or similar website.

Q 48. What percentage of the at risk population did not graduate from high school?

Q 49. What percentage of the at risk population is unemployed?

Q 50. What % of the at risk population have a median annual before tax household income below the poverty level, which is \$23,850 per year for a family of four in 2015?

Use and internet search on “US Census how the census measures poverty” to find updated information on poverty level based on household income in order to update the contents of question #55.

Q 51. What percentage of the at risk population are homeless? _____ %

Q 52. Are there significant numbers of people in the at risk population who live in a neighborhood that is cut off from everyone else in your community for reasons that might include extreme poverty, race, religion, lifestyle, or other factors? YES/NO

DAM BREACH MATRIX FOR QUESTION 11

DAM THREAT LEVEL	FLOOD THREAT	PUBLIC ACTIONS
<u>LEVEL IV</u> Dam breaching/breached	Imminent or in progress	Evacuate Move vertically Avoid area
<u>LEVEL III</u> Dam breach very likely	Very likely	Evacuate Avoid area
<u>LEVEL II</u> Conditions at dam may or may not lead to breach	Possible but not certain	Prepare to evacuate Seek/monitor information
<u>LEVEL I</u>	Potential being determined	Seek/monitor information

Safety issues being investigated

LEVEE BREACH OR OVERTOPPING MATRIX FOR QUESTION 11

DAM THREAT LEVEL	FLOOD THREAT	PUBLIC ACTIONS
<u>LEVEL IV</u> Levee(s) breached or overtopped	Imminent or in progress	Evacuate Move vertically Avoid area
<u>LEVEL III</u> Levee(s) starting to breach Levee(s) starting to overtop	Very likely	Evacuate Avoid area
<u>LEVEL II</u> Conditions at levee(s) may or may not lead to flooding	Possible but not certain	Prepare to evacuate Seek/monitor information
<u>LEVEL I</u> Safety issues being investigated	Potential being determined	Seek/monitor information

ANEXO B

Influência dos pesos dos fatores que moldam as curvas de atraso no alerta, difusão e mobilização – Adaptado Sorensen e Mileti (2015a)

Factors that influence warning issuance time

Factor	Question	Weight (0-1)*
<i>Formalization of Planning and Implementation Procedures</i>		
Standard Warning Plan Is Written Down	4, 6	0,20 - 0,25
Standard Operating Procedures (SOP) Are Written Down	5, 7	0,25 - 0,30
Warning Thresholds Are in Place (Matrix)	11	0,15 - 0,20
Succession Planning Is Detailed Within SOPs	9	0,01 - 0,05
Responsibilities Are Identified	8	0,10 - 0,15
Authority to Issue Warnings is Clearly Defined	8	0,10 - 0,15
Interagency Communication Follows Rules and Procedures	14	0,11 - 0,17
Two-Way Communication Among Organizations Exists	15	0,01 - 0,05
Threat Verification Procedures Are Defined	13	0,01 - 0,03
<i>Performance and Interpersonal Relations</i>		
SOP Practice Is Conducted (Drills or Exercises)	21	0,13 – 0,18
Communicating Personnel Across Organizations Know Each Other/Frequency of Interaction	17	0,02 – 0,04
Ability to Improvise	18	0,02 – 0,04
<i>System Performance Factors</i>		
Redundant/Failsafe Communications are in Place	16	0,06 – 0,07
<i>Situational Factors</i>		
Day or Night	NM**	0,06 – 0,07
Power Availability (Electricity)	16	0,10 – 0,13
Damage to Infrastructure	16	0,01 – 0,03
Environmental Cues	NM	0,01 – 0,03
Time to Impact	19	0,05 – 0,09
Number of People Involved	20	0,12 – 0,16
Experience of Community	48	0,02 – 0,04

* 0.00 – 1.00 is theoretical range. In actuality, influence weights of .30 would be quite strong.

** NM is not measured in interview schedule

Factors that influence first alert/warning diffusion time

Factor	Question	Weight (0-1)
<i>Sending the First Alert/Warning</i>		
Channels - Types of Technologies	25	0,17 - 0,20
Channels - Disruption to Infrastructure	35	0,00 - 0,05
Channels - Number and Mix of Channels	22	0,25 - 0,30
Frequency of Distribution	25	0,21 - 0,26
Informal Notification	NM	0,10 - 0,13
Environmental and Social Cues	NM	0,01 - 0,05
<i>Receiving the First Alert/Warning</i>		
Activity -Task	26	0,10 – 0,16
Activity - Location and Proximity to The Hazard	27	0,12 – 0,18
Activity - Time of Day*	28	(0,05 – 0,25)**
Impediments - Sensory (Hearing, Visual)	29, 30	0,08 - 0,13
Impediments - Cognitive	NM	0,01– 0,02
Impediments - Linguistic and Cultural	31	0,03 – 0,06
Resources - Access to Technology	23	0,05 – 0,12
Social Media Participation	23	0,01 – 0,02
Socio-Economic Status	48, 49, 50	0,07 – 0,12

* measured by separate curves

** weights should not be used in assigning curves

Factors that influence protective action initiation time.

Factor	Question	Weight (0-1)
<i>Message Characteristics</i>		
Appropriate Content	35, 36 ,37	0,25 - 0,30
Style	38, 41	0,17 - 0,22
Message Length Adequacy	35, 36, 37	0,12 - 0,16
Delivery (Frequency)	24	0,12 - 0,15
Personal Channel	22	0,13 - 0,18
Protective Action Type *	NM	0,05 – 0,10**
<i>Receiver Characteristics</i>		
Status Attributes	48, 49, 50	0,01 - 0,10
Role Characteristics	37	0,10 - 0,17
Personal Preparedness/Planning	43, 44	0,01 – 0,02
Pre-Event Knowledge	43, 44	0,01 – 0,02
Experience	45	0,01 – 0,14
Membership in A Socially Isolated Group	52	0,01 – 0,11
<i>Context Characteristics</i>		
Environmental Cues	37	0,05 – 0,28
Social Cues	NM	0,05 – 0,13
Location/Activity	26	0,05 – 0,15
Day Versus Night	29	0,01 – 0,05
Time to Impact	40	0,10 – 0,17
Impact Intensity	NM	0,10 – 0,17

* measured by separate curves and separate curves for vertical evacuation

** weights should not be used in assigning curves