



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANDERSON MATHEUS DE SOUSA LIMA

**AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA E MODELAGEM COMPUTACIONAL EM
BARRAGENS DE PERNAMBUCO**

Recife

2023

ANDERSON MATHEUS DE SOUSA LIMA

**AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA E MODELAGEM COMPUTACIONAL EM
BARRAGENS DE PERNAMBUCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho.

Coorientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo.

Recife

2023

Catálogo na fonte:
Bibliotecária Sandra Maria Neri Santiago, CRB-4 / 1267

L732a Lima, Anderson Matheus de Sousa.
Avaliação de segurança e modelagem computacional em barragens de Pernambuco / Anderson Matheus de Sousa Lima. – 2023.
128 f.: il., fig., quad., tab., abrev. siglas.

Orientador: Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho.
Coorientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2023.
Inclui referências.

1. Engenharia civil. 2. Modelo digital do terreno. 3. Mancha de inundação. 4. Rompimento de barragem. I. Coutinho, Artur Paiva (Orientador). II. Cirilo, José Almir (Coorientador). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2023-41

ANDERSON MATHEUS DE SOUSA LIMA

**AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA E MODELAGEM COMPUTACIONAL EM
BARRAGENS DE PERNAMBUCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em: 01/02/2023.

BANCA EXAMINADORA

Participação por videoconferência
Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Participação por videoconferência
Profa. Dra. Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Pernambuco

Participação por videoconferência
Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico esse trabalho, com muito amor e apreço, a minha mãe e ao meu pai (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre dar forças para que eu possa seguir em frente e vencer cada etapa da minha vida. Sou grato por ter segurado a minha mão durante todo esse trajeto do mestrado.

À minha amada mãe, Maria Claudia, por ser uma pessoa maravilhosa e que sempre me apoia em tudo. Gratidão por sempre ter cuidado de mim.

Ao meu orientador, Artur Paiva Coutinho, por ter estado comigo ao longo do mestrado e no processo de realização da dissertação.

Ao meu colega de mestrado, Erickson Galindo, por ter dado grande ajuda em um dos objetivos dessa pesquisa.

À toda a minha família, por ser meu porto seguro e ter estado sempre disponível para me ajudar.

Aos meus amigos, por serem uma segunda família para mim.

Muito obrigado!

RESUMO

Barragens são infraestruturas que, de maneira geral, atendem aos usos múltiplos dos recursos hídricos; sua implementação cobra planejamento apropriado, cumprimento das exigências legais e um plano de limites de segurança especialmente elaborado. Esta pesquisa apresenta uma análise de segurança de barragens através da verificação do efeito de diferentes resoluções de modelos digitais do terreno (SRTM, PE3D 5m e PE3D 30m) nas manchas de inundação do rompimento hipotético das barragens Serra dos Cavalos e Guilherme Azevedo, ambas localizadas em Pernambuco, e da aplicação do Índice de Segurança de Barragens – ISB para quantificar o risco de rompimento de outros 36 (trinta e seis) barramentos que estão sob jurisdição do Departamento Nacional de Obras Contra a Seca – DNOCS. Foram determinados os hidrogramas de ruptura das barragens Serra dos Cavalos e Guilherme Azevedo, observando a propagação da onda de cheia ocorrida depois das rupturas desses barramentos, mapeando os locais potencialmente inundáveis e comparando as manchas de inundação produzidas através dos modelos digitais do terreno. A modelagem foi realizada por meio da aplicação do *software* HEC-RAS. O ISB foi aplicado a partir de documentos do convênio técnico firmado entre o DNOCS e a Universidade Federal de Pernambuco. Como a estrutura da barragem Serra dos Cavalos é de terra, a ruptura da brecha demorou a acontecer, em relação a Barragem Guilherme Azevedo, em que a ruptura da brecha ocorre de forma mais rápida, pois a estrutura final é de pedra em arco (ruptura em cascata). Verificou-se a dimensão do impacto à vida da mancha de inundação, sendo a mais refinada proveniente do modelo digital do terreno PE3D 5m, o que indica o menor número de residências atingidas, possivelmente por ser mais preciso em sua resolução. Com a aplicação do ISB, verificou-se que mais da metade das barragens avaliadas exibiram “condição insatisfatória” em relação a segurança, enquanto o restante apresentou “condição deficiente”, sendo motivo de alerta. No caso de estudo de ruptura de barragens para elaboração do PAE, sugere-se uma resolução espacial de 5m para MDT’s adquiridos por meio de aerolevantamentos com laser LiDAR.

Palavras-chave: modelo digital do terreno; mancha de inundação; rompimento de barragem.

ABSTRACT

Dams are infrastructures that, in general, meet the multiple uses of water resources; its implementation requires proper planning, compliance with legal requirements and a specially designed plan of safety limits. This research presents a safety analysis of dams through the verification of the effect of different resolutions of digital terrain models (SRTM, PE3D 5m and PE3D 30m) in the flood spots of the hypothetical rupture of the Serra dos Cavalos and Guilherme Azevedo dams, both located in Pernambuco, and the application of the Dam Safety Index - ISB to quantify the risk of failure of another 36 (thirty-six) dams that are under the jurisdiction of the National Department of Works Against Drought – DNOCS. The rupture hydrographs of the Serra dos Cavalos and Guilherme Azevedo dams were determined, observing the propagation of the flood wave that occurred after the ruptures of these dams, mapping the potentially flooding places and comparing the flood spots produced through digital terrain models. Modeling was performed using the HEC-RAS software. The ISB was applied based on documents from the technical agreement signed between DNOCS and the Federal University of Pernambuco. As the structure of the Serra dos Cavalos dam is made of earth, the rupture of the breach took a long time to happen, in relation to the Guilherme Azevedo Dam, in which the rupture of the breach occurs more quickly, since the final structure is made of arched stone (rupture in cascade). The dimension of the impact on the life of the flooded area was verified, the most refined one coming from the digital land model PE3D 5m, which indicates the lowest number of homes affected, possibly because it is more accurate in its resolution. With the application of the ISB, it was verified that more than half of the evaluated dams exhibited “unsatisfactory condition” in relation to safety, while the rest presented “deficient condition”, being a reason for alert. In the case of a dam failure study for the elaboration of the PAE, a spatial resolution of 5m is suggested for MDT's acquired through aerial surveys with LiDAR laser.

Keywords: digital terrain model; flood stain; dam break.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Vistas da área de ruptura: (a) e (b) a jusante; a montante da barragem	27
Figura 2 –	Áreas afetadas da cidade de Alagoa Grande: (a) rua do rio; (b) e (c) vistas aéreas	28
Figura 3 –	Região antes do rompimento da barragem	29
Figura 4 –	Região depois do rompimento da barragem	29
Figura 5 –	Plumas de Sedimentos na Foz do Rio Doce – Consolidação dos Mapas Gerados de 03/12/2015 a 03/02/2017	30
Figura 6 –	Receitas em Mariana (em R\$ Milhões), 2018	31
Figura 7 –	Efeitos do rompimento de Mariana nas condições de vida e saúde da população	32
Figura 8 –	Região antes do rompimento da barragem de Brumadinho	34
Figura 9 –	Região depois do rompimento da barragem de Brumadinho	34
Figura 10 –	Mapa de rompimento de barragem	35
Figura 11 –	Receitas em Brumadinho (em R\$ Milhões), 2018	36
Figura 12 –	Matriz de danos socioambientais após o rompimento da barragem da Vale em Brumadinho	37
Figura 13 –	Seção transversal de um rio	51
Figura 14 –	Divisão do Estado de Pernambuco em 5 blocos de mapeamento	56
Figura 15 –	Deslizamentos e erosões na área do reservatório (esquerda); Flutuação de entulhos e/ou resíduos no reservatório (direita)	60
Figura 16 –	Atividade de castores na área do reservatório (esquerda); Erosão por sulcos ao longo da crista (direita)	60
Figura 17 –	Fissuras longitudinais na crista (esquerda); Fissuras transversais na crista (direita)	61
Figura 18 –	Assentamento da crista (esquerda); Orifícios na crista (direita)	61
Figura 19 –	Erosão no paramento de montante (esquerda); Deslocamento do rip-rap ou enrocamento de proteção (direita)	62
Figura 20 –	Grandes fissuras no paramento de montante (esquerda); Deslizamentos ou colapsos no paramento de montante (direita)	63
Figura 21 –	Infiltração a montante (esquerda); Fissuras longitudinais no	

	paramento de jusante (direita)	63
Figura 22 –	Deslizamento ou colapso no paramento de jusante (esquerda); Infiltrações no paramento de jusante (direita)	64
Figura 23 –	Formação de cavidades ou colapso no paramento de jusante (esquerda); Erosão no paramento de jusante (direita)	64
Figura 24 –	Infiltração de água no sopé a jusante (esquerda); Água parada no sopé a jusante (direita)	65
Figura 25 –	Áreas úmidas ou surgências de água no paramento de jusante	65
Figura 26 –	Inoperabilidade dos equipamentos para a saída de água	66
Figura 27 –	Problemas nos condutos	66
Figura 28 –	Erosão / deslizamentos no canal de restituição	67
Figura 29 –	Bloqueio do canal de descarga	67
Figura 30 –	Vegetação excessiva nos taludes (esquerda); Atividade animal (direita)	68
Figura 31 –	Funções de Valor para os Critérios 1 e 2 e respectivos conceitos	71
Figura 32 –	Funções de Valor para os Critérios 3 e 4 e seus respectivos conceitos	72
Figura 33 –	Funções de Valor para os Critérios 5 e 6 e seus respectivos conceitos	72
Figura 34 –	Funções de Valor para os Critérios 7 e 8 e seus respectivos conceitos	73
Figura 35 –	Funções de Valor para os Critérios 9 e 10 e seus respectivos conceitos	73
Figura 36 –	Funções de Valor para os Critérios 11 e 12 e seus respectivos conceitos	74
Figura 37 –	Funções de Valor para os Critérios 13 e 14 e seus respectivos conceitos	74
Figura 38 –	Funções de Valor para os Critérios 15 e 16 e seus respectivos conceitos	75
Figura 39 –	Funções de Valor para os Critérios 17 e 18 e seus respectivos conceitos	75
Figura 40 –	Equações ajustadas e r^2 para todos os critérios	76
Figura 41 –	Vistas de locais da barragem Serra dos Cavalos	79

Figura 42 –	Vistas de locais da barragem Guilherme Azevedo	80
Figura 43 –	Reservatórios Serra dos Cavalos (esquerda), Guilherme Azevedo e Jaime Nejaim (ambos a direita)	82
Figura 44 –	Localização das barragens sob jurisdição do DNOCS em Pernambuco	84
Figura 45 –	Finalidade das barragens do DNOCS, em Pernambuco	85
Figura 46 –	Bacias que as barragens do DNOCS, em Pernambuco, pertencem	85
Figura 47 –	Tipos das barragens do DNOCS, em Pernambuco	86
Figura 48 –	Percurso Metodológico para geração da mancha de inundação	87
Figura 49 –	Hidrogramas de ruptura gerados no HEC-RAS para a barragem Serra dos Cavalos	92
Figura 50 –	Mapa, a jusante da Barragem Serra dos Cavalos, de valores da profundidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m, utilizando diferentes MDT's	94
Figura 51 –	Mapa, a jusante da Barragem Serra dos Cavalos, de valores da velocidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m/s, utilizando diferentes MDT's	94
Figura 52 –	Mapa, a jusante da Barragem Serra dos Cavalos, de valores da profundidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m, utilizando diferentes espaçamentos de pontos utilizados na malha discretizada	96
Figura 53 –	Mapa, a jusante da Barragem Serra dos Cavalos, de valores da velocidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m/s, com diferentes espaçamentos de pontos utilizados na malha discretizada	97
Figura 54 –	Mapa, a jusante da Barragem Serra dos Cavalos, de valores da profundidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m, utilizando diferentes tempos de formação da brecha	97
Figura 55 –	Mapa, a jusante da Barragem Serra dos Cavalos, de valores da velocidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m/s, utilizando diferentes tempos de formação da brecha	98
Figura 56 –	Mapa, a jusante da Barragem Serra dos Cavalos, de valores da profundidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m, utilizando diferentes Coeficientes de Manning	99
Figura 57 –	Mapa, a jusante da Barragem Serra dos Cavalos, de valores da	

	velocidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m/s, utilizando diferentes Coeficientes de Manning	99
Figura 58 –	Hidrogramas de ruptura gerados no HEC-RAS da barragem Guilherme Azevedo	100
Figura 59 –	Mapa, a jusante da Barragem Guilherme Azevedo, de valores da profundidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m, utilizando diferentes MDT's	102
Figura 60 –	Mapa, a jusante da Barragem Guilherme Azevedo, de valores da profundidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m, utilizando diferentes MDT's	102
Figura 61 –	Mapa, a jusante da Barragem Guilherme Azevedo, de valores da profundidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m, utilizando diferentes espaçamentos de pontos utilizados na malha discretizada	103
Figura 62 –	Mapa, a jusante da Barragem Guilherme Azevedo, de valores da velocidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m/s, utilizando diferentes espaçamentos de pontos utilizados na malha discretizada	104
Figura 63 –	Mapa, a jusante da Barragem Guilherme Azevedo, de valores da profundidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m, utilizando diferentes tempos de formação da brecha	105
Figura 64 –	Mapa, a jusante da Barragem Guilherme Azevedo, de valores da velocidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m/s, utilizando diferentes tempos de formação da brecha	106
Figura 65 –	Mapa, a jusante da Barragem Guilherme Azevedo, de valores da profundidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m, utilizando diferentes Coeficientes de Manning	107
Figura 66 –	Mapa, a jusante da Barragem Guilherme Azevedo, de valores da velocidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m/s, utilizando diferentes Coeficientes de Manning	107
Figura 67 –	Levantamento do volume (m ³) das barragens do DNOCS, em Pernambuco	115

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Alguns programas de modelagem hidrodinâmica	52
Quadro 2 –	Causas de Rupturas em Barragens	68
Quadro 3 –	Critérios que compõem o ISB	70
Quadro 4 –	Características mínimas das barragens estabelecidas pelo EUA – <i>Design of Small Dams</i> (1987)	77
Quadro 5 –	Barragens analisadas à aplicação da metodologia ISB	83
Quadro 6 –	Ficha de avaliação da barragem Guilherme Azevedo	110
Quadro 7 –	Ficha de avaliação da barragem Serra dos Cavalos	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Especificações técnicas dos produtos do PE3D	57
Tabela 2 –	Interpretação do Índice de Segurança de Barragem – ISB obtido para cada empreendimento	77
Tabela 3 –	Informações sobre a barragem Serra dos Cavalos	80
Tabela 4 –	Informações sobre a barragem Guilherme Azevedo	81
Tabela 5 –	Resultado da aplicação da Metodologia ISB para 38 barragens de Pernambuco	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANM	Agência Nacional de Mineração
BRF	Barragem de Rejeitos de Fundão
CAGEPA	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
CFEM	Compensação Financeira pela Exploração do Recursos Naturais
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
CRI	Sistema de Classificação de Barragens de acordo com o Risco
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
DPA	Dano Potencial Associado
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
FIRJAN	Federação das Indústrias do Rio de Janeiro
HEC	<i>Hydrologic Engineering Center</i>
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais
ICOLD	Comissão Internacional sobre Grandes Barragens
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
OSGeo	<i>Open Source Geospatial Foundation</i>
PAE	Planos de Ações de Emergência
PE3D	Pernambuco Tridimensional
PNE	Plano Nacional de Energia Elétrica
PNMA	Política Nacional do Meio Ambiente
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PSB	Plano de Segurança da Barragem
RAS	<i>River Analysis System</i>
RSB	Relatório de Segurança de Barragens
SEMARH	Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos

SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SINIMA	Sistema Nacional de Informações sobre o Meio Ambiente
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SNISB	Sistema Nacional de Informação de Segurança de Barragens
SRTM	<i>Shuttle Radar Topographic Mission</i>
TED	Termo de Execução Descentralizado
TIN	Redes Triangulares Irregulares
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
USBR	<i>United States Bureau of Reclamation</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	21
2.1	Geral	21
2.2	Específicos	21
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1	Contexto Histórico.....	22
3.1.1	<i>Primeiros registros de barragens na civilização.....</i>	<i>22</i>
3.1.2	<i>As barragens no Brasil.....</i>	<i>23</i>
3.2	Acidentes com barragens no Brasil.....	25
3.2.1	<i>Barragem de Camará</i>	<i>26</i>
3.2.2	<i>Barragem de Rejeitos de Fundão.....</i>	<i>28</i>
3.2.3	<i>Barragem I da Mina do Feijão</i>	<i>33</i>
3.3	Legislação de Segurança de Barragens	37
3.3.1	<i>Evolução legislativa.....</i>	<i>37</i>
3.3.2	<i>Aspectos gerais da Política Nacional de Segurança de Barragens</i>	<i>42</i>
3.4	Modelagem de Sistemas Hídricos.....	46
3.4.1	<i>Modelos Hidrodinâmicos</i>	<i>46</i>
3.4.2	<i>Programa de Modelagem Hidrodinâmica HEC-HAS</i>	<i>52</i>
3.5	Sistema de Informação Geográfica – SIG	54
3.6	Perfilamento a LASER.....	55
3.7	Mapas de perigo de inundação	58
3.8	Segurança de barragens.....	59
3.8.1	<i>Panorama geral sobre a segurança de barragens.....</i>	<i>59</i>
3.8.2	<i>Índice de Segurança de Barragens – ISB.....</i>	<i>69</i>
4	METODOLOGIA.....	78
4.1	Caracterização das áreas de estudo	78
4.1.1	<i>Para geração das manchas de inundação</i>	<i>79</i>
4.1.2	<i>Para avaliação da segurança de barragens.....</i>	<i>82</i>
4.2	Procedimentos para obtenção dos resultados	86
4.2.1	<i>Geração das manchas de inundação</i>	<i>86</i>
4.2.1.1	<i>Hidrograma de ruptura</i>	<i>89</i>
4.2.1.2	<i>Propagação da onda de ruptura</i>	<i>90</i>

4.2.1.3	<i>Áreas inundáveis</i>	92
4.2.1.4	<i>Análise de verificação</i>	92
4.3	Avaliação de segurança de barragens	91
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	92
5.1	Simulação de rompimento da Barragem Serra dos Cavalos	92
5.1.1	<i>Modelos digitais do terreno</i>	93
5.1.2	<i>Discretização da malha</i>	95
5.1.3	<i>Tempo de formação da brecha</i>	97
5.1.4	<i>Coefficientes de Manning</i>	98
5.2	Simulação de rompimento da Barragem Guilherme Azevedo	100
5.2.1	<i>Modelos digitais do terreno</i>	101
5.2.2	<i>Discretização da malha</i>	103
5.2.3	<i>Tempo de formação da brecha</i>	105
5.2.4	<i>Coefficientes de Manning</i>	106
5.3	Análise geral sobre os rompimentos hipotéticos das barragens	108
5.4	Aplicação do Índice de Segurança de Barragens – ISB	109
6	CONCLUSÕES	117
	REFERÊNCIAS	119

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país rico em água, mas a exploração deste recurso faz com que, eventualmente, haja alteração dos cursos d'água através de desvios e barragens, que no presente devem ser analisados de forma ainda mais segura e sustentável.

Tratando-se de barragens, é possível defini-las como sendo estruturas encontradas com frequência em rios com o objetivo de atender os usos múltiplos dos recursos hídricos. A implementação de uma barragem cobra planejamento apropriado, cumprimento das exigências legais e um plano de limites de segurança especialmente elaborado para cada estrutura (CONCEIÇÃO; LIMA; SILVA, 2020; SILVA, 2021).

Segundo o Relatório de Segurança de Barragens – RSB, elaborado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA, referente ao ano de 2019, no Brasil tinha 19.388 barragens cadastradas no Sistema Nacional de Informação de Segurança de Barragens – SNISB, das quais 61% possuíam informações insuficientes para determinar se uma barragem é ou não submetida à Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB (ANA, 2020). Nesse mesmo ano houve 12 (doze) relatos de acidentes e 58 (cinquenta e oito) incidentes com barragens, representando a maior quantidade de registros desse tipo quando comparado aos Relatórios anteriores. Dos doze acidentes reportados, dez deles aconteceram com pequenas barragens, as quais possuíam características semelhantes, sendo elas: pequenas barragens de terra que romperam em eventos de cheia, causando danos materiais (ANA, 2020).

Conforme pontua Leite (2019), os acidentes com barragens, comumente, são eventos de grandes proporções, os quais produzem impactos sociais, econômicos e ambientais. O conjunto espacial dessas estruturas propicia a propagação do desastre em grande escala, já que as margens de rios, afluentes, córregos e vales a jusante possuem agrupamentos urbanos e demais equipamentos de infraestrutura urbana.

É importante destacar que o desenvolvimento de um banco de dados único contendo esses registros ainda é um desafio para diversos pesquisadores brasileiros, havendo somente artigos que tentam reunir a maior quantidade de dados possíveis, assim como foi verificado no Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, em 2019, onde se catalogou 39 (trinta e nove) casos de acidentes com barragens no país desde a década de 50, sendo 20 (vinte) desses após 2010. Essa situação resultou em uma média, para os últimos dez anos, de cerca de 2 (dois) acidentes por ano. Entre os acidentes ocorridos, o mais grave deles foi o rompimento da

barragem de Brumadinho, em Minas Gerais, no ano de 2019, que deixou 270 vítimas fatais e mais de quarenta mil pessoas afetadas (ANA, 2020; SILVA, 2021).

Mesmo com esse histórico de acidentes e incidentes, o governo federal brasileiro só legislou de fato a respeito do tema em 2010, depois de sancionar a Lei Federal nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabeleceu a PNSB e deu origem ao SNISB.

Com os grandes e recentes acidentes envolvendo barragens de rejeito no Brasil, a Lei nº 12.334/2010 foi alterada, sendo instituída a Nova PNSB, através da Lei Federal nº 14.066, de 30 de setembro de 2020, trazendo algumas alterações, dentre elas, a obrigatoriedade do mapa de inundação com um estudo de possíveis cenários de áreas que venham a ser afetadas caso ocorra o vazamento ou ruptura da barragem.

A construção de um mapa abrangendo as áreas passíveis de inundação se mostra como uma importante ferramenta para direcionamento do crescente desenvolvimento da urbanização e a ordenação do uso e ocupação do solo, uma vez que havendo o zoneamento dessas áreas, é possível realizar as suas delimitações e designá-las para usos adequados (FIGUEIREDO, 2003).

Para a geração da mancha de inundação, um dos itens tidos como essenciais para seu detalhamento é a base de dados utilizada para modelar o terreno. Segundo Silveira e Silveira (2015), os Modelos Digitais do Terreno – MDTs são definidos como valores altimétricos do terreno desprezando objetos na superfície, por exemplo, como árvores ou construções.

Essa forma de análise, observando o desempenho de diferentes algoritmos, isto é, modelos digitais do terreno, possibilita proporcionar a melhor representação espacial dos fluxos acumulados. Além disso, os resultados obtidos através da modelagem, podem corroborar à avaliação da distribuição espacial do escoamento superficial, com o intuito de identificar áreas sujeitas a inundação (MORAES *et al.*, 2014).

Como forma de apoio ao método de modelagem computacional para geração de áreas inundáveis devido ao rompimento de barragens com o mapa de inundação, propõe-se a aplicação de um índice para avaliar o risco quanto a segurança de barragens. Através do índice de Segurança de Barragens – ISB, proposto pela metodologia de Zuffo (2005), consegue-se realizar uma ampla avaliação da segurança de barragens, desde que se tenha a documentação referente a inspeção dos reservatórios.

Esta pesquisa tem como objetivo analisar a segurança de barragens através do estudo de possíveis impactos das manchas de inundação geradas devido ao rompimento hipotético das barragens Serra dos Cavalos e Guilherme Azevedo, a partir da modelagem hidrodinâmica, em três diferentes modelos digitais do terreno (SRTM, PE3D 5m e PE3D

30m) e da aplicação do Índice de Segurança de Barragens – ISB para verificar o risco de rompimento de 38 (trinta e oito) barragens, de diferentes tipos e finalidades, que estão sob jurisdição do Departamento Nacional de Obras Contra a Seca – DNOCS e presentes no território pernambucano.

Os documentos utilizados nesta pesquisa, como relatórios de inspeção, fazem parte de um Convênio firmado entre a UFPE e o DNOCS, no qual foi realizado um complexo levantamento sobre essas barragens que estão sob jurisdição do DNOCS no estado de Pernambuco.

Então, este trabalho busca apresentar essa análise como uma ferramenta para avaliação da segurança de barragens, conjugando o estudo de possíveis impactos de manchas de inundação devido a rompimentos de barragens com aplicação de um método de avaliação de segurança para verificar o risco de rompimento de barramentos.

2 OBJETIVOS

Nesse item serão apresentados os objetivos da presente pesquisa.

2.1 Geral

Analisar a segurança de barragens através do estudo de possíveis impactos das manchas de inundação geradas devido ao rompimento hipotético das barragens Serra dos Cavalos e Guilherme Azevedo, a partir da modelagem hidrodinâmica, em três diferentes modelos digitais do terreno e da aplicação do Índice de Segurança de Barragens – ISB para verificar o risco de rompimento de 38 (trinta e oito) presentes no território pernambucano.

2.2 Específicos

- Realizar a modelagem hidrodinâmica nos modelos digitais do terreno SRTM, PE3D 5m e PE3D 30m;
- Examinar como a resolução espacial com diferentes bases topográficas impactam na modelagem hidrodinâmica da ruptura hipotética de barragens de terra;
- Aplicar o ISB para verificar o nível de segurança de 38 barragens.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item são apresentados os temas necessários para o desenvolvimento desta pesquisa: (a) Contexto Histórico; (b) Acidentes com barragens no Brasil; (c) Legislação de Segurança de Barragens; (d) Modelagem de Sistemas Hídricos; (e) Sistema de Informação Geográfica – SIG; (f) Perfilamento a LASER; (g) Mapas de perigo de inundação; (f) Segurança de barragens.

3.1 Contexto Histórico

Nesse item será apresentado o contexto histórico para compreensão da presente pesquisa.

3.1.1 Primeiros registros de barragens na civilização

A Lei Federal nº 14.066/2020¹ define barragem, em seu Art. 2º, como sendo estruturas em um curso contínuo ou temporário de água destinadas a contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou misturas de líquidos e sólidos, incluindo o barramento e as estruturas relacionadas (BRASIL, 2020).

Segundo Henrique (2020), as barragens detêm notável importância à sociedade moderna, constituindo-se como fonte confiável de abastecimento de água ao longo dos últimos milênios, ofertando um recurso profícuo para o estabelecimento e crescimento de aglomerados urbanos, bem como ao próprio desenvolvimento da humanidade.

As barragens, há cerca de cinco mil anos, vêm servido a muitas civilizações, assim como se pode observar por meio de ruínas ou, até mesmo, através daquelas que ainda se encontram em funcionamento (LIRA, 2019).

As mais antigas barragens estavam situadas no Egito, Índia e Oriente Médio. Passada a revolução industrial, teve-se a necessidade de construir um número elevado de barragens, fazendo acontecer um aprimoramento nas técnicas de construção e de projeto (BISERRA *et al.*, 2019).

¹ Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração).

A princípio as barragens eram destinadas unicamente para abastecimento de água, todavia, ao passo que as civilizações se desenvolviam, outras utilidades surgiram, como a irrigação, controle de cheias, navegação e geração de energia, comprovando a importância dessas estruturas para a sociedade moderna. Notoriamente, as técnicas construtivas foram se aprimorando a começar da experiência dos construtores, ocasionando nos múltiplos métodos construtivos que se tem atualmente (HENRIQUE, 2020).

De acordo com o relatório da Comissão Mundial de Barragens, no mínimo 45.000 grandes barragens foram construídas para o atendimento das demandas de água e energia. Segundo a Comissão Internacional sobre Grandes Barragens – ICOLD, para ser tida como uma grande barragem, ela deve possuir de cinco a quinze metros de altura, indo desde seu alicerce, e precisa ter o seu reservatório com capacidade de acumulação superior a 3 milhões de m³ (COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS – CBDB, 2011).

3.1.2 As barragens no Brasil

No Brasil, o registro mais antigo que se tem sobre a construção de barragem, é de uma contida na área urbana de Recife, capital pernambucana, possivelmente no final do Século XVI, antes mesmo da entrada dos holandeses no estado. No presente, recebe o nome de açude Apipucos e é encontrada em um mapa holandês de 1577. A barragem original foi ampliada e tornada mais robusta para possibilitar a construção de uma via essencial ao acesso até o centro de Recife (CBDB, 2011).

No ano de 1877 houve o que se entendeu como a maior tragédia nacional até então, devido a um fenômeno natural conhecido como a Grande Seca no Nordeste que perdurou por mais de três anos, resultando em marcas sentidas até os dias atuais. A partir desse evento, uma série de medidas foram tomadas para solucionar o problema, marcando o início do planejamento e projeto de grandes barragens no Brasil. Com isso, a primeira dessas barragens foi Cedros, localizada no Ceará e finalizada em 1906 (CBDB, 2011).

Segundo Faria (2011), em 1901, a primeira usina da concessionária Light, a única do Brasil na época, foi inaugurada e entrou em operação, no rio Tietê, com a finalidade de prover energia elétrica à cidade de São Paulo.

Em 1902, sete anos antes do atual Departamento Nacional de Obras Contra as Secas – DNOCS ser designado para operar no semiárido brasileiro, o *United States Bureau of Reclamation* – USBR foi criado como agência de recursos hídricos, implantando centenas de barragens ao longo do século XX (MELO, 2019; PFAFF, 2010; PFAFF, 2001; SALMOND,

1965; SOURCE, 1992). Depois, com o DNOCS já a frente, na região Nordeste do Brasil, a construção de diversas pequenas barragens e açudes foi tida como a ação mais eficiente no combate à seca, contendo, assim, a grande migração de nordestinos para o Sudeste (CBDB, 2011).

Posteriormente, no segundo governo Vargas (1951-1954), a construção de barragens voltou a ter fôlego, mas se acreditava que o atraso do Nordeste seria superado também pela irrigação e outras benfeitorias que viriam através da água acumulada em açudes (CASTRO, 2019).

De acordo com o CBDB (2011), no ano de 1958, foram iniciadas as obras da Barragem de Furnas em Minas Gerais, com a finalidade de geração de energia elétrica, na qual, em 1963, entrou em operação com potência nominal de 1.216 MW. Essa usina era considerada uma das maiores da América Latina durante a década de 1960.

Oliveira (2018) destaca que nessa mesma década, a partir do final dos anos 1950, a construção de hidrelétricas no Brasil cresceu, notavelmente após o regime militar brasileiro. Todavia, a expansão hidrelétrica brasileira não decorreu somente de fatores externos, mas também de dinâmicas nacionais, e ocasionalmente locais, em que a participação do Estado foi central. A geração de energia elétrica por meio dos rios já estava sendo priorizada no país desde as primeiras instalações elétricas no final do século XIX e início do século XX. Através do governo de Getúlio Vargas, o Estado Federal brasileiro, em sua ideologia principal do período, continuamente estimulou e viabilizou o crescimento da hidroeletricidade como uma benesse comparativa ao progresso no país com seus rios abundantes.

O auge no desenvolvimento das barragens aconteceu entre as décadas de 60 a 70 quando boa parte dos rios brasileiros foram completamente aproveitados na construção de barramentos em cascata, o que se vê em países com longos rios e extensas dimensões territoriais (TUNDISI, 1999; CBDB, 2011; MELO, 2012).

Dos anos 70 em diante começou a preocupação mundial com a degradação ambiental. Em 1972 houve a Conferência de Estocolmo, que deu início a realização dos primeiros estudos científicos sobre a preservação ambiental, em temas como o esgotamento de recursos, insuficiência de alimentos e aumento do consumo. Além disso, nessa mesma década, no ano de 1971, outro ponto a destacar é o da construção da Barragem de Ponte Nova em São Paulo, com objetivo de controlar as cheias do Rio Pinheiros (MELO, 2012).

Em 1986, houve a conclusão da barragem de Patu, a qual teve um processo construtivo bem demorado, isto é, 65 anos depois de ter sido iniciada as suas obras. A

barragem teve suas obras paralisadas em 1923, onde em 1932 aconteceu uma forte seca (CBDB, 2011).

No ano seguinte, conforme Fonseca (2013) descreve, o episódio sobre a construção da usina hidrelétrica de Belo Monte, situada no rio Xingu e localizada no município de Altamira, no Pará, é visto como único para explicitar como acontecem os conflitos, contradições e esforços de coordenação intragovernamental no Estado brasileiro, em uma região delicada ao desenvolvimento nacional (se tratando da infraestrutura) e onde a dimensão da incorporação de padrões de sustentabilidade ambiental representa estímulo significativo. O propósito de construir Belo Monte se remete ao regime militar, e a previsão da obra estava presente no Plano Nacional de Energia Elétrica – PNE de 1987-2010.

No ano de 1988, o Primeiro Encontro dos Povos Indígenas do Xingu, que teve mais de 3 mil pessoas presentes (sendo 650 índios), mobilizou a sociedade civil prejudicada pela usina. Depois das manifestações sociais e a desistência do Banco Mundial para financiar a usina, o projeto inicial passou por uma remodelação em 1994. A pressão pela construção se elevou em 2001-2002, logo que o Brasil passou por um período de racionamento energético denominado como “crise do apagão”. A construção de Belo Monte era prevista em um plano emergencial, idealizado em resposta à crise, buscando majorar a oferta de energia. Dessa forma, o processo de licenciamento de Belo Monte teve início em 2002 e a partir disso se deu um processo agitado, com muitos conflitos e oposição entre coalizões favoráveis e contrárias à usina (FONSECA, 2013).

3.2 Acidentes com barragens no Brasil

Desde o século XX, há um forte crescimento na quantidade de barragens espalhadas pelo país, que vem refletindo até o século XXI. Entretanto, resulta dessa consolidação a relevância em perceber que a ascensão na disseminação de barragens maximiza os riscos inerentes a essas construções, fazendo com que os acidentes sejam cada vez mais frequentes, especialmente quando não se tem legislação própria que direcione a operação e, por conseguinte, não existe fiscalização que assegure a continuidade da manutenção (SILVA *et al.*, 2021). Nos itens a seguir são apresentados casos de acidentes com barragens, em que o primeiro é do tipo hidrológico, conforme estudado ao longo deste trabalho, e os outros dois sendo casos de barragens de rejeitos, todos de grande impacto, com a negligência na fiscalização sendo um dos principais fatores para esses acontecimentos.

3.2.1 Barragem de Camará

Desde o ano de 1960 o município de Alagoa Grande, situado no brejo paraibano, vinha passando por problemas de falta d'água, já que não detinha de um reservatório de acumulação. Em dezembro de 1997, foi decretado estado de calamidade pública pelo Governo Municipal devida à falta desse recurso. Essa situação resultou na reunião de autoridades para discutirem sobre o problema, que ocasionou no anúncio de algumas medidas para minimizar e seguidamente solucionar o abastecimento de água à população, como a escavação de alguns poços no leito do rio Mamanguape, a implantação de uma adutora de ferro galvanizado na cachoeira de Urucu e a construção de uma barragem de nível para captação (PAIVA JÚNIOR, 2006).

A ideia de construir a barragem, em 12 de março de 1998, foi direcionada, através do ofício nº 01/1998, para o coordenador da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos - COGERH e ao Secretário Extraordinário de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, dentro do Programa Água para Todos, do Governo Federal. “A decisão tomada gerou a portaria nº 11/98, de 22 de março de 1998, publicada no Diário Oficial do Estado, de 23 de abril de 1998, constituindo a Comissão Permanente de Licitação da Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SEMARH” (GUEDES, 2011, p. 56).

O Governo do Estado da Paraíba através da Companhia de Águas e Esgotos da Paraíba – CAGEPA, então, anunciou a construção da barragem de acumulação de Barra do Camará na divisa dos municípios de Alagoa Nova e Areia, prevista para o início de 1998. A barragem iria abastecer tanto esses dois municípios, como também Alagoa Grande, Arara, Areal, Cepilho, Chã do Marinho, Esperança, Floriano, Juarez Távora, Lagoa do Mato, Lagoa Seca, Matinhas, Montadas, Remígio, Pilões, Puxinanã, São Miguel, São Sebastião de Lagoa de Roça, São Tomé, Serraria e Zumbi, totalizando um benefício a mais de 200 mil habitantes (PAIVA JÚNIOR, 2006; GUEDES, 2011).

Destaca-se que a barragem tinha o objetivo de oferecer água de boa qualidade, acabar com os racionamentos, aprimorar a agricultura irrigada e a pesca, desenvolver das condições de saneamento, bem como estimular a implantação de indústrias na região (BRASIL, 2005).

Depois da barragem construída em 2001, com o passar do tempo, foram sendo detectados problemas, dos quais resultaram em sua ruptura. Diversos julgamentos inadequados foram apresentados, que, quando juntos, motivaram a ocorrência do acidente, não podendo elencar apenas uma causa para a ruptura. Constatou-se ausência de seguimento e

observação sistemática do comportamento da barragem enquanto a represa enchia. Pontuou-se a ausência de atitudes e decisões da proprietária ou de seus delegados a respeito de ações para investigação das causas e condições das observações de ocorrências. E, por diversas vezes, foi deixado, para pessoas leigas em relação a inspeção de barragens, a responsabilidade de vistoriar a Barragem de Camará, quando profissionais da área deveriam ter realizado visitas técnicas (KANJI, 2004; NIEBLE, 2004).

Também, constatou-se que ocorreu julgamento inadequado na interpretação geológica da extensão da falha, pois não foi removida em sua totalidade, o que finda por expressar um risco geológico, passando a se caracterizar como um grande atrativo a sérios acidentes (KANJI, 2004; NIEBLE, 2004; MEDEIROS, 2010). Na Figura 1 é mostrado a região de rompimento da barragem tanto a montante, como a jusante.

Figura 1 – Vistas da área de ruptura: (a) e (b) a jusante; a montante da barragem



Fonte: SECOM (2004).

O rompimento da Barragem de Camará elevou o nível do rio Mamanguape em mais de 5m e gerou os maiores impactos nos municípios de Alagoa Grande (em alguns pontos a água atingiu quase 2 m dentro das casas) e Mulungu, mas também atingiu Alagoa Nova e Alagoinha. Houve a destruição da ponte que ligava a cidade aos municípios de Areia e Alagoa Nova, além de, pelo menos, 40 mil pessoas sofrerem com a interrupção dos serviços de abastecimento de água, luz, telefone, sistema de esgotamento sanitário e aproximadamente 20 km de vias de transporte e sistema de coleta de lixo afetados (PARAÍBA, 2004; BRASIL, 2005; GUEDES, 2011).

O desastre destruiu as casas de 1.600 pessoas e causou a morte de cinco pessoas. Empresas como o Engenho Lagoa Verde e o Engenho Macaíba, a Cerâmica Real, as Serralharias Gondim e Milton, a Olaria União e a Mecânica Gekader, que estava presentes em

Alagoa Grande, acabaram sendo muito afetadas pelas águas (PAIVA JÚNIOR, 2006). A Figura 2 mostra diversos locais em Alagoa Grande que foram atingidas pelas águas.

Figura 2 – Áreas afetadas da cidade de Alagoa Grande: (a) rua do rio; (b) e (c) vistas aéreas



(a)

(b)

(c)

Fonte: SECOM (2004).

A respeito dos impactos ambientais, destaca-se o assoreamento do rio devido à erosão, impulsionado pela ausência de mata ciliar. Também, constatou-se o alargamento da calha do rio, destruição de parte da fauna e flora, prejuízo na qualidade dos produtos para consumo na área agrícola (SILVA *et al.*, 2006).

3.2.2 Barragem de Rejeitos de Fundão

Um dos maiores acidentes com barragens ocorridos no Brasil, segundo detalha Botelho *et al.* (2021), foi o rompimento da Barragem de Rejeitos de Fundão – BRF, ocorrido em 5 de novembro de 2015, no município de Mariana/MG. A BRF, propriedade da Mineradora Samarco S.A., uma *joint-venture* entre a brasileira Vale S.A. e a anglo-australiana BHP Billiton, que contava com diques alteados a montante e comportava, à época, por volta de 55 milhões de metros cúbicos de rejeitos oriundos do processo de beneficiamento do minério de ferro através de via úmida. A massa de rejeitos se deslocou por aproximadamente 650 quilômetros ao longo de todo o vale do Rio Doce, chegando à sua foz, no litoral do estado do Espírito Santo, e atingindo a fauna e a flora por completo em seu trajeto, alcançando em torno de 1.587 hectares de vegetação nas suas margens. Populações de 39 municípios de Minas Gerais e do Espírito Santo ainda amargam os danos socioeconômicos provenientes da maior tragédia socioambiental do Brasil. Tratando-se de perdas humanas, 14 trabalhadores da

BRF e 5 moradores do distrito de Bento Rodrigues morreram, há 8 quilômetros a jusante da BRF.

Aproximadamente 32,6 milhões de m³ de rejeitos saíram do reservatório da barragem, que se referia em torno de 60% de sua capacidade, quando aconteceu. Os sedimentos chegaram à barragem de Santarém, onde se armazenava água, e parte seguiu descendo o vale. O volume de rejeitos não apenas derrubou edificações, mas também destruiu a infraestrutura dos distritos de Bento Rodrigues e Paracatu de Baixo, em Mariana/MG, e uma parte do distrito de Gesteira, em Barra Longa/MG. Com isso, uma quantidade significativa de famílias perdeu suas casas. O material fluiu rio abaixo indo de encontro ao Rio Gualaxo do Norte e, posteriormente, para o Rio Doce, trazendo problemas para o abastecimento público de água nos municípios da região (SAMARCO, 2016). A Figura 3 e a Figura 4 mostram como estava a barragem de Mariana antes e depois da ruptura, respectivamente.

Figura 3 – Região antes do rompimento da barragem



Fonte: Barros e Pamboukian (2017, p.18).

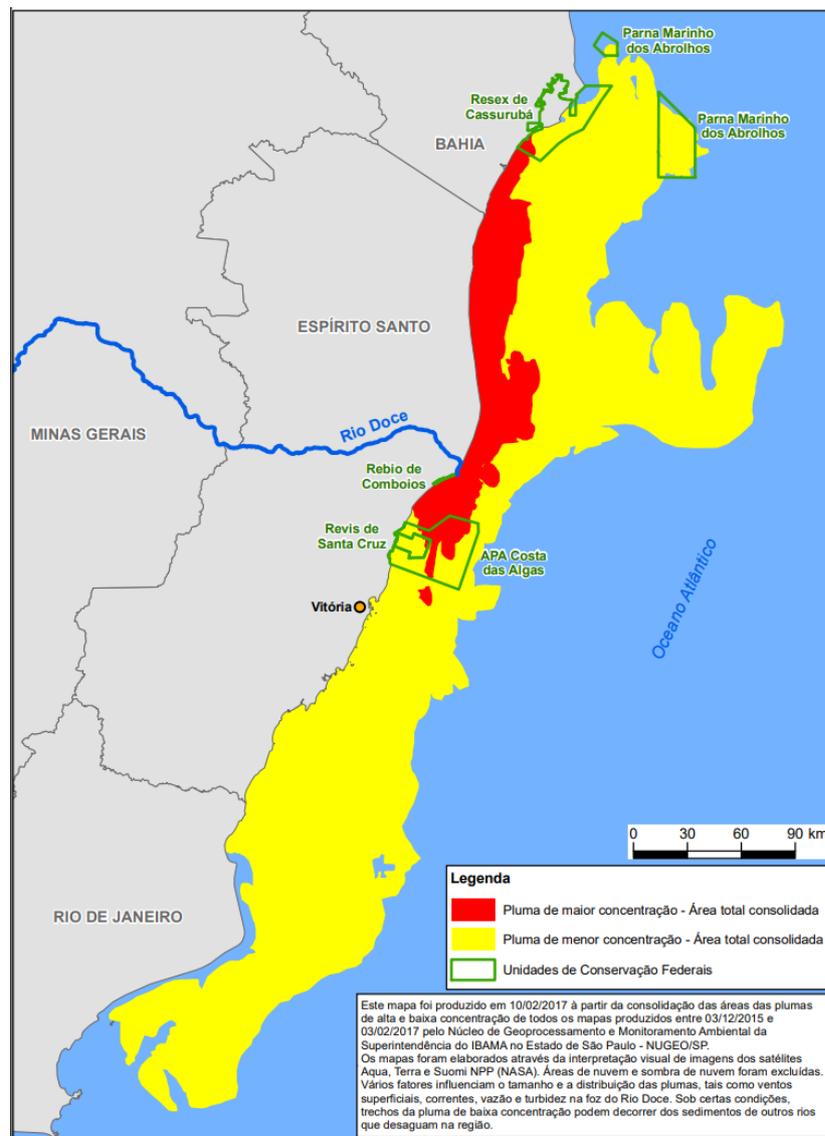
Figura 4 – Região depois do rompimento da barragem



Fonte: Barros e Pamboukian (2017, p.19).

De acordo com a SAMARCO (2016), cerca de 80% dos rejeitos que seguiram em direção a Unidade de Germano, ficaram entre a área pós-Fundão e a Usina Risoleta Neves, ou Candonga, perto de Santa Cruz do Escalvado/MG, numa extensão de 113 km. A outra parte do volume seguiu do Rio Doce para o mar, originando desordens em municípios mineiros e do litoral norte capixaba (Figura 5).

Figura 5 – Plumagens de Sedimentos na Foz do Rio Doce – Consolidação dos Mapas Gerados de 03/12/2015 a 03/02/2017



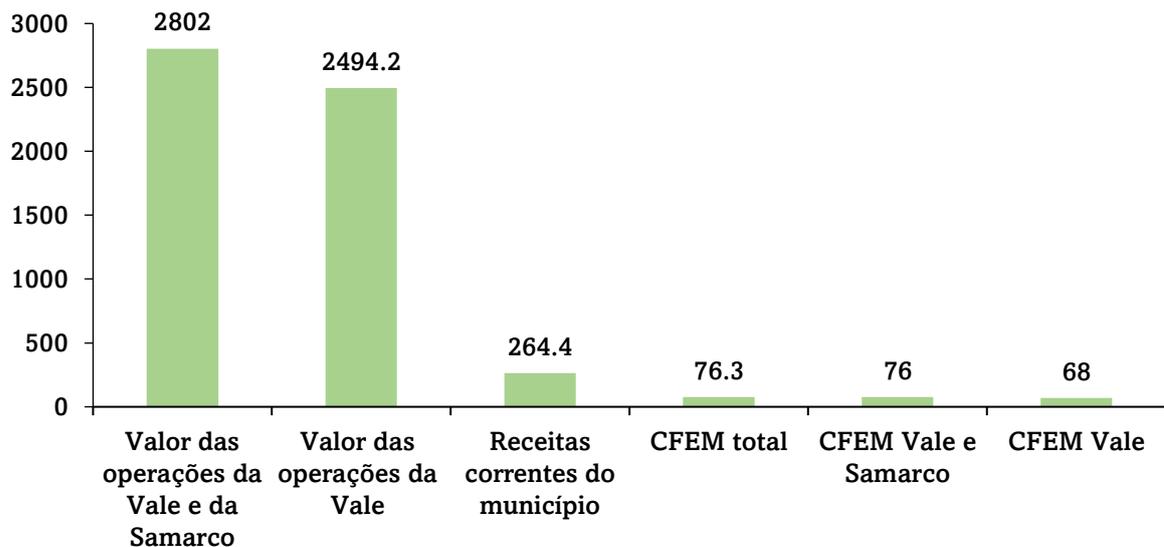
Fonte: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais – IBAMA (2020).

Segundo Coelho (2020), é perceptível que o desastre trouxe um elevado impacto não apenas para a área geográfica atingida, mas também para a economia. Um dos aspectos mais

importantes a destacar é que o município de Mariana tem dependência da mineração, e mais especificamente pela Vale. Anteriormente ao rompimento de Fundão, a CFEM² era um importante aporte de recursos para o orçamento de Mariana.

Porém, depois do rompimento, a CFEM total em Mariana passou por uma redução contínua até 2018, quando houve uma retomada de seu crescimento. Como a Samarco não era o único empreendimento de Mariana, a CFEM voltou a crescer em 2018 devido ao aumento do valor das operações nos complexos minerários da Vale. As receitas correntes decresceram de forma contínua, ainda sem demonstrar uma retomada, sendo intensificado pela crise econômica do país. Não obstante, as despesas seguem esse movimento de queda. Os postos de trabalho no setor extrativo mineral estiveram em um momento de queda desde o rompimento, com diversas demissões sem justa causa, em que o saldo entre demissões e admissões foi estabilizado ao longo de 2018. Na Figura 6, as receitas em Mariana são apresentadas.

Figura 6 – Receitas em Mariana (em R\$ Milhões), 2018



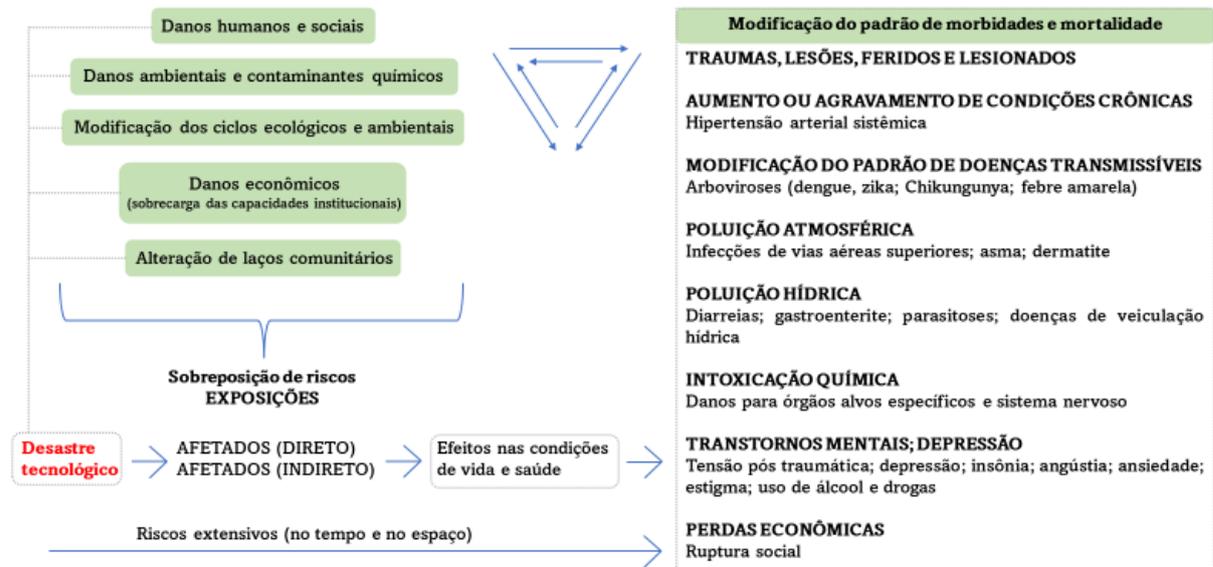
Fonte: Adaptado de Coelho (2020).

É necessário destacar que dentre todos os impactos já abordados, gerados pelo rompimento da barragem, tem-se a contaminação de rios, do solo e da atmosfera, problemas às habitações e inúmeros prejuízos socioeconômicos (FREITAS *et al.*, 2019). Também, foram verificados impactos negativos na saúde da população atingida (Figura 7), destacando “dermatites, diarreias e gastroenterites, hipertensão arterial sistêmica, diabetes mellitus,

² Compensação Financeira pela Exploração dos Recursos Minerais, também conhecida como “royalty da mineração” (COELHO, 2020, p. 29).

infecção das vias aéreas superiores, transtornos mentais (como ansiedade e depressão) e intensificação de doenças infecciosas, como a dengue” (ARAÚJO, COSTA, GONÇALVES, 2022).

Figura 7 – Efeitos do rompimento de Mariana nas condições de vida e saúde da população



Fonte: Adaptada de Silva *et al.* (2020).

Não apenas diretamente as doenças, nota-se uma série de motivações que levam a desencadear esses tipos de morbidades ou até lavar a mortalidade, tudo partindo do desastre ocorrido com a barragem (Figura 7).

Por isso, conforme destacam vários trabalhos, (ZHOURI *et al.*, 2016 e 2017; MILANEZ; MAGNO; GIFFONI, 2019; LASCHEFSKI, 2020), pontua-se que o episódio não aconteceu em decorrência de uma catástrofe natural, mas sim de uma negligência criminosa, não somente das empresas relacionadas, mas igualmente de órgãos públicos encarregadas pelo licenciamento e fiscalização da barragem.

Segundo Lacaz, Porto e Pinheiro (2017) e Minas Gerais (2016), o rompimento da barragem de Fundão consistiu em um crime sócio-ocupacional-ambiental, em que a responsabilidade tem a necessidade de ser apurada de maneira precisa. Não obstante, isso pode ser complexo de conseguir, quando se refere manusear a notória morosidade da justiça no Brasil, visto a omissão das chamadas autoridades constituídas e a habilidade de procrastinação das grandes empresas, segundo seus interesses, através de ações recursais de caráter jurídico-legais.

De fato, o desastre começara durante o planejamento e ainda não se concluiu; até o momento da elaboração deste texto não houve responsáveis presos e os problemas das vítimas ainda estão distantes de serem solucionados (LACAZ, PORTO & PINHEIRO, 2017).

3.2.3 Barragem I da Mina do Feijão

Localizada no município de Brumadinho, a Barragem I da Mina do Feijão, da Mineradora Vale S.A., rompeu no dia 25 de janeiro de 2019. Essa barragem era considerada de médio porte e não possuía pendências documentais. Construída em 1976 pela Ferteco Mineração por meio do método de alteamento a montante, foi adquirida pela Vale em 27 de abril de 2001. A altura da barragem era de 86 metros e seu comprimento da crista de 720 metros (SOARES *et al.*, 2020).

Costa *et al.* (2020) relatam que o rompimento provocou a morte imediata de 272 pessoas, das quais 22 ainda não foram encontradas, bem como deixou o ambiente e a população vulneráveis às toxicidades contidas nos rejeitos de mineração. A lama percorreu nove setores censitários do município, correspondente a 10% da população, incluindo comunidades tradicionais e agricultores. Também, houve impacto à biodiversidade, modificando o ciclo de vetores e hospedeiros; impossibilitou o consumo da irrigação, pesca, banho e lazer no Rio Paraopeba; afetou expressivamente a organização econômico-financeira do município, entre incontáveis impactos que se acrescentam e refletem na saúde de toda a população.

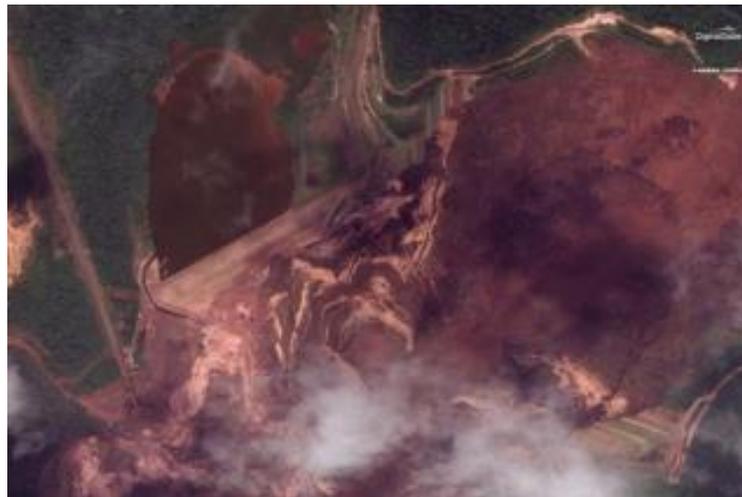
Nas Figuras 8 e 9 são demonstradas as situações da região onde se localiza a barragem de Brumadinho, tanto antes como depois do rompimento, respectivamente.

Figura 8 – Região antes do rompimento da barragem de Brumadinho



Fonte: G1 (2019).

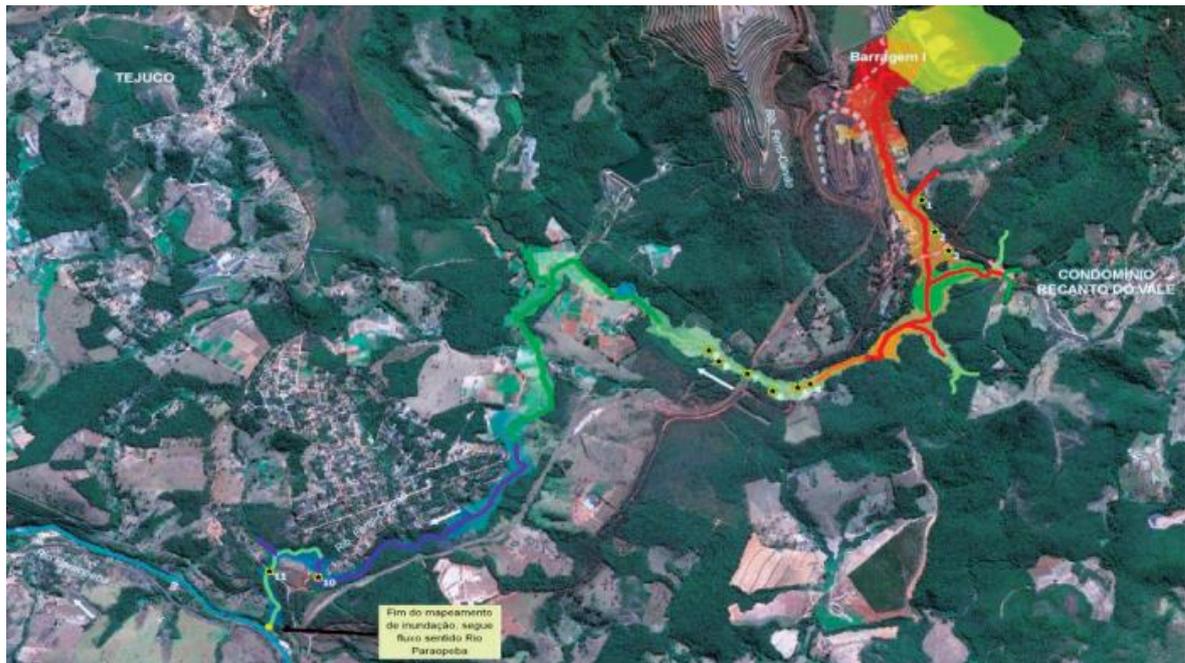
Figura 9 – Região depois do rompimento da barragem de Brumadinho



Fonte: G1 (2019).

Segundo Soares *et al.* (2020, p.360), “os rejeitos da denominada Barragem I escoaram pela área administrativa da mina, seguindo a calha do ribeirão Ferro-Carvão até serem drenados pelo rio Paraopeba. A maior consequência imediata foi a de perdas humanas”. Na Figura 10 é apresentada a macha de inundação ao longo do ribeirão Ferro-Carvão até a chegar no rio Paraopeba. Percebe-se o quanto a elevação do nível do ribeirão, devido ao rompimento da barragem, o faz chegar tão próximo a locais com aglomerações de pessoas, como condomínio e cidade.

Figura 10 – Mapa de rompimento de barragem



Fonte: Vale (2016).

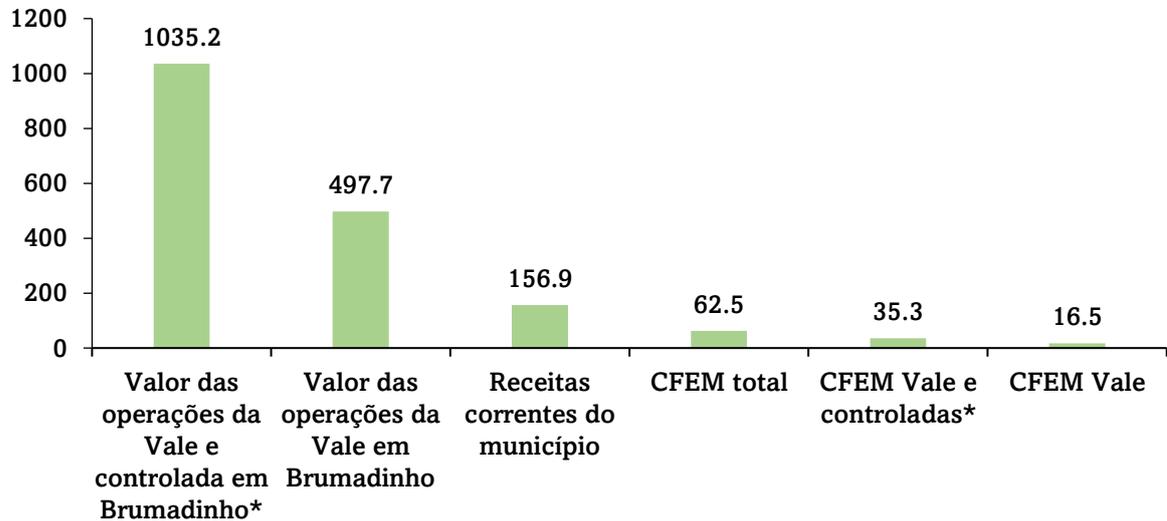
Para Polignano & Lemos (2020), é essencial entender que um desastre com tamanha proporção não pode ser medido somente pelos danos locais, dados pontuais e temáticos, mas se torna preciso saber que o impacto originado pelo rompimento da barragem da empresa Vale é complexo e dinâmico, já que influencia de maneira sistêmica e sinérgica *pari-passu* em relações ambientais, sociais e econômicas por toda a bacia do rio Paraopeba. Com isso, o efeito global é superior e mais complexo que a simples soma das partes.

Assim, a economia local tem forte relação com a atividade mineradora, que é mais voltada para os postos de trabalho e a arrecadação gerada pela atividade. Antes do rompimento da barragem da Vale, no ano de 2018, o percentual de 20% dos empregos formais em Brumadinho representava o setor extrativo mineral, além de que este ocupava a maior parte (35%) de todas as remunerações em Brumadinho. Em geral, a mineração de larga escala acontece em regiões possuem renda média baixa, em que essa diferença de salários faz com que a população local busque por postos de trabalho gerados pela mineração, aumentando a situação de dependência social, além de dificultar a formação de alternativas econômicas (COELHO, 2020).

O outro aspecto referente à economia local é a arrecadação municipal devido a mineração. A receita municipal é o ponto central, pois é advinda da CFEM. Na Figura 11 é demonstrada a comparação entre a receita da CFEM, paga pela Vale, e pelas empresas

mineradoras controladas pela Vale ao município, diante da receita total do município, bem como a quantia das operações da Vale, em Brumadinho (COELHO, 2020).

Figura 11 – Receitas em Brumadinho (em R\$ Milhões), 2018



Fonte: Adaptada de Coelho (2020).

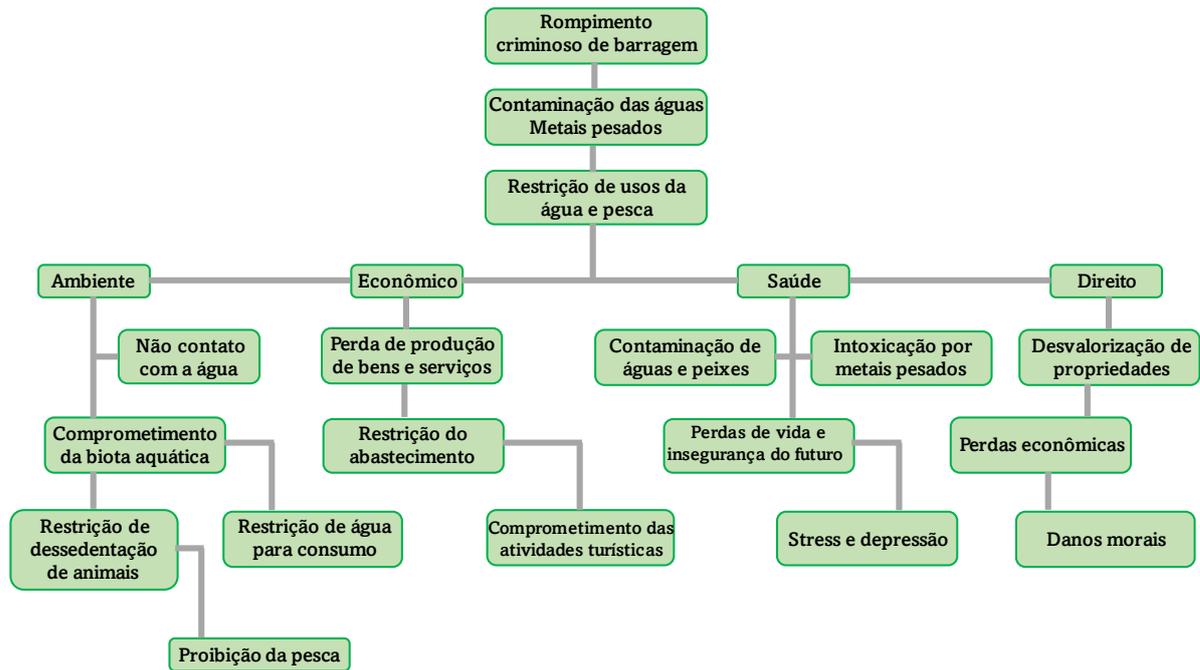
*Minerações Brasileiras Reunidas S.A.

Juntamente a outros episódios ocorridos, a média de rompimento de barragens do complexo industrial-mineral em Minas Gerais cresceu após o acontecimento em Brumadinho, pois foram seis casos entre 2006 e 2015, correspondendo a média de um caso a cada 2 anos. Brumadinho, que sofreu com o rompimento da barragem em janeiro de 2019, continua sob risco, tendo mais três barragens classificadas no nível I, apresentando problemas estruturais. Essa forma de classificação varia entre os níveis I, II e III, indo do menor ao maior grau de risco (FIRMIANO, 2022).

Sobre a qualidade das águas, verificou-se que houve alterações demasiadas, sendo encontrados metais pesados nos sedimentos e em suspensão na água. Na turbidez também foram constatadas modificações excessivas, assim como nos outros parâmetros que medem a qualidade das águas (POLIGNANO & LEMOS, 2020).

Na Figura 12 é mostrado um fluxograma que relaciona o rompimento da barragem, diretamente na forma como as águas e atividades a ela envolvidas foram afetadas, bem como os fatores ambientais, econômicos e sociais (saúde e direito).

Figura 12 – Matriz de danos socioambientais após o rompimento da barragem da Vale em Brumadinho



Fonte: Adaptada de Polignano e Lemos (2020).

3.3 Legislação de Segurança de Barragens

Nesse item será apresentado um panorama geral desde o início da legislação das águas e especificamente de barragens.

3.3.1 Evolução legislativa

Entendida a importância do tema para o desenvolvimento socioambiental, destaca-se o Decreto 24.643, de 10 de julho de 1934, intitulado como Código de Águas, o qual foi o marco inicial do estudo das legislações relacionadas às barragens.

O Código de Águas foi um marco para a época e, por isso, é essencial a compreensão do contexto social que ocorria ou se relacionava ao país. Ao redor do mundo acontecia a Primeira Guerra Mundial (1914-1919) e a quebra da bolsa de valores de Nova Iorque (1929), o que forçou uma modificação da matriz produtiva brasileira, pois esses episódios colocaram em evidência o fato da economia não se sustentar somente pela exportação de produtos primários. Porém, foi justamente o que sucedeu de 1933 a 1935 devido a transição do ciclo do café ao processo de industrialização (SILVA *et al.* 2020).

Anteriormente ao Código de Águas, a permissão à exploração das águas advindas de rios não navegáveis e não perenes estava associada ao direito de posse e uso da terra, dentro de um pensamento mais liberal do que a Constituição Federal de 1934. Esse fato se explica até o fim da Primeira República, isto é, antes do processo de industrialização, onde a água era considerada um recurso inesgotável e atividades econômicas se pautavam em sua disponibilidade. Assim, o Estado estava voltado a intuito de garantir o controle de rios navegáveis, visto como essenciais e estratégicos para adentrar no território e, posteriormente, realizar exploração e ocupação (SILVA *et al.* 2020).

A Constituição Federal de 1934 expôs, em seu texto, a respeito da separação entre o direito de propriedade sobre o solo e de outros recursos naturais, estabelecendo que as minas e demais riquezas do subsolo, além das quedas d'água, estruturam-se como propriedade diferente em comparação a do solo, para fins de exploração ou aproveitamento industrial (BRASIL, 1934a).

É importante ressaltar que a Constituição Federal de 1934 tinha como base princípios nacionalistas, centralizadores e intervencionistas fundamentados na proposta de desenvolvimento econômico da época e, então, priorizava o domínio estatal sobre aspectos tidos como estratégicos para o país.

Em seu Art. 119º, menciona-se a exploração das minas e águas: § 1º - As autorizações ou concessões serão entregues somente a brasileiros ou a empresas organizadas no país, priorizando o proprietário na exploração ou coparticipação nos lucros; § 2º - O aproveitamento de energia hidráulica, de potência reduzida, quando em uso exclusivo do proprietário, não depende de autorização ou concessão; § 3º - quando as condições postas em lei, incluindo as que possuírem os necessários serviços técnicos e administrativos, forem atendidas, os Estados exercerão, dentro dos territórios referentes, a encargo constante deste artigo; § 4º - A nacionalização progressiva das minas, jazidas minerais e quedas d'água ou demais fontes de energia hidráulica, que podem ser básicas ou essenciais, conforme determinação da defesa econômica ou militar do País, serão regulamentadas pela lei; § 5º - A União, diante das situações previstas na lei e considerando o interesse da coletividade, assessorará os Estados no estudo e aparelhamento das estâncias minero medicinais ou termo medicinais; e, § 6º - Independente de consentimento ou permissão o aproveitamento das quedas d'água já utilizadas industrialmente na data desta Constituição, e, diante desta mesma ressalva, o uso em demasia das minas em lavra, mesmo que temporariamente suspensa.

Já se deixava em ênfase a importância das grandes barragens, conforme apresentado no § 2º, assim como no § 4º é levantada a necessidade de regulamentação da nacionalização das águas e jazidas minerais, fazendo ser precisa a edição do Decreto 24.643/1934.

Verdadeiramente, o direito para explorar as águas, até a edição do Decreto 24.643/1934 era regido pelo Código Civil Brasileiro de 1916, que no Art. 526º diz que a propriedade do solo contempla a parte superior e inferior, em toda a altura e em toda a profundidade, indispensáveis ao seu desempenho, não podendo, porém, o proprietário ser contrário a trabalhos que consistam a uma altura ou profundidade tais, que ele não possua nenhum interesse em impedi-los.

Esse decreto tinha o objetivo de trazer a regulamentação das águas, mas sem ainda apresentar menção ao esgotamento sanitário. O seu intuito principal foi a indústria, pois visava a administração dos recursos hídricos regida pelo órgão do setor elétrico, trazendo um olhar limitado dos legisladores, em detrimento do potencial de aplicação das águas territoriais e alta demanda para a preservação desse recurso.

Com isso, o Código de Águas tinha como aspecto, disciplinar a utilização econômica da água como recurso natural, regulamentando a sua aplicação industrial e, especialmente, o aproveitamento e elevada utilização da energia hidráulica (BRASIL, 1934).

A relevância no mecanismo de aproveitamento industrial das águas é expressa na própria apresentação dos motivos que fundamentam a publicação do Código de Águas de 1934, ao considerar que se fazia necessário uma mudança no estado das coisas, fornecendo ao país uma legislação apropriada que, para tal tendência, deixará o poder público controlar e incentivar o aproveitamento industrial das águas (BRASIL, 1934).

O Código de Águas é dividido em duas partes: a primeira discorre sobre as águas de forma abrangente, bem como seu domínio; a segunda se refere ao aproveitamento dos potenciais hidráulicos e termina uma forma legal para geração, transmissão e distribuição e energia elétrica. No documento, as águas foram regulamentadas como riquezas naturais e matérias primas indispensáveis ao progresso econômico. A questão era que tanto a população quanto os governantes da época tinham em mente, de forma errada, que a água era um recurso infinito e inesgotável (SILVA, *et al.*, 2020).

Antecedente a promulgação da Constituição Federal de 1988, a Política Nacional do Meio Ambiente – PNMA entrou em vigor por meio da Lei nº 6938, de 31 de agosto de 1981. Pela primeira vez, começou-se a espalhar um pensamento consciente de que a água deveria ser analisada conjuntamente a outros aspectos que estivessem relacionados a ela. A partir disso, com essa integração entre a água e o meio ambiente, emerge um novo pensamento e,

junto a ele, surgiram outras preocupações, com olhar às questões ambientais e de aspecto mais expressivo (SILVA, *et al.*, 2020).

A PNMA expôs um panorama com uma visão integrada dos recursos, objetivando a preservação e recuperação do meio ambiente, a fim de promover o desenvolvimento sustentável. Do documento, o que de mais relevante se pode extrair são os seguintes instrumentos: Padrão de qualidade ambiental; Avaliação de impacto ambiental; Zoneamento ambiental; e, Licenciamento de atividades específicas ou potencialmente poluidoras.

Entretanto, não foram apenas os instrumentos que a PNMA instituiu, mas também o Sistema Nacional do Meio Ambiente – SISNAMA, buscando projetar o surgimento de órgãos nacionais, estaduais e municipais para realizar a gestão ambiental e o cumprimento das leis, findando por aproximar as pautas ambientais da estrutura administrativa de proteção, que, dentre outros, têm aspectos vinculados à segurança hídrica (SILVA *et al.*, 2020).

Na Constituição Federal de 1988 também se vê a preocupação com a proteção das águas, pois através dela teve origem o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SINGREH. Também, ficou determinado que os lagos, rios e quaisquer correntes de água presentes em terrenos do país, ou que banhem mais de um estado, ou que sejam utilizados como limites fronteiriços entre outros países, ou se prolonguem a território estrangeiro ou advenham dele, bem como os terrenos marginais e as praias fluviais, “o mar territorial” e os potenciais de energia hidráulica, são de domínio da União. Já as demais águas, quer sejam superficiais quer sejam subterrâneas, fluentes, emergentes e em depósito, são de domínio dos Estados. Os municípios, todavia, não têm, por conforme a própria Constituição Federal, dominialidade sobre as águas, fazendo com que a sua unidade básica de planejamento seja a Bacia Hidrográfica.

A Constituição Federal de 1988 destaca como um direito de todos, o meio ambiente ecologicamente equilibrado, sendo responsabilidade do Poder Público e da Sociedade Civil o compromisso de defender e preservá-lo às gerações atuais e futuras. Dessa forma, tanto a gestão, quanto a proteção e segurança hídricas são colocadas como requisitos para garantia de um meio ambiente ecologicamente equilibrado, enfatizando relevância e legislações ambientais específicas nessa perspectiva.

Anos depois, foi instituída a Política Nacional de Recursos Hídricos – PNRH, por meio da Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, que teve como objetivo geral e principal, organizar o setor e promover a integração do planejamento dos recursos hídricos com a gestão ambiental nos níveis regional, estadual e nacional. Com isso, a PNRH apoia institucionalmente a descentralização da gestão dos recursos hídricos, que foi idealizada

primeiramente na Constituição Federal de 1988, atrelando todos os níveis de atuação e legislação em um sistema maior.

Esse novo modelo da administração dos recursos hídricos é estruturado nos fundamentos presentes no Art. 1º, da Lei nº 9.433/1997, que são: I - a água é um direito de todos; II - a água é um recurso natural limitado, sendo provido de valor econômico; III - quando houver carência de água, a prioridade de uso dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais; IV - o uso múltiplo das águas deve ser uma das medidas previstas na gestão dos recursos hídricos; V - a bacia hidrográfica é a unidade territorial de planejamento, onde deve acontecer a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos; e, VI - a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e ter a colaboração do Poder Público, dos usuários e das comunidades.

Tendo em vista que um curso d'água pode passar por diversos municípios e até mesmo por estados, foi colocada a bacia hidrográfica como sendo a unidade básica de planejamento e gestão dos recursos hídricos, caracterizando-se como um dos avanços da PNRH. Um dos maiores aspectos desse sistema é a descentralização, o qual seu fundamento é a gestão integrada do potencial nacional, que tem por objetivo determinar meios que busquem preservar a regulamentação dos recursos hídricos, moldando um sistema integrado do cenário nacional com as situações atuais dos estados e bacias hidrográficas.

Com a mesma ideia de progresso, por meio da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, criou-se a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA, sendo considerado um marco na estruturação administrativa que envolve a exploração e fiscalização dos recursos hídricos. A ANA é uma entidade federal de implementação da PNRH, integrante do SINGREH e incumbida pela instituição de normas de referência para a regulação dos serviços públicos de saneamento básico (BRASIL, 2000).

Dentre os tantos objetivos, fundamentos, diretrizes e instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos que a ANA deve seguir, pertencentes ao Art. 4º, os mais associados a segurança de barragens são: X - planejar e promover atividades voltadas a precaver ou diminuir os impactos de secas e inundações, diante do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, juntamente com o órgão central do Sistema Nacional de Defesa Civil, com suporte aos Estados e Municípios; XII - determinar e supervisionar a operação de reservatórios através de agentes públicos e privados, com o objetivo de assegurar o uso múltiplo dos recursos hídricos, de acordo como está posto nos planos de recursos hídricos das bacias hidrográficas concernentes; XX - organizar, introduzir e gerir o Sistema

Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (Incluído pela Lei nº 12.334/2010); e, XXI - proporcionar o vínculo entre os órgãos fiscalizadores de barragens (Incluído pela Lei nº 12.334/2010); XXII - coordenar a criação do Relatório de Segurança de Barragens e conduzi-lo, anualmente, ao Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH, de modo contínuo (Incluído pela Lei nº 12.334/2010).

Para as atividades definidas à ANA, segundo a lei, tem-se que a sua criação viabilizou a conquista dos objetivos delimitados nos termos de usos dos recursos hídricos, essencialmente ao que foi estabelecido no Programa Nacional de Recursos Hídricos. Assim, é notória a importância na evolução que a sociedade passou desde a criação desse órgão, principalmente no reconhecimento da relevância da água, tanto quanto ao seu uso, quanto a recuperação e preservação, fazendo com que a ANA seja detentora de proteção aos recursos hídricos em todos os aspectos administrativos (SILVA *et al.*, 2020).

Diante das atribuições da ANA, vale destacar o tema de segurança de barragens, notadamente na criação do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens – SNISB, na articulação dos órgãos fiscalizadores e na produção dos Relatórios de Segurança de Barragens, buscando um planejamento para a segurança dessas estruturas.

Essas normas e instrumentos adquiriram força e maior poder de realização através da Política Nacional de Segurança de Barragens, criada pela Lei Federal nº 12.334/2010, que terão seus aspectos fundamentais analisados.

3.3.2 Aspectos gerais da Política Nacional de Segurança de Barragens

A Agência Nacional de Mineração – ANM (2022) relata que a legislação brasileira de segurança de barragem teve sua origem ainda no final da década de 70, mostrando uma lenta evolução nas décadas de 80 e 90, até a proposição do PL nº 1.181/2003, que daria suporte a criação da Lei nº 12.334/2010, depois de anos aguardando a finalização de discussões na Câmara.

A Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, fez o tema ter maior notoriedade, pois implantou a Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB, o Sistema de Classificação de Barragens de acordo com o Risco – CRI e Dano Potencial Associado – DPA, além de ter criado o Plano de Segurança de Barragens – PSB, o Sistema de Informações Sobre Segurança de Barragens – SNISB, o Sistema Nacional de Informações sobre o Meio Ambiente – SINIMA e o Relatório de Segurança de Barragens (ANM, 2022). A referida lei não citava diretamente em seu texto a mancha de inundação decorrente do rompimento de barragem,

embora tenha posto regras ao CRI e DPA. É a primeira regulamentação no sistema jurídico pátrio que aborda, especificamente, sobre segurança de barragens, assim como também inova em outros aspectos.

Salienta-se que o motivo de existir a PNSB está na prevenção de acidentes, regulamentando padrões de segurança, com o intuito de garantir a integridade estrutural e operacional, bem como a cuidado com a vida, saúde, propriedade e meio ambiente. Essa preocupação se explica por meio da dispersão de direitos a serem resguardados pelo Estado e que são, de modo direto, impactados nos casos de acidentes (SILVA *et al.*, 2020).

A Lei nº 12.344/2010 se refere a todos os tipos de barragem, quer seja de uso temporário ou permanente, quer seja para acúmulo de desejos, produção de energia ou represamento de água para abastecimento, mas desde que a barragem detenha de altura do maciço, isto é, do ponto mais baixo da construção até a crista, de 15m ou mais, além de que a capacidade deve ser igual ou maior a 3.000.000m³.

Este é um ponto importante a ser mencionando sobre a PNSB, pois a definição do ICOLD (2010) descreve que barragens de acumulação de água com altura inferior a 15m e capacidade de reservatório com volume abaixo de 3.000.000m³ são classificadas como pequenas, e se não forem classificadas quanto a categoria de Dano Potencial Associado como sendo Alto ou Médio, então não estarão compreendidas na PNSB; dessa forma, a sua fiscalização não é obrigatória.

Entretanto, barragens de pequeno porte são construídas principalmente em pequenas propriedades rurais, na maior parte dos casos sem projeto adequado e sem outorga necessária expedida pelo órgão responsável. Também, elas podem sofrer com problemas graves, os quais deveriam ser incluídos em legislações próprias, abrangendo os recursos hídricos e responsabilidades ambientais, englobando os pequenos barramentos, atentando as suas especificidades.

Outro aspecto da Política Nacional de Segurança de Barragens é a forma como se estrutura a responsabilidade direta sobre quem tem os direitos reais da construção ou exploração de uma barragem. Ao responsável, que pode ser Pessoa Física ou Jurídica, governamental ou particular, a lei o chama de Empreendedor. A PNSB traz outro diferencial ao colocar igual responsabilidade e nomeação legal àquele que explorar a barragem, em uso particular ou coletivo, por mais que não seja o proprietário.

A incumbência destas responsabilidades coloca certos deveres sobre o empreendedor, buscando garantir a segurança hídrica dos que foram impactados diretamente por causa da operação da barragem, assim como dos que seriam atingidos caso viesse a haver

um acidente. Os deveres direcionados ao empreendedor se colocam como instrumento crucial à segurança e fiscalização de todas as partes, até mesmo do próprio empreendedor, já que ele responde civil, administrativa e criminalmente pelo que ocorrer com a barragem.

Dessa forma, o empreendedor fica encarregado de elaborar o Plano de Segurança de Barragem, em que este dá apoio a gestão de segurança de barragem, além de promover a segurança jurídica necessária a qualquer atividade econômica, já que referido plano depende de aprovação estatal.

O PSB deve possuir os dados técnicos da barragem, ampla perspectiva da segurança atual da barragem, identificação dos responsáveis pelas diferentes medidas de operação e manutenção, que estão elencadas na PNSB, e servirão para orientar as atividades de inspeção do órgão responsável. O prazo máximo para elaboração do PSB é o início da operação da barragem, tendo que estar acessível para utilização por toda equipe técnica de segurança (CBGB - NRSP; 1999).

A respeito das inspeções de segurança, a lei apresenta dois tipos: inspeção regular – feita pela própria equipe de segurança da barragem, com o relatório a disposição do órgão fiscalizador e da sociedade; inspeção especial – elaborada por uma equipe multidisciplinar conforme a categoria de risco da barragem e os danos a ela agregados, guiando o empreendedor a tomar a postura adequada diante a manutenção da barragem.

Ainda se tratando de inovação, a Lei de Segurança de Barragens traz a obrigatoriedade do Plano de Ação de Emergência. A lei delegou ao órgão fiscalizador a competência para instituir a obrigatoriedade ou não desse plano, segundo a classificação de risco da barragem, colocando-o como aspecto imprescindível a todas as barragens com classificação de alto dano potencial.

Quando se fizer necessário o PAE, isto é, em situações emergenciais, ações a serem executadas pelo empreendedor da barragem serão estabelecidas, além de serem identificados os agentes a vierem a ser notificados devido a ocorrência. Segundo o Art. 12º, da PNSB, o conteúdo mínimo que o PAE deve possuir é: I - caracterização e estudo das possíveis situações de emergência; II - maneiras para determinação e aviso de problema no funcionamento ou de condições potenciais de rompimento da barragem; III - formas preventivas e disciplina a serem utilizadas em casos de emergenciais, com designação do responsável pela ação; IV - estratégia e modos de divulgação e alerta às populações mais atingidas em situação de emergência (BRASIL, 2010).

Também, o marco regulatório traz outra obrigação, que é a de ter disponível o PAE no empreendimento e nas prefeituras envolvidas, assim como seu direcionamento para as

autoridades correspondentes e a defesa civil, visando trazer o amplo conhecimento e execução nas situações emergenciais.

Logo, é importante destacar que, para cada atuação ou âmbito, a barragem precisa seguir regras específicas. Tem-se as seguintes situações (SILVA *et al.*, 2020):

- caso a barragem tenha a finalidade de represar água em um certo rio da União, terá que ser supervisionada e obedecer às regras definidas pela ANA; se o rio for estadual, o órgão estadual designado para tanto fica como seu responsável;
- em uma barragem como a finalidade de produzir energia, deverá ser seguida a regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL;
- barragens designadas ao uso de mineradoras, obedecerão as regras do Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM. Os respectivos órgãos terão o papel de definir os critérios para classificar a barragem quanto ao risco, bem como fiscalizar e colocar a obrigatoriedade do PAE.

Silva *et al.* (2020) destaca que este documento estabelece adicionalmente, a obrigatoriedade de um programa de educação e de comunicação sobre segurança de barragens, buscando elucidar a população, possivelmente atingida por acidentes, a respeito dos benefícios que a segurança de barragens pode proporcionar, proporcionando uma gama de ações positivas para se conseguir essa meta e a disponibilização anual do Relatório de Segurança de Barragens.

No ano de 2017, a ANA, por meio da Resolução nº 236, estabeleceu 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. Esta resolução, assim como a Lei Federal nº 12.334/2010, colocou entre os itens básicos do PSB a classificação da barragem quanto ao dano potencial associado, delimitando duas classes de barragens (Classes A e B, conforme Matriz de Classificação do Anexo I da resolução), sendo necessário preparar o documento de Planos de Ações de Emergência – PAE que incluía, entre outros itens, uma síntese do estudo de inundação oriunda do rompimento da barragem.

Após os grandes acidentes ocorridos com barragens na última década, e um ano depois do rompimento da Barragem do Córrego do Feijão, em Brumadinho – MG, ocorrido em 2019, a Lei nº 12.334/2010 que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens foi alterada, através da Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020, conhecida como a Nova PNSB, mudando alguns artigos e criando outros. Com as novas mudanças, foi adicionado como item básico do PSB, a exigência do mapa de inundação, contendo uma ampla análise de possíveis cenários de áreas que podem vir a serem afetadas se houver vazamento ou ruptura

da barragem, e a consideração do pior entre os cenários identificados. Todavia, a lei ainda não descreve o quão detalhado deve ser o PSB e segue colocando essa incumbência ao órgão fiscalizador (SILVA, 2021).

3.4 Modelagem de Sistemas Hídricos

Os Modelos de Sistemas Hídricos podem ser subdivididos em hidrológicos e hidrodinâmicos. Os modelos hidrológicos têm o objetivo de analisar o comportamento de uma bacia hidrográfica e são aplicados quando se precisa obter a vazão, sem interesse nas características hidráulicas do escoamento. Os modelos hidrodinâmicos, por sua vez, levam em consideração estas características, propiciando a análise de situações como o nível d'água ou vazão influenciada pelo remanso (NEVEZ, 2019).

3.4.1 Modelos Hidrodinâmicos

Os modelos hidráulicos, quanto a sua dinâmica temporal, possuem duas classificações: *regime permanente*, caso as partículas que se sucedam diante de um mesmo ponto, tenham, nele, as mesmas velocidades e massas específicas, além de estarem sujeitas a pressões iguais; e, *não permanente (transitório)*, quando, no decurso de tempo, a velocidade e vazão variam, para uma seção transversal (AZEVEDO NETTO & FERNÁNDEZ, 2018).

O escoamento permanente, onde as características hidráulicas em cada seção não dependem do tempo, pode ser uniforme ou variado. No *escoamento permanente uniforme* as características não mudam de uma seção para outra, no percurso longitudinal do canal, isto, seu trecho é uniforme, com a profundidade e velocidade constante; e, *escoamento permanente variado*, quando elas variarem de seção para seção através do canal (AZEVEDO NETTO & FERNÁNDEZ, 2018).

Quando as características do escoamento permanente variado variam lentamente, gradual, tem-se que o escoamento é do tipo *gradualmente variado*. Já quando as características desse escoamento variam de forma brusca, repentina, tem-se que ele é *bruscamente variado* (CIRILO *et al.* 2014).

O escoamento permanente e uniforme possui a velocidade média do escoamento constante, ou com pequena variação, no espaço e no tempo. Também, ainda que o esse tipo de escoamento corresponda a um caso específico que dificilmente se observa na natureza, esta

hipótese de funcionamento hidráulico é comumente utilizada em cálculos práticos para dimensionamento de canais (CIRILO *et al.*, 2014; CARVALHO, 2021).

No regime não permanente, suas características mudam de ponto para ponto e, também, variam de instante em instante, ou seja, estão em função do tempo. Esse tipo de regime é o mais abundante em estruturas hidráulicas e, a rigor, o único que ocorre em rios e riachos naturais. Como exemplo, tem-se que durante as enchentes acontece o movimento não permanente, uma vez que a vazão muda. Além disso, destaca-se que o regime não permanente uniforme não pode ser encontrado na natureza (CAMPOS, 2009; AZEVEDO NETTO & FERNÁNDEZ, 2018; NEVEZ, 2019).

Segundo Cirilo *et al.* (2014), em detrimento da variabilidade espacial, a análise do escoamento variado é mais complexa do que a análise do escoamento uniforme. Assim, a respeito do escoamento bruscamente variado, os fatores físicos se exibem de modo distinto, originando uma influência mais considerável das condições de contorno, por causa do atrito, aspecto determinantes no escoamento uniforme e gradualmente variado.

De acordo com Lopes (2017), os modelos hidráulicos podem ser unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais. Sabendo que a dimensão predominante dos rios é a longitudinal, trivialmente se aplicam os métodos unidimensionais (1D), pois possibilitam descrever boa parte dos sistemas a serem modelados.

O movimento de fluidos em três dimensões é explicado por meio das equações diferenciais parciais da continuidade (conhecida como Conservação de Massa) e da quantidade de movimento (conhecida como Conservação do Momento) de Navier-Stokes (NEVEZ, 2019). Uma situação particular dessas equações são as Equações de Águas Rasas, desenvolvidas através nas seguintes simplificações:

- I) Fluxo incompressível;
- II) Densidade uniforme;
- III) Pressão hidrostática;
- IV) Dimensão horizontal é muito maior que a dimensão vertical;
- V) Equações médias de Reynolds (Viscosidade turbulenta - Eddy viscosity);
- VI) Ausência da força do vento.

Quando em duas dimensões, as equações de Águas Rasas são conforme apresentadas pela equação da continuidade (Equação 1) e as equações da quantidade de movimento (Equações 2 e 3).

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u \quad (3)$$

Em que,

H – elevação da superfície da água que é igual à elevação da superfície do terreno mais a altura da lâmina de água (m);

t – variável independente relativa ao tempo (s);

h – altura da lâmina de água (m);

u e v – são as componentes da velocidade nas direções x e y , respectivamente ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);

x e y – direções cartesianas (m);

q – fluxo de entrada/saída ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$);

g – aceleração da gravidade ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$);

ν_t – coeficiente de viscosidade turbulenta horizontal ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$);

c_f – perda de carga unitária por atrito (s^{-1});

f – parâmetro de Coriolis (s^{-1}).

Uma maneira diferente de representar a Equação 1 é no formato vetorial, como pode ser visto na Equação 4 abaixo.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot hV + q = 0 \quad (4)$$

Em que,

$V(u, v)$ – vetor velocidade;

$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$ – vetor operador de derivadas parciais.

Observa-se as Equações 2 e 3 que no primeiro membro estão os termos da aceleração e no segundo membro estão às forças internas e externas que agem no fluido. Assim como a Equação 1, essas duas equações também podem ser apresentadas na forma vetorial, com única equação para elas, deixando-as mais compacta (Equação 5).

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V = -g\nabla H + \nu_t \nabla^2 V - c_f V + f k \times V \quad (5)$$

Em que,

k – vetor unitário na direção vertical.

Cada um dos termos presentes na Equação 5 contém um significado físico. Analisando-se do termo mais à esquerda para o mais a direita, observa-se: aceleração local; aceleração advectiva; gradiente de pressão; difusão devido à turbulência (Eddy diffusion); atrito; e, termo de Coriolis.

Além disso, através das equações de Águas Rasas, outras duas equações bastante empregadas em modelos hidráulicos são obtidas partindo da análise dos termos contidos na Equação 5.

A primeira delas é adquirida quando os termos dominantes da Equação 5 estão como gradiente de pressão e atrito, podendo negligenciar os demais. Aceitando essa simplificação e aplicando a equação de Chézy com o Coeficiente de Manning para obter o coeficiente de atrito, dá-se origem as equações bidimensionais da onda de difusão, que no formato vetorial (Equação 6).

$$V = \frac{-(R(H))^{2/3}}{n} \frac{\nabla H}{|\nabla H|^{1/2}} \quad (6)$$

Em que,

R – Raio hidráulico (m);

n – Coeficiente de Manning.

Substituindo a Equação 6 diretamente na equação da continuidade, Equação 4, tem-se como resultado a forma diferencial clássica do modelo conhecido como Equações de Onda Difusa de Águas Rasas, como mostra a Equação 7.

$$\frac{\partial H}{\partial t} - \nabla \cdot \beta \nabla H + q = 0 \quad (7)$$

Sendo que,

$$\beta = \frac{(R(H))^{5/3}}{n|\nabla H|^{1/2}} \quad (8)$$

A segunda equação originada através das equações de Águas Rasas se refere a sua versão unidimensional. Com isso, essas equações são intituladas como Equações de Saint-Venant (conhecidas como equações da onda dinâmica), apresentadas por meio Equações 9 e 10.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = ql \quad (9)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAc_f = 0 \quad (10)$$

Em que,

A – área molhada (m^2);

Q – vazão na seção transversal (m^3);

ql - fluxo de entrada lateral por unidade de comprimento ($m^3.m^{-1}$).

As Equações 9 e 10 correspondem, respectivamente, as equações de Saint-Venant da continuidade e da quantidade de movimento. Há outras maneiras de apresentar a Equação 10, em função das variáveis vazão (Q) e elevação da superfície da água (H).

Em função da vazão (Q) e da altura da lâmina de água (h):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gAS_0 - gAc_f \quad (11)$$

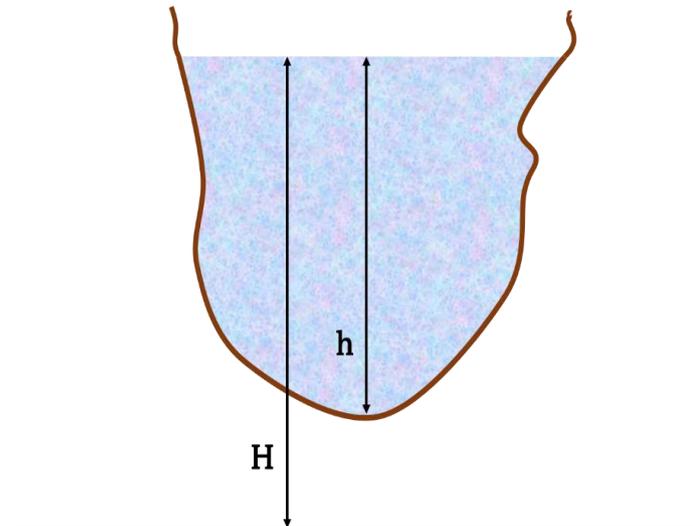
Em função da velocidade (u) e da altura da lâmina de água (h):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_0 - c_f) \quad (12)$$

S_0 – inclinação do eixo longitudinal do fundo do rio.

A explicação ilustrativa da distinção entre variáveis utilizadas nas equações supracitadas, é mostrada na Figura 13, sendo elas: elevação da superfície da água (H); e, a altura da lâmina de água (h).

Figura 13 – Seção transversal de um rio



Fonte: O Autor (2023).

Observando os termos da equação da quantidade de movimento de Saint-Venant, constata-se que eles possuem diferentes ordens de grandeza e que, normalmente, a declividade longitudinal do fundo e a declividade da linha de atrito demonstram maior relevância em relação aos outros (SZYMKIEWICZ, 2010).

3.4.2 Programa de Modelagem Hidrodinâmica HEC-HAS

Impulsionado pela evolução nas abordagens e aplicações no decorrer dos anos, diversos programas computacionais de modelagem surgiram. A Quadro 1 apresenta alguns modelos hidrodinâmicos existentes.

Quadro 1 – Alguns programas de modelagem hidrodinâmica

Tipo	Modelos
Programas de Modelagem Hidrodinâmica 1D	TUFLOW Classic 1D, FASTER, Flood Modeller Pro 1D Solvers, SOBEK Suite, MIKE11/MIKE HYDRO River, MASCARET, InfoWorks RS, SIPSON, HEC-RAS
Programas de Modelagem Hidrodinâmica 2D	Flowroute-i, ANUGA Hydro, TUFLOW Classic 2D, TUFLOW GPU, TUFLOW FV, DIVAST, DIVAST-TVD, Flood Modeller Pro 2D solvers, SOBEK Suite, DELFT3D, MIKE21, TELEMAC 2D, InfoWorks 2D, JFLOW, TRENT, FINEL 2D, CaMa-Flood, LISFLOOD-FP, BreZo, UIM, XP2D, HEC-RAS
Programas de Modelagem Hidrodinâmica 1D + 2D	TUFLOW Classic, Flood Modeller Pro, SOBEK Suite, MIKE Flood, InfoWorks ICM, TRENT, LISFLOOD-FP, UIM + SIPSON, XPSWMM, XPSTORM, HEC-RAS
Programas de modelagem Hidrodinâmica 3D	TUFLOW FV, SPM, DELFT3D, MIKE 3, TELEMAC 3D, FINEL 3D, CFX, Fluent, Bifrost, Blender, PHEONIX, FD, Navié, Effex, Flip3D, Cinema 4D, RealFlow, Psunami, Houdini, Mantaflow, SisBaHiA

Fonte: Adaptado de Teng *et al.* (2017) e Gayathri, Ganasri e Dwarakish (2015).

O programa de modelagem hidrodinâmica HEC-RAS foi o programa utilizado nesta pesquisa e, portanto, será apresentado e analisado com maiores detalhes.

O termo HEC (*Hydrologic Engineering Center*) se remete a uma família de modelos que a princípio foram aperfeiçoados fazendo uso da linguagem de programação Fortran. Antes, esses modelos eram limitados pela complexidade nas entradas de dados e os problemas em recursos gráficos. Com o desenvolvimento dos recursos computacionais e aparecimento de novas linguagens de programação, os modelos foram evoluindo nas entradas de dados e na criação dos relatórios de saída (NEVEZ, 2019).

O HEC-RAS foi um *software* desenvolvido pelo *US Army Corps of Engineers* (Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América) entre décadas de 1950 e 1960 *a priori* foi nomeado como HEC 2. Atualmente esse modelo possui recursos muito atrativos, contemplando a enorme vantagem de ser de domínio público, fazendo com que seja bastante aplicado e analisado ao redor do mundo.

Segundo a ANA (2020, p.19), “o HEC-RAS (HEC – *Hydrologic Engineering Center* e RAS – *River Analysis System*) é um modelo aplicado à simulação de perfis de linha de água em rios e reservatórios”. Nele, é possível fazer modelagens unidimensionais em regimes de escoamento permanente e não permanente, transporte de sedimentos e fundo móvel e temperatura da água.

O HEC-RAS resolve as equações de Saint-Venant completas, empregando o método de diferenças finitas, o qual admite simular o escoamento em superfície livre em regime permanente e em regime variável. Utiliza-se como lei de resistência a Equação de Manning-Strickler e a seção transversal de escoamento considera uma seção composta, em que o canal é determinado por meio dos dados topográficos interpolados através da criação de um modelo digital de terreno, e demarcado pelas alturas calculadas no sistema (REIS & SCHMIDT, 2017).

O *software* em questão na sua versão 6.0.0 é gratuito, possibilitando realizar cálculos hidráulicos em 1D, 2D e acoplado 1D/2D, com regime de escoamento permanente, quase não permanente e não-permanente. Além disso, o modelo viabiliza estudos sobre a qualidade da água, o transporte de sedimentos, e análise do efeito de estações de bombeamento, assim como também de estruturas transversais e/ou laterais ao fluxo, como açudes, barragens, vertedouros, comportas, diques, pontes e bueiros (NEVEZ, 2019).

A geração das informações geométricos de entrada do HEC-RAS podem ser como linhas de centro, fluxo, canal, secção transversal, uso do solo, dique, áreas ineficazes e áreas de armazenamento. A respeito do mapeamento das áreas inundáveis, tem que se dá através

dos resultados adquiridos pelas simulações hidráulicas no programa e o traçado da área de inundação é feito fazendo uso das alturas d'água, como produto das análises hidráulicas, nas seções transversais. As informações intrínsecas às condições de contorno e fluxos são estabelecidas no próprio programa, sendo que os parâmetros de declividade, escoamento, profundidade e vazão de projeto são inseridos segundo com cada situação. Os fluxos são frequentemente determinados no local mais a montante de cada rio ou afluente, e em junções, sabendo que cada fluxo é um perfil distinto no programa. A análise continua onde há o regime subcrítico definido, no qual deve ser selecionado pelo usuário para os critérios hidráulicos (REIS & SCHMIDT, 2017).

3.5 Sistema de Informação Geográfica – SIG

Os Sistemas de Informações Geográficas – SIG são ferramentas poderosas na gestão e produção de informações espaciais, nas quais têm como elemento principal o dado espacial ou geográfico. Além disso, a respeito de sua contribuição ao cotidiano, sabendo que todas as ações das pessoas acontecem em algum lugar, isto é possível de ser localizado utilizando coordenadas geográficas.

De acordo com Longley *et al.* (2011), um SIG contém seis elementos fundamentais:

- I) Rede: para comunicação veloz e/ou compartilhamento de informação digital;
- II) Hardware: a máquina que integra o SIG ao usuário (pode ser um computador de mesa, um laptop, um celular, um tablet, ou qualquer outro dispositivo do tipo);
- III) Software: o programa ou pacote de serviços instalado no dispositivo do usuário e que possibilita a manipulação da informação;
- IV) Banco de dados: conjunto de informação espaciais construído para determinado fim;
- V) Gerenciamento: procedimentos que garantam que o SIG atinja seus objetivos iniciais mantendo a alta qualidade dos resultados;
- VI) Pessoas: o SIG precisa de um indivíduo para o conceber, programar, o alimentar de dados e interpretar as informações geradas pelo sistema.

Nevez (2019) relata que os autores Goodchild, Haining e Wise (1992) identificaram três funções primordiais na ferramenta SIG para o processo de modelagem: Pré-processamento de dados espaciais, em que o SIG é empregado visando a geração de informações espaciais de entrada dos modelos; Suporte direto na modelagem, no qual as

tarefas são realizadas diretamente dentro do SIG, como adequações e verificações; e, Pós-processamento, onde os resultados do modelo são trabalhados e analisados dentro do SIG no seu contexto espacial.

Os SIGs e os modelos podem ser caracterizados em três níveis de acoplamento, com estratégias de integração distintas. O acoplamento de SIGs com modelos hidrológicos possibilita a uso de informações espaciais e garante a interpretação dos resultados de simulações no contexto geográfico. Esses níveis de acoplamento podem ser: acoplamentos livres, no qual não vinculado ao SIG, sendo usado somente para pré, pós-processamento e visualização de feições espaciais e/ou resultados; acoplamento próximos/rígidos, onde funciona vinculado ao SIG, com todas as funções de geração, processamento e visualização sendo realizadas por meio do SIG; e, acoplamento plena, sendo caracterizado pelas equações do modelo que são programadas dentro do código do próprio SIG, ou uma estrutura de SIG é programada dentro do próprio modelo (NYERGES, 1991; NEVEZ, 2019).

Existem vários os *softwares* disponíveis e já consolidados no mercado, onde alguns são gratuitos e de código aberto, como o QGIS, o SPRING e o PostgreSQL, e outros, a maior parte, advém dos vendedores comerciais de SIG, como Autodesk Inc., Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI), Intergraph Corp., MapInfo Corp, Oracle. Também, alguns são comercializados por instituições acadêmicas, como o Idrisi (RIBEIRO, 2018).

O QGIS, por exemplo, incorpora o SIG para sua aplicação. A ferramenta é um projeto oficial da *Open Source Geospatial Foundation* – OSGeo, impulsionado por voluntários; constitui uma interface agradável e fácil manuseio, além de apresentar as vantagens de ser livre e possuir o código aberto. As suas funcionalidades estão em evolução contínua, por meio de funções nativas e de complementos (QGIS, 2022).

3.6 Perfilamento a LASER

O Perfilamento a Laser é uma tecnologia que permite a aquisição de informações altimétricas de uma determinada área, favorecendo o reconhecimento de volumes que se projetam sobre a superfície, como, por exemplo, edificações, vegetação, torres, linhas de transmissão. Este sistema de sensoriamento remoto ativo utiliza plataformas aéreas para conseguir os dados referentes às alturas dos objetos e da superfície do terreno, aplicando feixes de LASER – *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiance* (FALAT, 2017).

Segundo Brandalize (2018), os equipamentos e programas que constituem um Sistema de Perfilamento a LASER podem ser de dois tipos: componentes que estão a bordo de uma

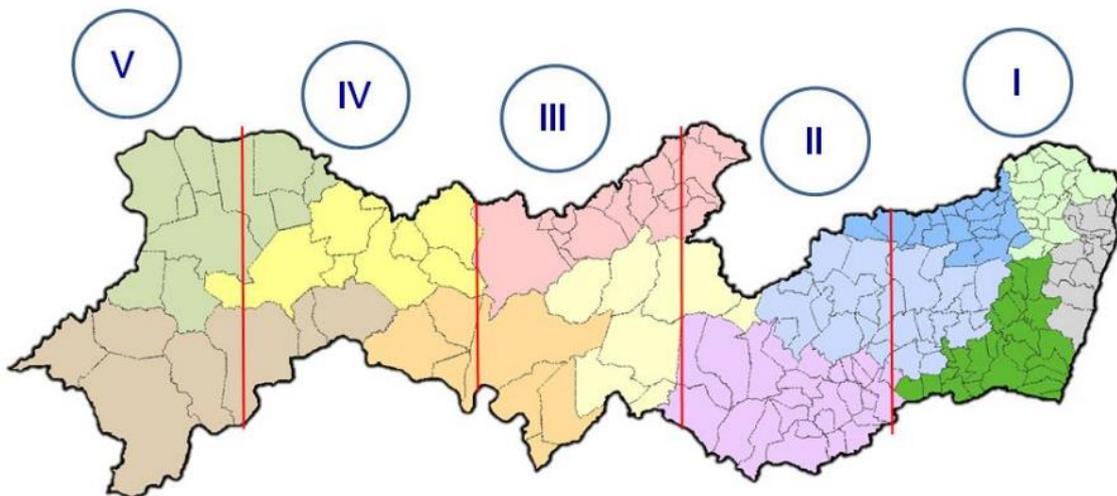
aeronave; e, estão no terreno em tempo real de execução do levantamento ou para pós-processamento.

O resultado do perfilamento a laser é uma nuvem de pontos cotados, espalhados aleatoriamente sobre o terreno. Além disso, consegue-se transformar a nuvem de pontos em Redes Triangulares Irregulares – TIN, no qual os pontos se tornam vértices de um triângulo, ou através de métodos de interpolação, os quais se transformam em grades regulares de pontos. Quando a transformação ocorre considerando todos os pontos obtidos no mapeamento, contemplando vegetação, edificações, pontes, barragens ou linhas de transmissão, tem-se como produto o chamado Modelo Digital de Elevação – MDE. Porém, quando a nuvem de pontos é filtrada, por meio de algoritmos e adequações manuais, para remoção destes elementos sobre a superfície do terreno, tem-se o chamado Modelo Digital de Terreno – MDT, à interpolação dos pontos filtrados (BRANDALIZE, 2018).

No estado de Pernambuco há o Programa Pernambuco Tridimensional – PE3D, que teve início em 2014 e consiste no recobrimento do território pernambucano através de aerofotogrametria e perfilamento a laser. Todo o território estadual foi mapeado e possui dados de MDE, MDT e Ortoimagem. Esses dados são bases para elaboração e atualização de demais produtos cartográficos, como o banco de dados geoespaciais e carta topográfica (CIRILO *et al.*, 2014b; LIMA *et al.*, 2018).

O território do Estado de Pernambuco foi subdividido em 12.962 folhas articuladas, por conseguinte, foram agrupadas em cinco blocos, conforme a Figura 14. Para cada uma das articulações há um conjunto de produtos produzidos por recobrimento aerofotogramétrico na escala 1:5.000 e outro por varredura a laser utilizando a tecnologia LiDAR.

Figura 14 – Divisão do Estado de Pernambuco em 5 blocos de mapeamento



Fonte: Cirilo *et al.* (2014b).

A base de dados que cobre a área possui 50 bilhões de pontos com coordenadas planas e altitudes conhecidas. A escala de 1:5000 recobre todo o estado, enquanto os levantamentos compatíveis com a escala 1:1000 estão contemplam apenas as principais sedes municipais de Pernambuco (CIRILO *et al.*, 2018). Algumas especificações dos produtos na escala 1:5.000 e 1:1.000 são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Especificações técnicas dos produtos do PE3D

Especificações	Escala 1:5000		Escala 1:1000	
	Ortofoto	Perfilamento a laser	Ortofoto	Perfilamento a laser
Extensão dos arquivos	.tif .tiff e .dwg	.xyz .xyzi e .tif	.tif .tiff e .dwg	.xyz .xyzi e .tif
Densidade de pontos	-	~ 1 ponto/m ²	-	~ 4 pontos/m ²
Resolução espacial	50 cm	1 m	12 cm	50 cm
Resolução radiométrica	8 bits	32 bits	8 bits	32 bits
Precisão planimétrica	~ 1 m	-	~ 25 cm	-
Precisão altimétrica*	-	25 cm	-	10 cm
Altura média de voo	4.800 m	2.800 m	700 m	700 m

Fonte: Adaptada de Alves (2017).

*A precisão altimétrica dos produtos 1:5000 tem como referência o MAPGEO 2010, enquanto os produtos 1:1000 são referenciados segundo Referências de Nível (RN's) do IBGE.

Segundo Alves (2017), os produtos do Pernambuco Tridimensional estão referenciados no sistema de coordenadas projetadas SIRGAS 2000, nos fusos 24S ou 25S. Para cada uma das folhas do PE3D serão fornecido um conjunto de seis produtos:

- I) ORTOFOTOS – Ortofotos digitais articuladas e disponibilizadas em formato GeoTIFF, com arquivo em formato CAD configurado para impressão em tamanho A1;
- II) MDE (ASCII) – Modelo Digital de Elevação apresentado em formato XYZI, com as coordenadas de todos os pontos coletados pelo laser e a intensidade de retorno do pulso laser, incluindo áreas com elevações como vegetação, edifícios, pontes;
- III) MDE (RASTER) – Modelo Digital de Elevação obtido através do MDE ASCII, apresentado em formato GeoTIFF e arquivo auxiliar TFW, com resolução espacial de 1m;

- IV) MDT (ASCII) – Modelo Digital de Elevação apresentado em formato XYZ, com as coordenadas de todos os pontos coletados pelo laser, excluindo áreas com elevações como vegetação, edifícios, pontes;
- V) MDT (RASTER) – Modelo Digital de Terreno obtido através do MDT ASCII, apresentado em formato GeoTIFF e arquivo auxiliar TFW, com resolução espacial de 1m;
- VI) MDE COMPOSIÇÃO – Imagem de composição das informações hipsométricas e intensidade de retorno do pulso laser com resolução espacial de 1m. Produto apresentado em formato GeoTIFF, arquivo auxiliar TFW e escala hipsométrica em formato PNG.

3.7 Mapas de perigo de inundação

Normalmente, o risco é definido em função do perigo e da vulnerabilidade. Dessa forma, o risco representa a fragilidade de uma comunidade sofrer danos ou perdas em decorrência a um perigo (MONTEIRO & KOBAYAMA, 2013).

Muitos são os fatores que causam o perigo e, conseqüentemente, o risco. Desastres e riscos naturais, por exemplo, variam sua magnitude de acordo com a dinâmica dos sistemas ambientais, sociais e mútuas relações entre eles.

Tratando das inundações, observa-se que todo o anseio da sociedade evoluir, acarreta o seu próprio crescimento populacional e seu conseqüente desenvolvimento urbano para se adequar. Com isso, a urbanização traz consigo seus problemas quando não se tem um planejamento adequado. Principalmente nas grandes cidades há situações com cheias, que finda por prejudicar uma elevada quantidade de pessoas.

Os mapas de perigo de inundação surgem como uma ferramenta de prevenção a eventos hidrológicos. Para rompimentos de barragens, por exemplo, com a Lei nº 14.066/2020 passou a ser obrigatório o mapa de perigo de inundação no PAE.

Atualmente, o uso de Sistemas de Informação Geográfica é muito utilizado em trabalhos com o objetivo de gear mapeamento. Os SIGs são excelentes meios para mapear áreas de risco e áreas vulneráveis à impactos ambientais, uma vez que permitem espacializar e analisar os dados geográficos (PILGER, 2020).

3.8 Segurança de barragens

É importante tratar a respeito da segurança dos barramentos, exibindo os fatores que abrange essa temática. Destaca-se que esse assunto ganhou um forte impulso a partir da década de 80, motivado pela proliferação de grandes barragens, ao redor do mundo.

3.8.1 Panorama geral sobre a segurança de barragens

A necessidade da segurança em barragens decorre do fato destas estruturas oferecerem riscos. Os benefícios à segurança são inúmeros ao adotar programas de inspeções regulares, mesmo em pequenas barragens, como: capacidade de reconhecer problemas em estágios iniciais e eliminá-los antes de se tornarem complexos e diminuir riscos de perda de vida e bens materiais a jusante.

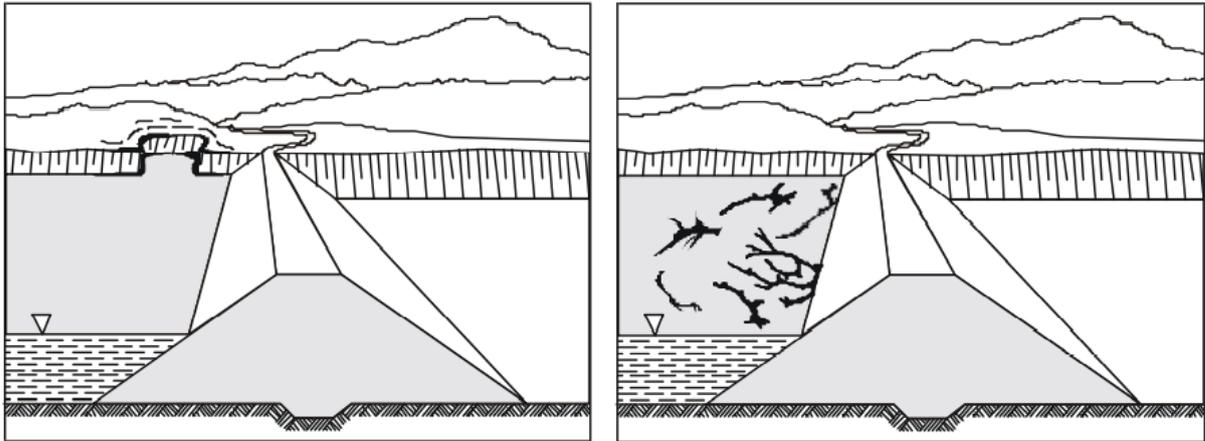
As causas para deslizamentos e erosões na área do reservatório são: ação do gelo e a erosão das ondas criam encostas íngremes; e, a ponta do talude fica saturada pelo reservatório. Como consequências, tem-se: o deslizamento ou lama pode bloquear o vertedouro ou saída; e, as ondas causadas por um deslizamento podem ultrapassar o aterro (Figura 15).

Como causas para flutuação de entulhos e/ou resíduos no reservatório pode-se destacar: atividade de castores na bacia de drenagem; corte de árvores; e, escoamento intenso. Por sua vez, tem como consequência que os detritos podem bloquear o vertedouro ou saída (Figura 15).

Quando o problema é causado pela atividade de castores ao redor da represa, a consequência é que pode haver o bloqueio do vertedouro ou saída, fazendo com que a água suba e transborde o aterro (Figura 16).

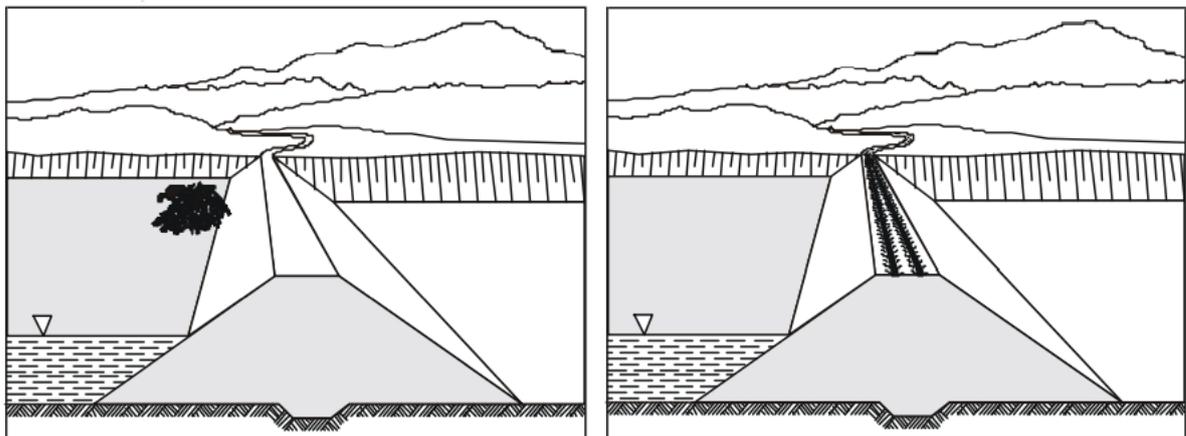
As principais causas de erosão por sulcos ao longo da crista são: a drenagem inadequada da crista, deixando que a água fique parada; e, travessia do veículo quando a superfície é macia. As consequências dessa situação é permitir que a água parada se acumule e sature a crista, assim como os veículos que cruzam a crista podem ficar presos causando mais danos (Figura 16).

Figura 15 – Deslizamentos e erosões na área do reservatório (esquerda); Flutuação de entulhos e/ou resíduos no reservatório (direita)



Fonte: *Inspection of Small Dams* (1998).

Figura 16 – Atividade de castores na área do reservatório (esquerda); Erosão por sulcos ao longo da crista (direita)

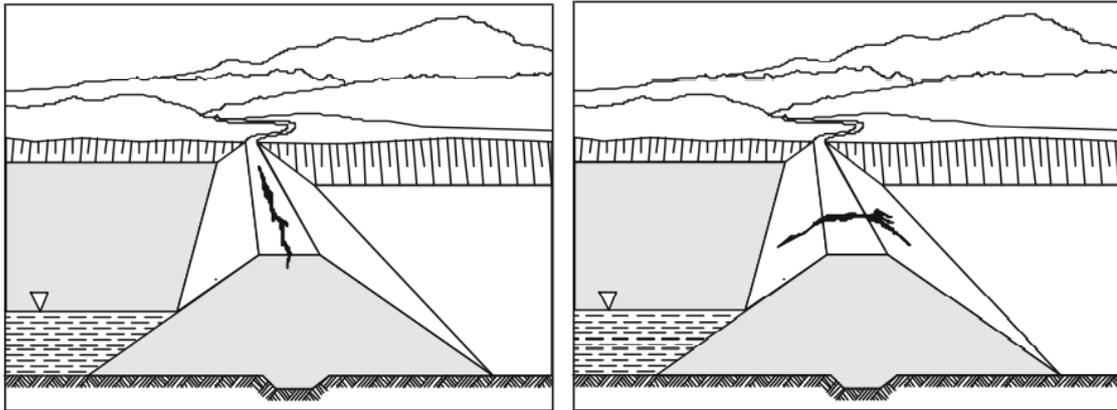


Fonte: *Inspection of Small Dams* (1998).

Destaca-se que as causas para fissuras longitudinais na crista são: recalque irregular dentro do aterro ou fundação; e, instabilidade de taludes. Por conseguinte, as implicações estão no ponto de entrada para águas superficiais que podem promover o movimento, além de que é possivelmente reduzirá a largura efetiva da crista (Figura 17).

As razões que provocam fissuras transversais são: movimento irregular entre dois segmentos adjacentes do aterro; e, instabilidade do aterro ou fundação. Os efeitos provocados nessa situação podem ser: fornece um ponto de entrada para águas superficiais; e pode criar um caminho de infiltração do reservatório e uma possível falha na tubulação (Figura 17).

Figura 17 – Fissuras longitudinais na crista (esquerda); Fissuras transversais na crista (direita)

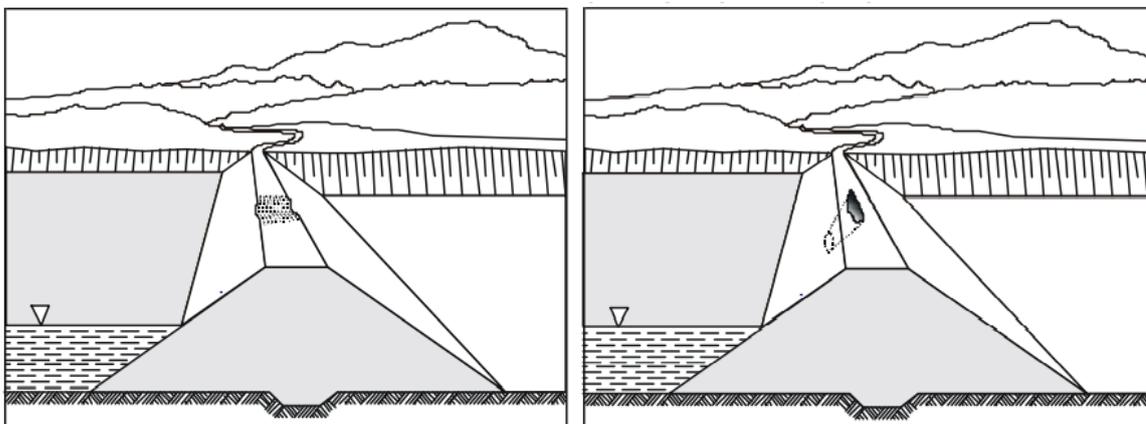


Fonte: *Inspection of Small Dams* (1998).

O recalque excessivo do material do aterro ou da fundação (a área de aterro mais profundo geralmente recalca mais) e erosão interna do material do aterro, erosão prolongada por vento ou água e práticas de construção inadequadas são fatores que provocam a ocorrência do assentamento da crista da barragem. Conseqüentemente, essa anomalia pode gerar redução na borda livre para um direcionamento seguro das águas da enchente, bem como pode concentrar o fluxo em uma área se a barragem for transbordada (Figura 18).

O problema de orifícios na crista tem como causas: erosão interna por infiltração, por exemplo, tubulação em um orifício no conduíte; e, uma quebra de argilas dispersivas por infiltração. As implicações a isso são: descamação/escavação pode ocorrer no sumidouro levando à instabilidade do aterro e desenvolvimento de uma área baixa; fornece um ponto de entrada para as águas superficiais; e, dependendo do tamanho e profundidade, pode levar a uma falha (Figura 18).

Figura 18 – Assentamento da crista (esquerda); Orifícios na crista (direita)

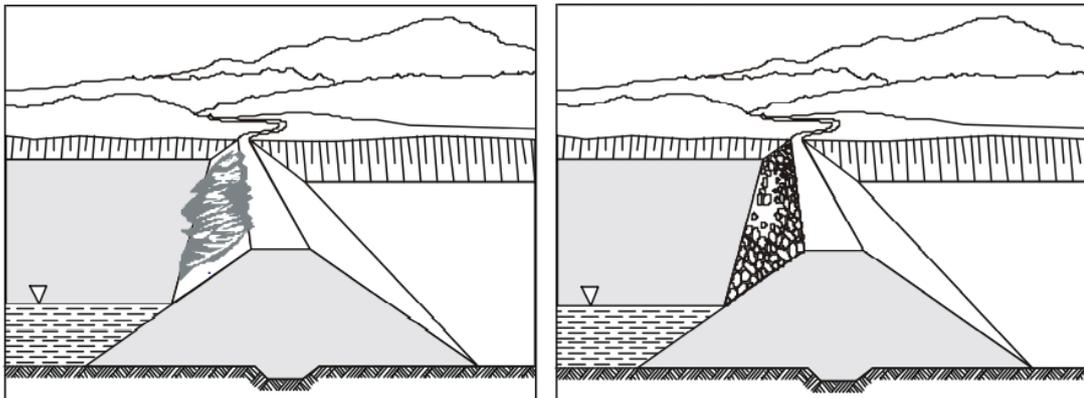


Fonte: *Inspection of Small Dams* (1998).

A ação de onda ou gelo, assentamento local e proteção contra erosão inadequada são causas que provocam o surgimento de erosão no paramento de jusante, podendo ocasionar redução da largura e a elevação da crista, levando a um possível galgamento, podendo resultar no aumento de infiltração (Figura 19).

As causas para ocorrência de deslocamento do rip-rap ou enrocamento de proteção são: ação de onda ou gelo; enrocamento de má qualidade; e, rocha do mesmo tamanho, deixando lacunas que permitem que as ondas erodam o material subjacente. Como resposta, tem-se que consequência é a erosão que pode reduzir a largura e a altura do aterro (Figura 19).

Figura 19 – Erosão no paramento de montante (esquerda); Deslocamento do *rip-rap* ou enrocamento de proteção (direita)

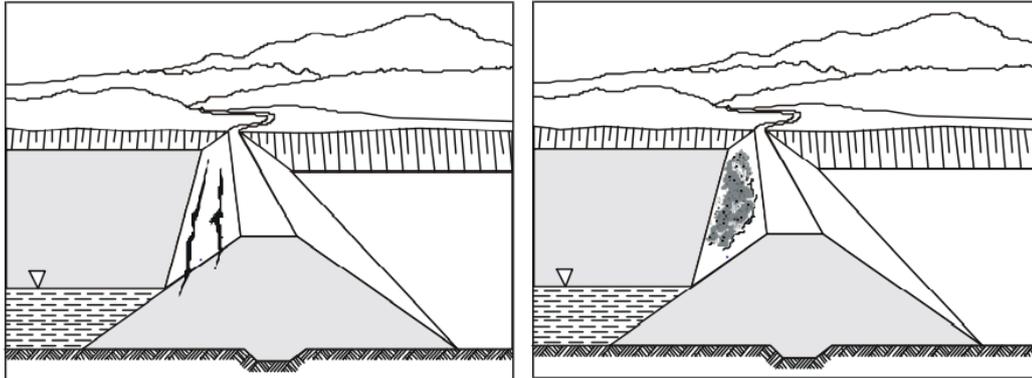


Fonte: *Inspection of Small Dams* (1998).

As grandes fissuras no paramento de montante surgem devido à instabilidade de taludes e o assentamento diferencial. Como consequência a isso, destaca-se que quase sempre precede uma ruptura de talude ou assentamento em grande escala (Figura 20).

Os deslizamentos ou colapsos no paramento de montante acontece por causa de falha na fundação, declive muito íngreme ou um rápido esvaziamento do reservatório. Dessa forma, esse defeito pode levar ao rompimento da barragem, bem como os detritos do deslizamento podem bloquear as saídas de nível baixo (Figura 20).

Figura 20 – Grandes fissuras no paramento de montante (esquerda); Deslizamentos ou colapsos no paramento de montante (direita)

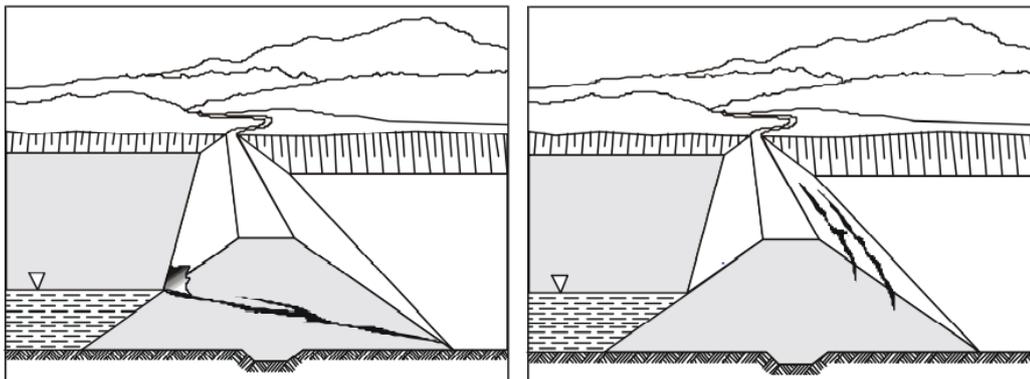


Fonte: *Inspection of Small Dams* (1998).

A infiltração concentrada começa a erodir o material do aterro através da barragem. Essa perda de material faz com que a entrada do "tubo" colapse formando um sumidouro. Isso pode resultar em falha na tubulação (Figura 21).

A secagem e encolhimento do material de aterro, assentamento de aterro ou material de fundação e instabilidade de encostas são razões que resultam nessa anomalia em barragens. A presença de um ponto de entrada para águas superficiais é uma implicação desse tipo de defeito (Figura 21).

Figura 21 – Infiltração a montante (esquerda); Fissuras longitudinais no paramento de jusante (direita)



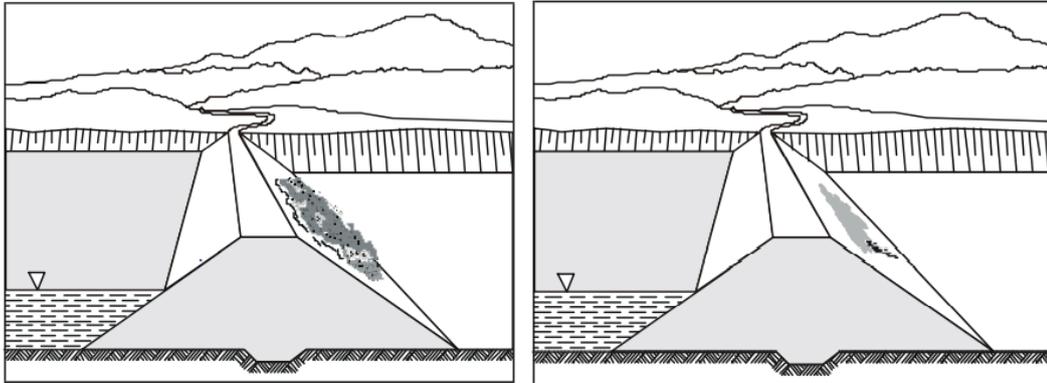
Fonte: *Inspection of Small Dams* (1998).

As causas para o deslizamento ou colapso no paramento de jusante são: declive muito acentuado; e, perda de resistência do material do aterro devido à infiltração excessiva. Por sua vez, os seus efeitos podem ser: quedas/deslizamentos adicionais; e, colapso do aterro (Figura 22).

Anomalia causada através do aterro ou sob a fundação, com água de superfície entrando por rachaduras ou tocas de animais, podendo resultar na instabilidade de talude na

possibilidade de falha na tubulação (Figura 22).

Figura 22 – Deslizamento ou colapso no paramento de jusante (esquerda); Infiltrações no paramento de jusante (direita)

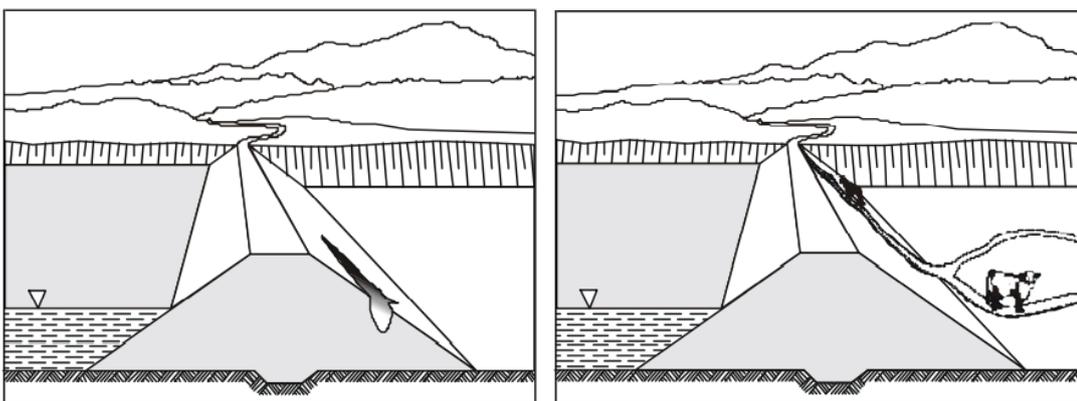


Fonte: *Inspection of Small Dams* (1998).

As causas para formação de cavidades ou colapso no paramento de jusante são: baixa compactação durante a construção.; erosão interna através do aterro ou fundação; e, escavação de animais. A implicações a essa situação podem ser a ocorrência de maior infiltração, bem como possível indicação de uma falha potencial (Figura 23).

A erosão no paramento de jusante pode ser ocasionada devido ao tráfico de gado e o escoamento superficial, podendo originar mais erosão (Figura 23).

Figura 23 – Formação de cavidades ou colapso no paramento de jusante (esquerda); Erosão no paramento de jusante (direita)

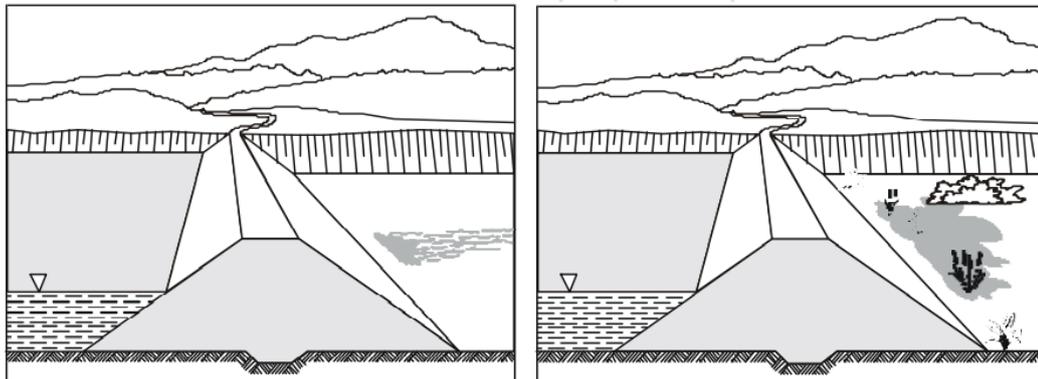


Fonte: *Inspection of Small Dams* (1998).

Destaque-se que as causas desse tipo de problema podem ser: presença de um caminho de infiltração concentrado ou "tubo" que se desenvolveu através da fundação; e, infiltração do reservatório por meio de uma camada de areia ou cascalho na fundação. Conseqüentemente, essa falha pode ocorrer na tubulação da fundação e, finalmente, do aterro.

A ocorrência de água parada no sopé a jusante pode ser resultante de infiltração pesada, escoamento superficial e drenagem ruim longe do dedo do pé, por exemplo, devido a represas de castores. Os efeitos que essa anomalia pode repercutir se volta em esconder a origem e dificultar a estimativa das taxas de fluxo, bem como na saturação e desestabilização do talude de jusante e na falha do talude (Figura 24).

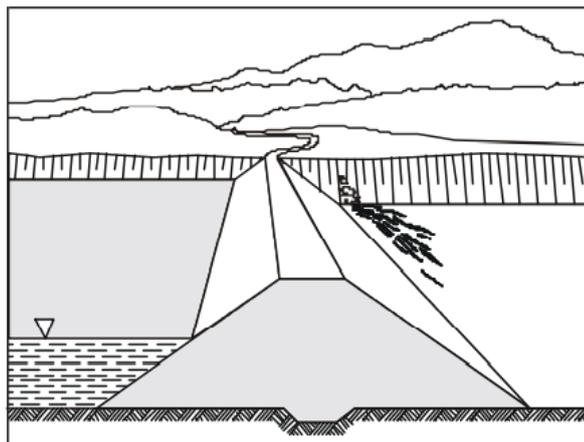
Figura 24 – Infiltração de água no sopé a jusante (esquerda); Água parada no sopé a jusante (direita)



Fonte: *Inspection of Small Dams* (1998).

A causa para o surgimento dessa anomalia está na presença de um caminho de infiltração, a qual pode resultar em falha na tubulação do pilar (Figura 25).

Figura 25 – Áreas úmidas ou surgências de água no paramento de jusante

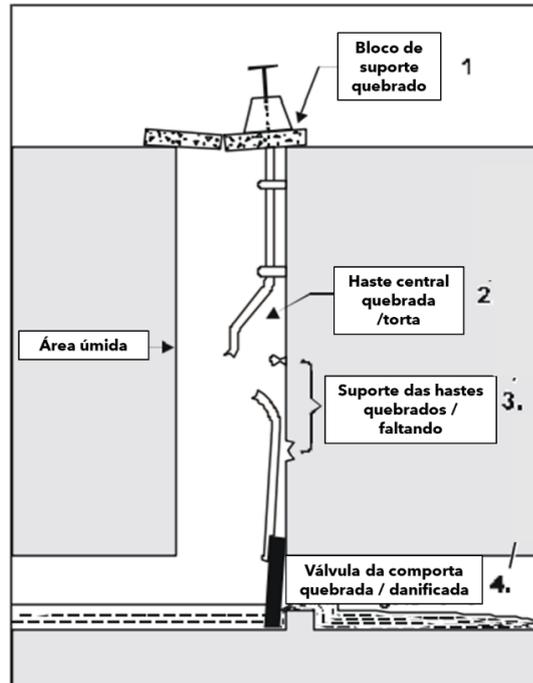


Fonte: *Inspection of Small Dams* (1998).

A inoperabilidade dos equipamentos para a saída de água é decorrente da deterioração do concreto, das guias de haste inadequadas ou quebradas, da falta de manutenção fazendo com que as guias se prendam à haste e quebrem quando o portão trava e, por fim, da corrosão, cavitação, impacto de detritos transportados pela água (Figura 26). Essa anomalia torna a

comportainoperável, impedindo o rebaixamento do reservatório, se necessário, e impedindo a passagem da água ciliar para os usuários a jusante. Também, caso o portão estiver emperrado, os níveis de operação do reservatório não poderão ser mantidos e a água será perdida.

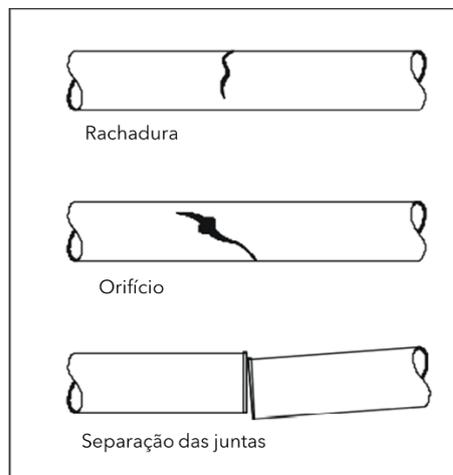
Figura 26 – Inoperabilidade dos equipamentos para a saída de água



Fonte: *Inspection of Small Dams* (1998).

Os problemas nos condutos são causados pela ferrugem e separação conjunta, podendo levar a uma erosão interna grave e a uma possível falha na tubulação (Figura 27).

Figura 27 – Problemas nos condutos

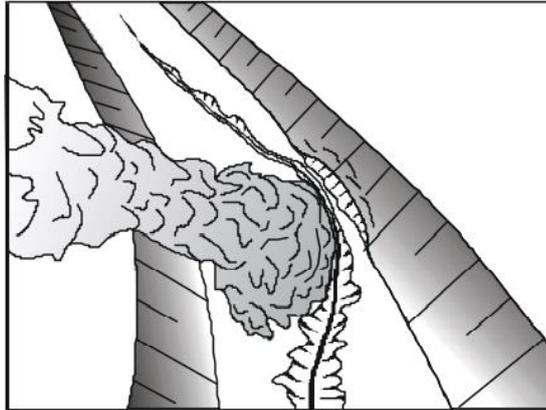


Fonte: *Inspection of Small Dams* (1998).

Erosão / deslizamentos no canal de restituição são causados devido a proteção

inadequada contra erosão e declive muito acentuado (Figura 28). As consequências para isso são: erosão mais profunda e geralmente avançando rio acima; drenagem do reservatório através do canal erodido; e, possível bloqueio do canal.

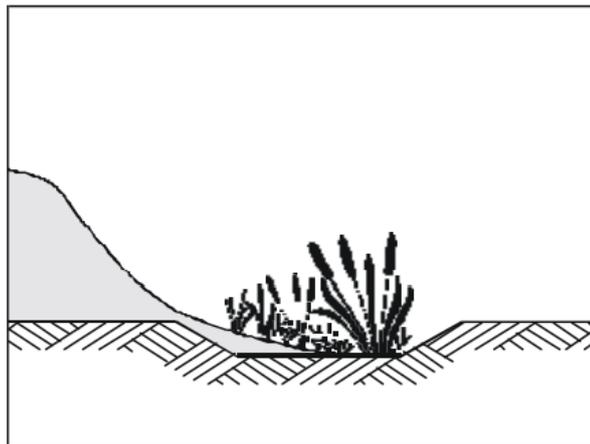
Figura 28 – Erosão / deslizamentos no canal de restituição



Fonte: *Inspection of Small Dams* (1998).

O bloqueio do canal de descarga pode ocorrer devido a detritos flutuantes, atividade animal e ação antrópica (Figura 29). Esse tipo de anomalia pode restringir o fluxo do canal do vertedouro, fazendo com que o aterro transborde.

Figura 29 – Bloqueio do canal de descarga

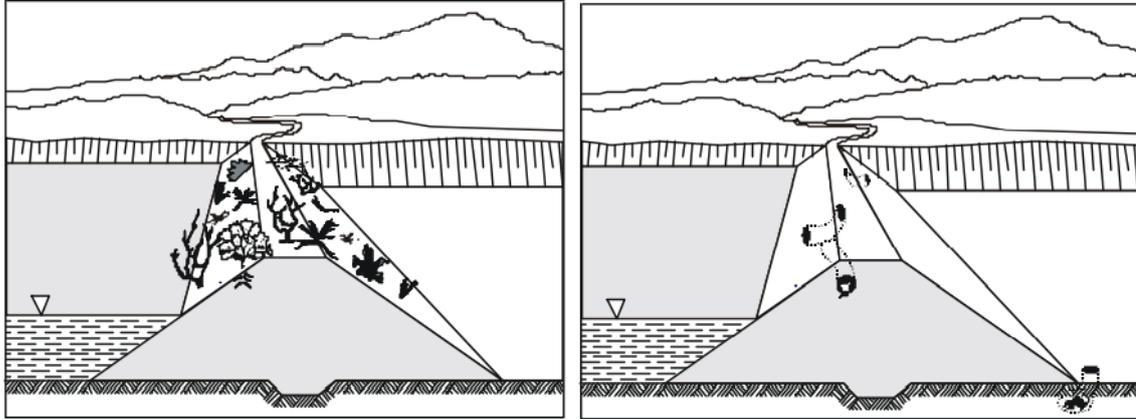


Fonte: *Inspection of Small Dams* (1998).

O problema de vegetação excessiva nos taludes pode ser ocasionado é ocasionado por falta de manutenção. (Figura 30) Tem por implicação o impedimento de uma inspeção completa., o sistema radicular pode criar um caminho de infiltração caso a vegetação venha a morrer, a raiz pode deixar um buraco se as árvores soprarem, o acesso fácil fica impedido e, por fim, não impede um habitat para animais escavadores.

A atividade animal é causada por escavadores, tendo por efeito o enfraquecimento do solo e a possibilidade de falha na tubulação (Figura 30).

Figura 30 – Vegetação excessiva nos taludes (esquerda); Atividade animal (direita)



Fonte: *Inspection of Small Dams* (1998).

A idade de uma barragem é um dos fatores imprescindíveis à determinação das condições de segurança. A deterioração das estruturas pode ser gerada por efeitos do tempo nos materiais de construção, infiltrações no concreto, reação de agregados alcalinos nas estruturas de concreto e pela corrosão das partes metálicas da estrutura. No Quadro 2 são apresentadas as principais causas de falhas reportadas em 103 barragens são listadas (VELTROP, 1991; ZUFFO, 2005).

Quadro 2 – Causas de Rupturas em Barragens

Razões	%
Galgamento	26
Vazamentos e <i>Pipping</i> no Aterro	22
Erosão do Leito	17
Vazamentos e <i>Pipping</i> na Fundação	17
Deslizamento	6
Deformação	6
Outras	6

Fonte: Adaptado de Veltrop (1991).

3.8.2 Índice de Segurança de Barragens – ISB

A análise quanto a segurança de barragem segue a metodologia proposta por Zuffo (2005), a qual desenvolveu seu estudo não apenas pela perspectiva técnica (potencial de risco e performance), mas também com enfoque ambiental, destacando a importância individual que cada parâmetro ou critério a ser avaliado através da atribuição de pesos possui. Além disso, proporciona uma identificação precisa de características individuais de parâmetros de segurança que estaria favorecendo para uma possível insegurança da estrutura.

Assim, a metodologia em questão nasce por meio de um estudo da *National Sanitation Foundation*, no ano de 1970, nos Estados Unidos, o qual a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB adaptou e desenvolveu o Índice de Qualidade de Água – IQA, que compreende parâmetros relevantes à avaliação da qualidade da água. Dessa forma, o Método de Avaliação de Segurança propôs o Índice de Segurança de Barragem – ISB, que abrange parâmetros de segurança de barragem, partindo da criação de critérios técnicos e ambientais avaliados de maneira conjunta.

A saber, o ISB pode ser entendido como um método multicritério, da família da Programação Matemática fundamentada na distância, na qual é avaliada apenas uma alternativa, isto é, sem exercer comparação entre barragens. De maneira geral, sua estrutura é semelhante ao *Cooperative Game Theory* – CGT (“Teoria dos Jogos Cooperativos”, do português), entretanto seu objetivo não está voltado em selecionar alternativas de melhor compromisso, significando dizer que não busca apoio para a tomada de decisão, mas um valor que corresponda a uma “distância” que virá a ser a referência à avaliação de segurança de barragens.

Os métodos baseados na distância vão de encontro à solução de compromisso ideal, ou seja, a que apresenta a máxima distância da solução status quo, refere-se a pior situação de segurança que uma barragem pode estar.

O cálculo do ISB é feito por meio do produtório ponderado da condição de segurança referente para cada um dos critérios. O produtório ponderado é empregado pelo fato de privilegiar todos os critérios a serem avaliados, isto é, as relevâncias deles são contempladas em acordo geral da condição de segurança da barragem. O ISB é expresso pela Equação 13.

$$ISB = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i} \quad (13)$$

Em que,

q_i – nota do i-ésimo critério, que vai de 1 a 100, adquirido na respectiva curva da função de valor, em função do conceito obtido no critério;

w_i – peso referente ao i-ésimo critério, que vai de 0 a 1, concebido em função de sua significância à conformação global de segurança.

Por sua vez, os pesos (w_i) padronizados são constituídos através de opiniões técnicas de profissionais da área, por meio da aplicação de um questionário. Sendo assim, tem-se a Equação 14.

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (14)$$

Em que,

n – número de critérios que são considerados para o cálculo do ISB.

Com isso, são estabelecidos critérios tecnológicos (ou de engenharia) considerados importantes, bem como o envio de questionários a um grupo de técnicos. Os critérios determinados por Zuffo (2005) ocorreram com base na literatura (Quadro 3).

Quadro 3 – Critérios que compõem o ISB

POTENCIAL DE RISCO	1. Importância da barragem
	2. Dimensões
	3. Tipo de barragem
	4. Tipo de vertedor
	5. Período de retorno da obra de descarga
	6. Instalações à jusante
	7. Instalações à montante
	8. Idade da barragem
PERFORMANCE	9. Qualidade geral dos dados técnicos
	10. Presença de vazamentos
	11. Presença de deformações
	12. Deterioração em aspectos gerais e taludes
	13. Evidências de erosão à jusante
	14. Conservação do vertedor para prevenção de enchentes
FATORES AMBIENTAIS	15. Eutrofização no reservatório
	16. Alteração do uso e ocupação do solo
	17. Eliminação da vegetação natural ou implantada
	18. Histórico de acidentes relacionados com a barragem

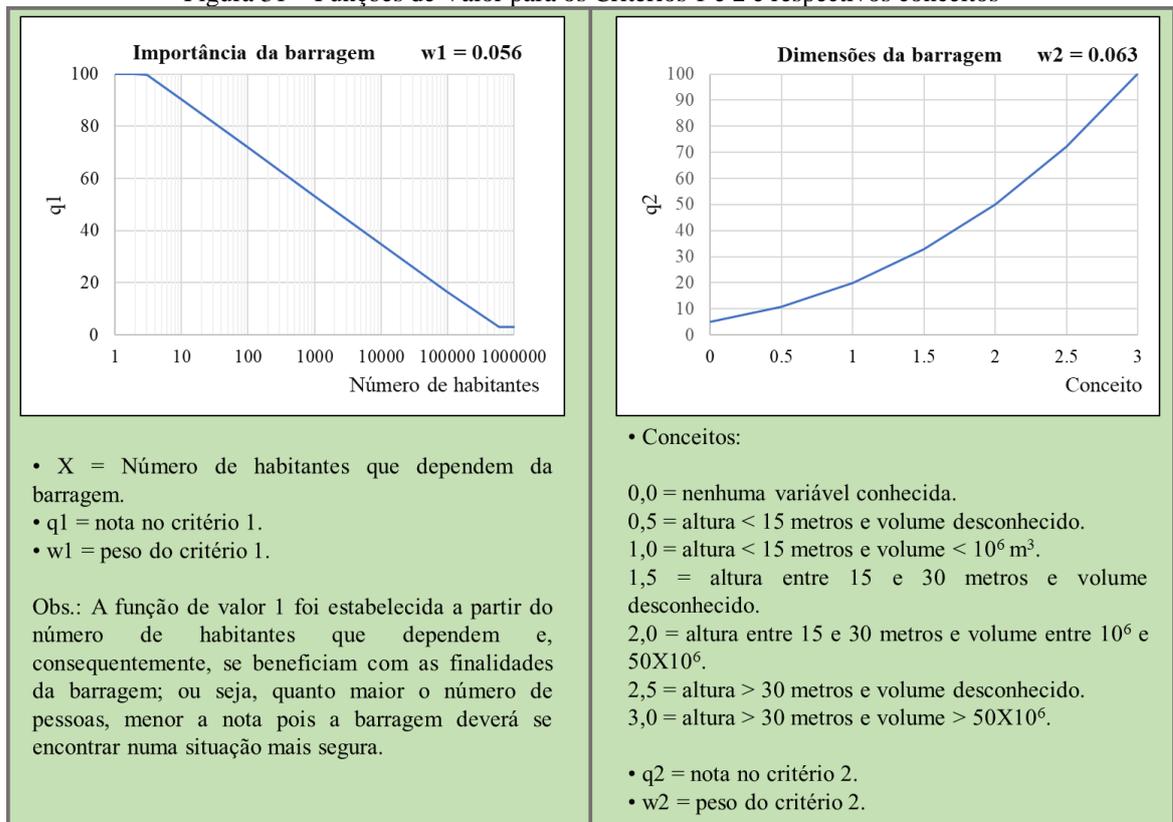
Fonte: Zuffo (2005).

O Quadro 3 evidencia os critérios que compõem o ISB, pontuando que não há mistura de critérios econômicos ou ambientais. Com isso, foram sugeridos dezoito critérios (parâmetros) pela autora à realização da avaliação de segurança de barragens, para serem analisados nos barramentos, o quais foram determinados através de bibliografias estudadas.

Os critérios se distribuem em categorias, dos quais do 1 ao 8 estão contemplados na Avaliação do Potencial de Risco; do critério 9 ao 14, para a Análise da Performance; e, do critério 15 ao 18, para a Análise Ambiental.

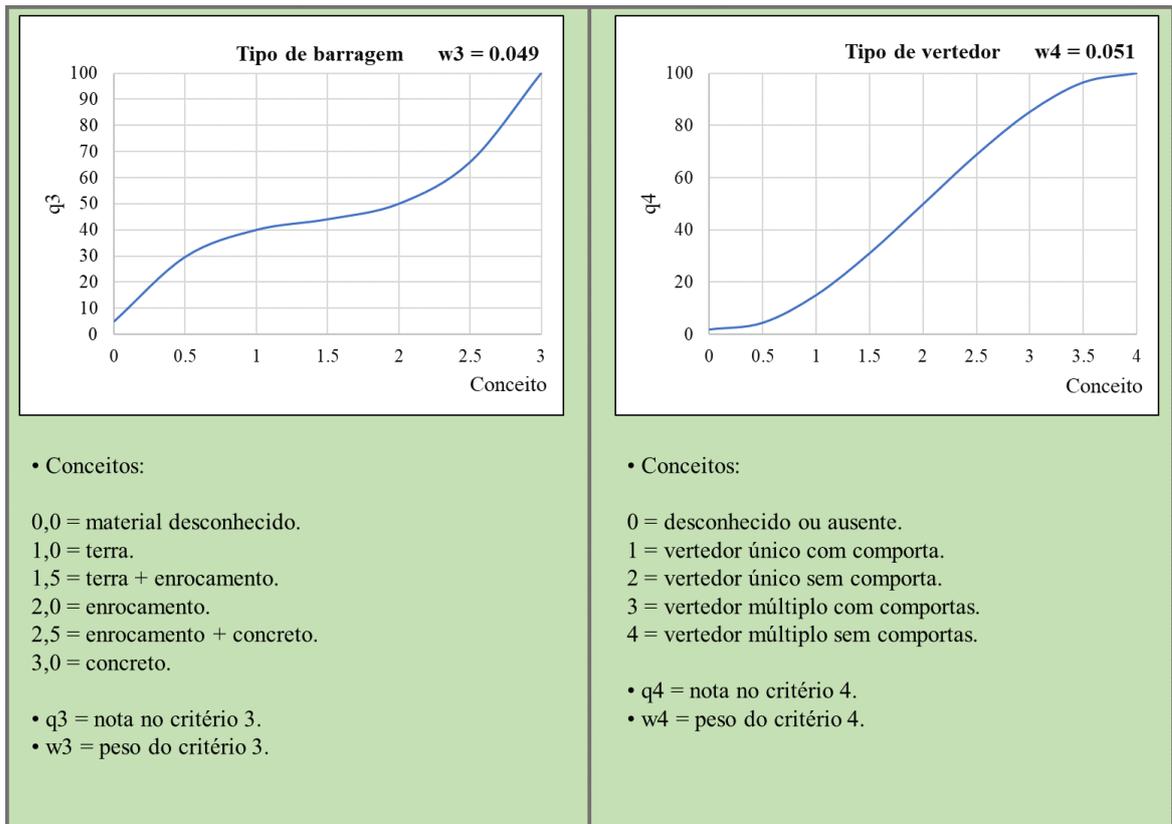
A criação do ISB é embasada em uma pesquisa junto a especialistas em barragens, que pontuaram os pesos dos critérios, estabelecendo a importância de cada critério na avaliação geral da segurança da barragem, onde cada um deles tem uma função de valor, e cruzando o resultado alcançado para cada parâmetro com a função de valor curva, a nota para esse critério é definida. Assim, são apresentadas as dezoito funções de valor determinadas correspondentes aos parâmetros ou critérios a serem avaliados (Figura 31 a 40).

Figura 31 – Funções de Valor para os Critérios 1 e 2 e respectivos conceitos



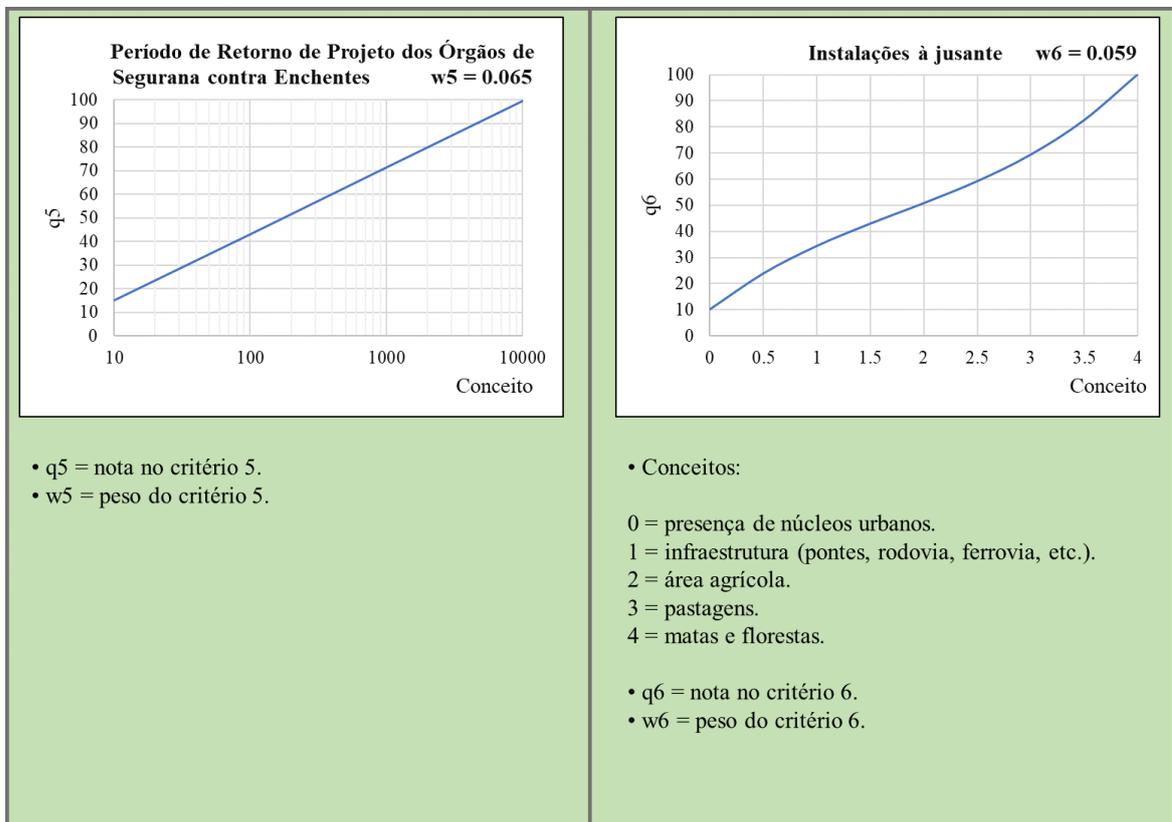
Fonte: Zuffo (2005).

Figura 32 – Funções de Valor para os Critérios 3 e 4 e seus respectivos conceitos



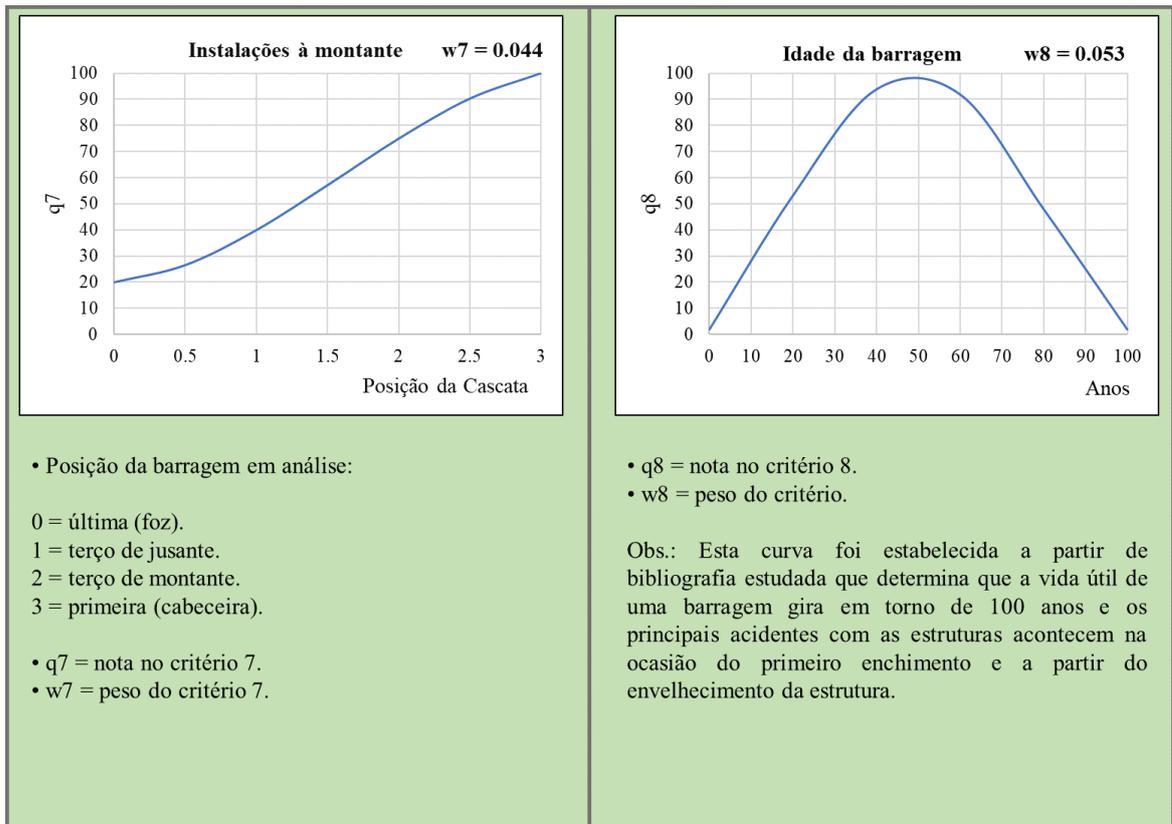
Fonte: Zuffo (2005).

Figura 33 – Funções de Valor para os Critérios 5 e 6 e seus respectivos conceitos



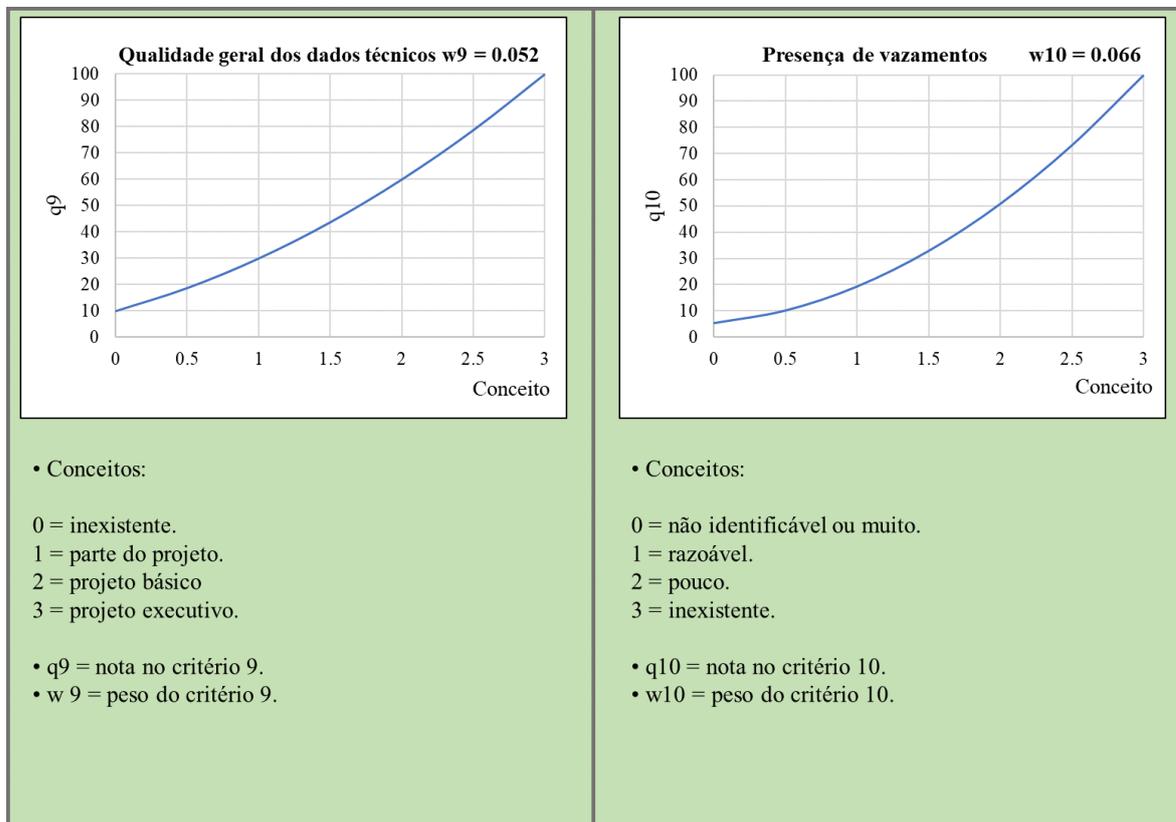
Fonte: Zuffo (2005).

Figura 34 – Funções de Valor para os Critérios 7 e 8 e seus respectivos conceitos



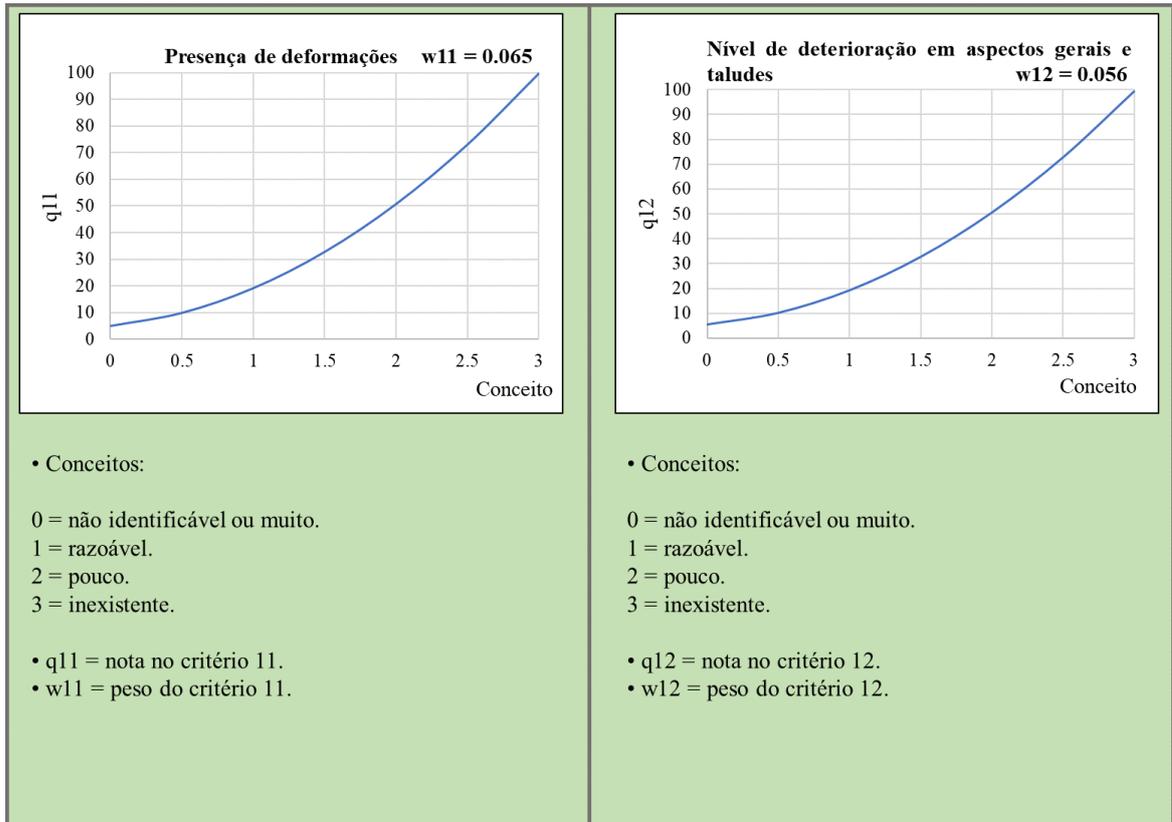
Fonte: Zuffo (2005).

Figura 35 – Funções de Valor para os Critérios 9 e 10 e seus respectivos conceitos



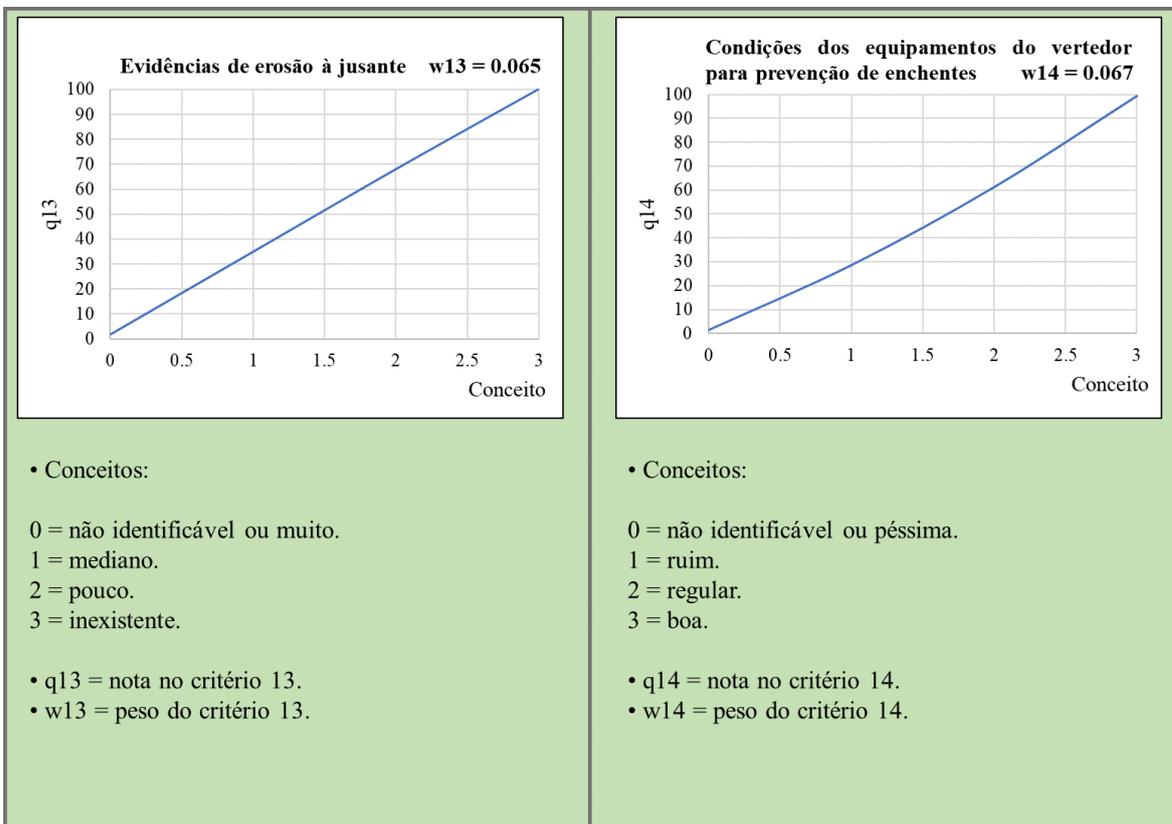
Fonte: Zuffo (2005).

Figura 36 – Funções de Valor para os Critérios 11 e 12 e seus respectivos conceitos



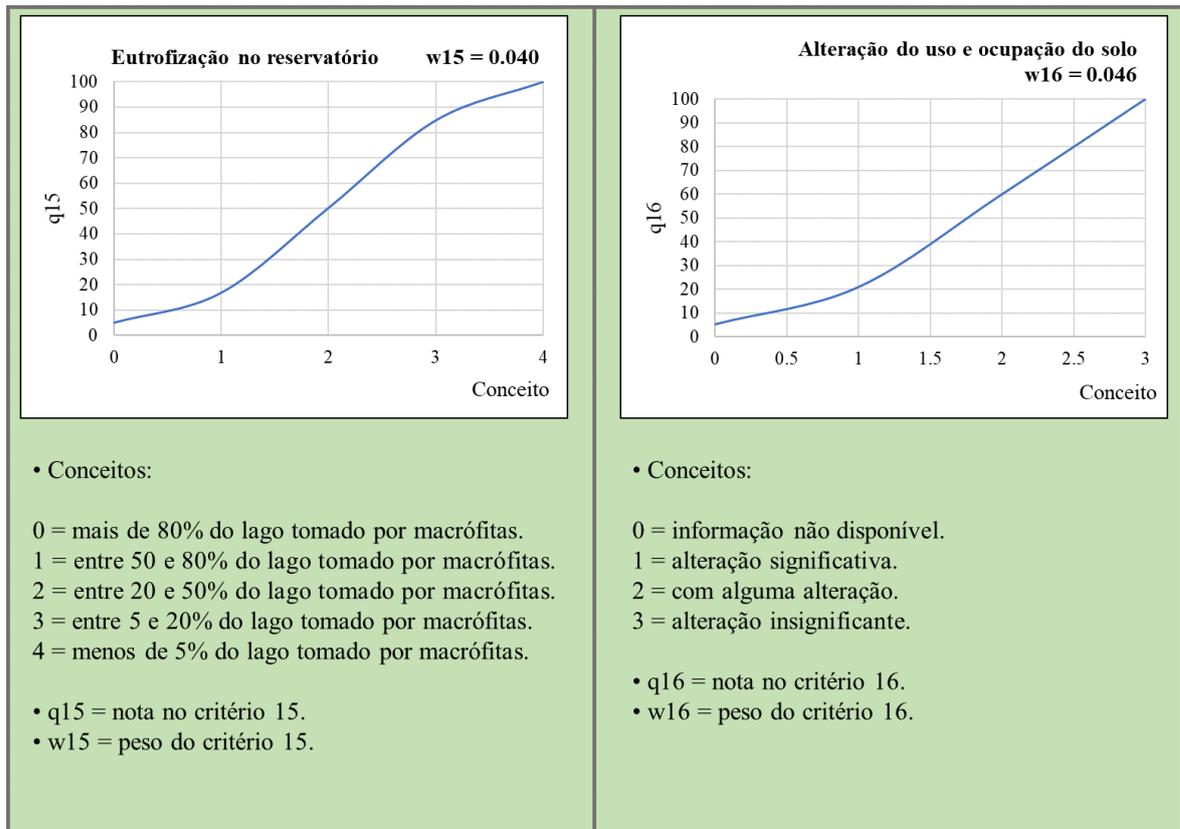
Fonte: Zuffo (2005).

Figura 37 – Funções de Valor para os Critérios 13 e 14 e seus respectivos conceitos



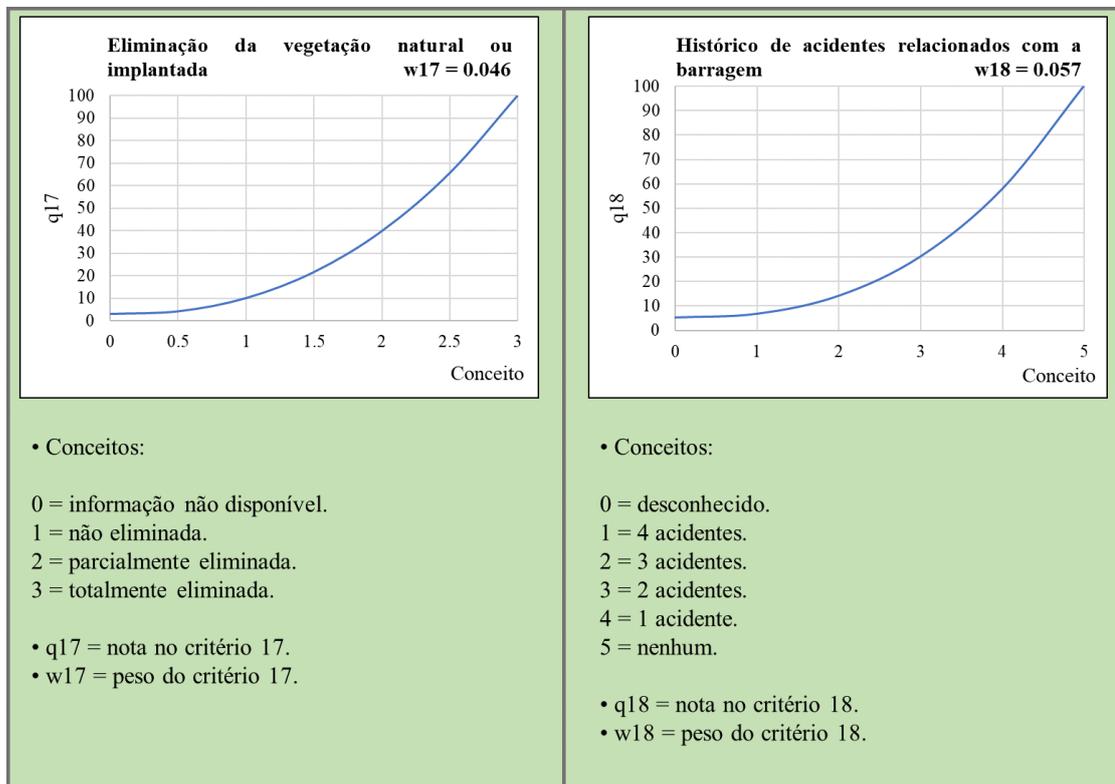
Fonte: Adaptada de Zuffo (2005).

Figura 38 – Funções de Valor para os Critérios 15 e 16 e seus respectivos conceitos



Fonte: Zuffo (2005).

Figura 39 – Funções de Valor para os Critérios 17 e 18 e seus respectivos conceitos



Fonte: Zuffo (2005).

Conforme a Figura 40, as equações ajustadas das curvas das funções de valor e r^2 , para todos os critérios, podem ser observadas.

Figura 40 – Equações ajustadas e r^2 para todos os critérios

Critério	Equação Ajustada	r^2
1. Importância da barragem	$y = -8,0032\ln(x) + 108,62$	1,000
2. Dimensões	$y = 0,8333x^3 + 5x^2 + 9,1667x + 5$	1,000
3. Tipo de barragem	$y = 10,833x^3 - 45x^2 + 69,167x + 5$	1,000
4. Tipo de vertedor	$y = -3,5x^3 + 21,286x^2 - 4,6429x + 2$	1,000
5. Período de retorno da obra de descarga	$y = 12,217\ln(x) - 13,061$	1,000
6. Instalações à jusante	$y = 1,6667x^3 - 8,9286x^2 + 31,548x + 10,143$	0,997
7. Instalações à montante	$y = -4,1667x^3 + 20x^2 + 4,1667x + 20$	1,000
8. Idade da barragem	$y = 9^{-6}x^4 - 0,0017x^3 + 0,0662x^2 + 1,8516x + 1,9242$	1,000
9. Qualidade geral dos dados técnicos	$y = 5x^2 + 15x + 10$	1,000
10. Presença de vazamentos	$y = 8,75x^2 + 5,25x + 5,25$	1,000
11. Presença de deformações	$y = 8,6905x^2 + 5,4821x + 5,095$	1,000
12. Deterioração em aspectos gerais e taludes	$y = 8,7499x^2 + 5x + 5,625$	0,997
13. Evidências de erosão à jusante	$y = 37,2x + 1,9$	1,000
14. Conservação do vertedor para prevenção de enchentes	$y = 2,75x^2 + 24,45 + 1,45$	1,000
15. Eutrofização no reservatório	$y = -3,4167x^3 + 21,071x^2 - 5,869x + 5,0429$	1,000
16. Alteração do uso e ocupação do solo	$y = -3,5526x^3 - 22,171x^2 - 2,9605x + 5,3289$	1,000
17. Eliminação da vegetação natural ou implantada	$y = 1,2777x^3 + 7,5238x^2 - 1,7539x + 3,1429$	1,000
18. Histórico de acidentes relacionados com a barragem	$y = 0,4815x^3 + 1,496x^2 - 0,4537x + 5,1989$	1,000

Fonte: Zuffo (2005).

O resultado fornecido pelo ISB indicará o estado de segurança de cada barragem em estudo. A classificação de segurança posta é baseada nas recomendações do EUA – *Design of Small Dams* (1987).

Quadro 4 – Características mínimas das barragens estabelecidas pelo EUA – *Design of Small Dams* (1987)

Condição Boa	Não há deficiências ou potenciais deficiências na segurança da barragem. Performance segura pode ser esperada sobre todas as condições de carga excepcionais, incluindo-se eventos tais como MCE e PMF;
Condição Satisfatória	Deficiências não existentes na segurança da barragem para condições normais de carga. Eventos hidrológicos ou sísmicos, não frequentes, podem resultar numa deficiência na segurança da barragem;
Condição Regular	Uma deficiência potencial na segurança da barragem pode ser identificada no que se refere às condições de cargas excepcionais, que podem ocorrer, de fato, durante a vida útil da estrutura. Também, quando existem incertezas sobre alguns dos parâmetros; incertezas que identificariam uma deficiência potencial na segurança da barragem. Investigações posteriores e estudos são necessários;
Condição Deficiente	Uma deficiência potencial na segurança da barragem pode ser identificada no que se refere às condições de cargas excepcionais, que podem ocorrer, de fato, durante a vida útil da estrutura. Também, quando existem incertezas sobre alguns dos parâmetros; incertezas que identificariam uma deficiência potencial na segurança da barragem. Investigações posteriores e estudos são necessários;
Condição Insatisfatória	Existe uma deficiência nas condições da segurança da barragem em condições normais de carga. Ações corretivas imediatas são requeridas para a solução do(s) problema(s).

Fonte: Zuffo (2005).

Assim, conforme já discutido, o valor do ISB é associado a classificação de segurança recomendado pelo EUA – *Design of Small Dams* (1987), em que possui intervalos de valores definidos para cada condição, com determinação de valores mínimos aceitáveis para as condições classificatórias. Dessa forma, chegou-se aos respectivos valores das categorias, delimitando, assim, os limites de cada faixa, sempre a favor da segurança (Tabela 2).

Tabela 2 – Interpretação do Índice de Segurança de Barragem – ISB obtido para cada empreendimento

Resultado ISB	Classificação de Segurança
91 – 100	Condição boa
81 – 90	Condição satisfatória
61 – 80	Condições Regular
31 – 60	Condição Deficiente
0 – 30	Condição Insatisfatória

Fonte: Zuffo (2005).

Para a condições Boa e Satisfatória é sugerida a inspeção de reavaliação após um ano. A respeito da condição Regular, recomenda-se a reavaliação após 6 meses. Já para as condições Deficiente e Insatisfatória, passados 3 meses de sanados os problemas registrados (ZUFFO, 2005).

4 METODOLOGIA

Para o estudo dos impactos das manchas de inundação geradas devido ao rompimento hipotético de barragens, foram escolhidas as barragens Serra dos Cavalos e Guilherme Azevedo, por suas magnitudes e relevância frente a região a qual estão inseridas, assim como pelos potenciais destrutivos que elas possuem caso venham a se romper. Conforme proposto pelas metodologias de análise da ruptura hipotética de uma barragem, de Wahl (1988) e Mohr (1998), foram determinados os hidrogramas de ruptura das duas barragens, observando a propagação da onda de cheia ocorrida depois da ruptura da barragem, mapeando os locais potencialmente inundáveis e, assim, comparar as manchas de inundação produzidas através dos modelos digitais do terreno da *Shuttle Radar Topographic Mission* – SRTM (Missão Topográfica Radar Shuttle) e do Pernambuco Tridimensional – PE3D.

A modelagem foi realizada por meio da aplicação do *software River Analysis System* – RAS (Sistema de Análise de Rios), do *Hydrologic Engineering Center* – HEC (Centro de Engenharia Hidrológica), que, por sua vez, faz parte do *United States Army Corps of Engineers* – USACE (Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos).

Para aplicação do Índice de Segurança de Barragens – ISB para verificar o risco de rompimento de 38 (trinta e oito) barragens sob jurisdição do Departamento Nacional de Obras Contra a Seca – DNOCS presentes no território pernambucano, foi necessária documentação que descreva o estado das barragens, como relatórios de inspeção, que, nesse caso, foram utilizados os documentos do Convênio firmado entre a UFPE e o DNOCS para fazerem um complexo levantamento sobre as barragens que estão sob jurisdição do DNOCS no estado de Pernambuco. Destaca-se que mesmo havendo a ausência de registros de certas informações como, por exemplo, quanto a projetos anteriores e histórico de acidentes, os documentos apresentam riqueza de informações, as quais possibilitaram a aplicação do ISB em todas as 38 barragens.

4.1 Caracterização das áreas de estudo

Nesse item será apresentada as áreas de estudo da presente pesquisa, tanto para a (a) Geração da mancha de inundação, quanto para a (b) Avaliação da segurança de barragens.

4.1.1 Para geração das manchas de inundação

As barragens Serra dos Cavalos e Guilherme Azevedo estão localizadas no Parque Natural Municipal Professor João Vasconcelos Sobrinho/PNMPJVS, região conhecida como Serra dos Cavalos, unidade de conservação integral dos municípios de Caruaru e Altinho, situados no agreste pernambucano, apesar da formação e gestão do Parque se encontrem sob a jurisdição municipal de Caruaru (PINHEIRO FILHO, 2016).

De acordo com este autor, essa região tem cotas de aproximadamente 600m, chegando até os 1000m. Além disso, há disjunções de florestas tropicais do tipo perenifólia, apresentando precipitações distintas das áreas vizinhas, devido ao efeito orográfico. Imagens de vários locais onde a barragem está inserida são mostradas através da Figura 41, incluindo o seu paramento e alguns problemas encontrados.

Figura 41 – Vistas de locais da barragem Serra dos Cavalos



Fonte: Adaptado de UFPE e DNOCS (2021).

O reservatório Serra dos Cavalos está localizado especificamente na Fazenda Caruaru, tendo o Riacho Capoeirão como afluente principal, pertencente a bacia hidrográfica do rio Ipojuca.

As informações detalhadas sobre barragem Serra dos Cavalos são mostradas através da Tabela 3.

Tabela 3 – Informações sobre a barragem Serra dos Cavalos

Nome da barragem	Serra dos Cavalos
Latitude	08° 21' 35,42" S
Longitude	36° 02' 27,47" O
Nome da entidade fiscalizadora	APAC-PE
Nome do empreendedor	DNOCS
Altura (m)	14,40
Comprimento do coroamento (m)	100,00
Capacidade do reservatório (hm³)	0,61
Tipo de material	Terra
Categoria de risco	Alto
Dano potencial associado	Alto
Regulação pela PNSB	Sim
Possui PAE	Não
Possui PSB	Não
Revisão periódica	Não
Uso principal	Usos múltiplos

Fonte: ANA (2016).

Por sua vez, o reservatório Guilherme Azevedo tem os Riachos Taquara e Olheiras como afluentes principais, pertencentes a bacia hidrográfica do rio Ipojuca. Imagens de vários locais onde a barragem está inserida são mostradas através da Figura 42, incluindo o seu paramento e alguns problemas encontrados.

Figura 42 – Vistas de locais da barragem Guilherme Azevedo



Fonte: Adaptado de UFPE e DNOCS (2021).

As informações detalhadas sobre barragem Guilherme Azevedo são mostradas através da Tabela 4.

Tabela 4 – Informações sobre a barragem Guilherme Azevedo

Nome da barragem	Guilherme Azevedo
Latitude	8° 21' 36,14" S
Longitude	36° 01' 53,05" O
Nome da entidade fiscalizadora	APAC-PE
Nome do empreendedor	DNOCS
Altura (m)	15,40
Comprimento do coroamento (m)	96,00
Capacidade do reservatório (hm³)	0,77
Tipo de material	Terra
Categoria de risco	Alto
Dano potencial associado	Alto
Regulação pela PNSB	Sim
Possui PAE	Não
Possui PSB	Não
Revisão periódica	Não
Uso principal	Usos múltiplos

Fonte: ANA (2016).

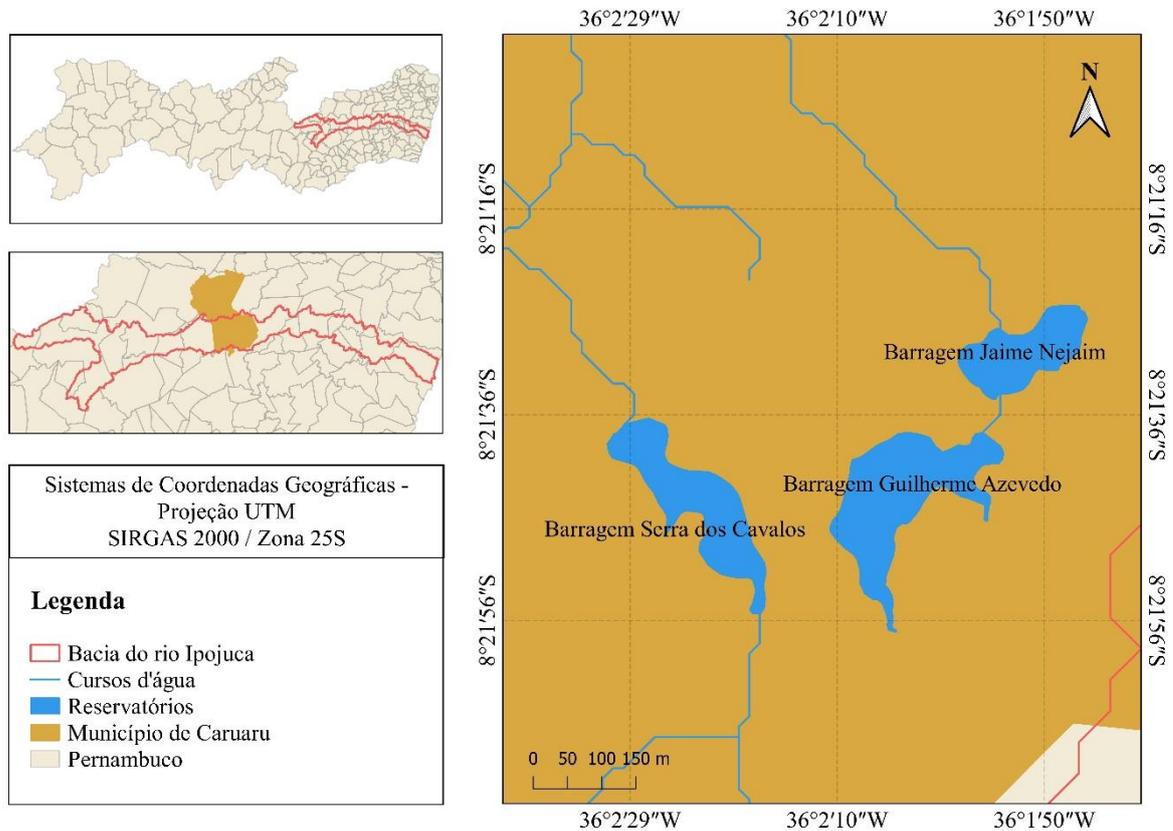
A região que circunda os reservatórios possui oferta hídrica que é proporcionada devido a interações por relativas distâncias dos alísios de sudeste e das evapotranspirações que formam episódios com tipos de expressão do relevo e vegetacional. A oferta de águas com precipitações superiores à média regional, existência de alguns riachos perenes, áreas com drenagens de baixa erosão, solos profundos e de boa permeabilidade, formaram elementos de elevada atração humana, que, por períodos, foram mais, ou em outros menos, originadores de conflitos através das pressões antrópicas no que se refere à biodiversidade (PINHEIRO FILHO, 2019).

Na Figura 43 é mostrada a localização dos dois reservatórios, onde Serra dos Cavalos está à esquerda e Guilherme Azevedo à direita, tornando perceptível o quanto eles são próximos. Observa-se que imediatamente a montante ao reservatório Guilherme Azevedo há o reservatório Jaime Nejaim, no qual embora não seja objeto de estudo desta pesquisa, será considerado devido a sua localização.

Como se nota pela Figura 43, o reservatório Jaime Nejaim está localizado na mesma região que os reservatórios Serra dos Cavalos e Guilherme Azevedo. Tem capacidade de 600.000m³, sua finalidade é para o abastecimento de água, o tipo de material é pedra em arco

e a extensão do coroamento é de 140,00m. Esse reservatório está sob jurisdição da Companhia Pernambucana de Saneamento – COMPESA (PERNAMBUCO, 2005).

Figura 43 – Reservatórios Serra dos Cavalos (esquerda), Guilherme Azevedo e Jaime Nejaím (ambos a direita)



Fonte: O Autor (2023).

4.1.2 Para avaliação da segurança de barragens

As barragens utilizadas para aplicação do Índice de Segurança de Barragens foram todas as que fizeram parte do projeto intitulado “Elementos para avaliação de riscos de barragens do estado de Pernambuco”, projeto UFPE:EARBPE, o qual foi executado pela UFPE em 2021. Esse projeto foi realizado por meio do convênio firmado entre a Universidade Federal de Pernambuco – UFPE e o Departamento Nacional de Obras Contra a Seca – DNOCS/Coordenadoria Regional do Estado de Pernambuco.

De acordo com o plano de trabalho estabelecido no convênio, o Relatório Final de Atividades é o Produto 05 (Cinco), que tem como título “Inspeção técnica e avaliação de riscos nas barragens do DNOCS localizadas no estado de Pernambuco”. Nesse documento consta um breve histórico do DNOCS, bem como o Termo de Execução Descentralizado – TED e os planos de trabalhos firmados entre as partes. Também, reúne os relatórios de

inspeção, as fichas de inspeção e os memoriais fotográficos de inspeções das 38 barragens, além do atestado de responsabilidade técnica das inspeções.

O projeto teve o apoio técnico-científico de docentes, estudantes e profissionais especializados para a realização de vistorias nas barragens de Pernambuco que estão sob a jurisdição do Departamento Nacional de Obras Contra a Seca.

No Quadro 5 está contida a lista com o nome de todas as barragens presentes do documento do convênio, bem como um código de identificação posto neste estudo para simplificar a identificação de cada uma delas.

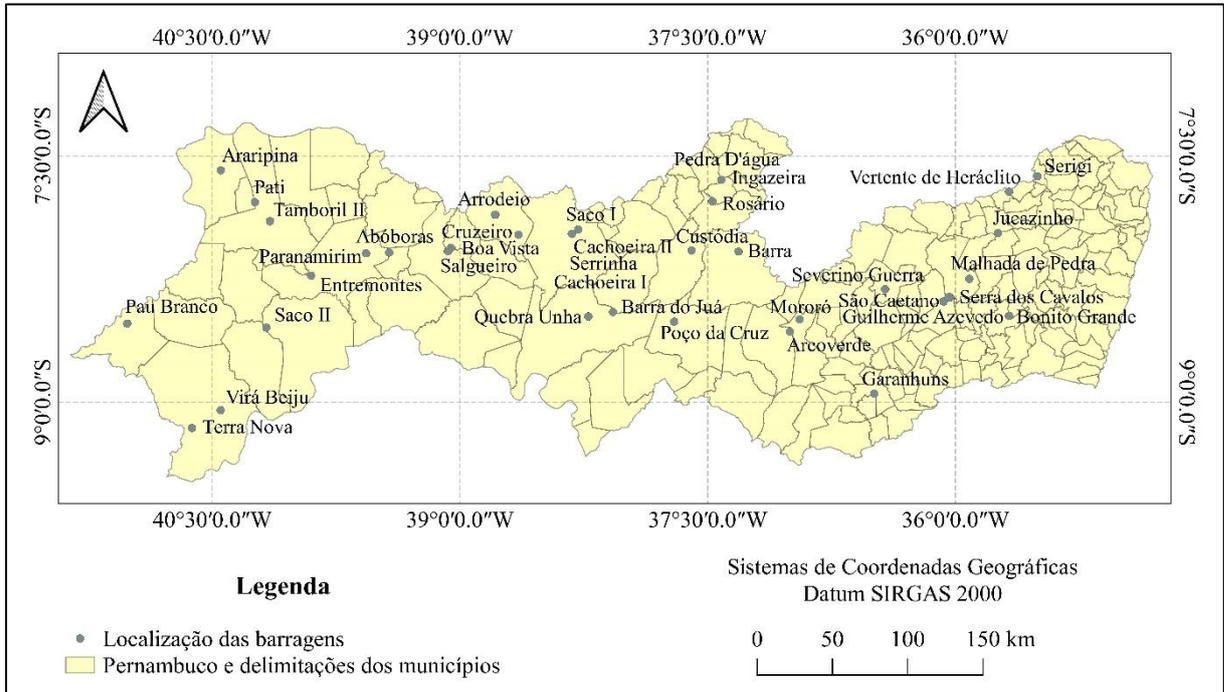
Quadro 5 – Barragens analisadas à aplicação da metodologia ISB

Reservatório	Id.	Reservatório	Id.
Barragem Abóboras	B1	Barragem Parnamirim	B20
Barragem Araripina	B2	Barragem Pati	B21
Barragem Arcoverde	B3	Barragem Pau Branco	B22
Barragem Arrodeio	B4	Barragem Pedra D'água	B23
Barragem Barra	B5	Barragem Poço da Cruz	B24
Barragem Barra do Juá	B6	Barragem Quebra Unha	B25
Barragem Boa Vista	B7	Barragem Rosário	B26
Barragem Bonito Grande	B8	Barragem Saco I	B27
Barragem Cachoeira I	B9	Barragem Saco II	B28
Barragem Cachoeira II	B10	Barragem Salgueiro	B29
Barragem Cruzeiro	B11	Barragem São Caetano	B30
Barragem Custódia	B12	Barragem Serigí	B31
Barragem Entremontes	B13	Barragem Serra dos Cavalos	B32
Barragem Garanhuns (Mundau I)	B14	Barragem Serrinha	B33
Barragem Guilherme Azevedo	B15	Barragem Severino Guerra	B34
Barragem Ingazeira	B16	Barragem Tamboril II	B35
Barragem Jucazinho	B17	Barragem Terra Nova	B36
Barragem Malhada de Pedra	B18	Barragem Vertente de Heráclito	B37
Barragem Mororó	B19	Barragem Vira Beiju	B38

Fonte: O Autor (2023).

A Figura 44, por sua vez, localiza diante do território pernambucano cada uma das barragens mencionadas no Quadro 3.

Figura 44 – Localização das barragens sob jurisdição do DNOCS em Pernambuco

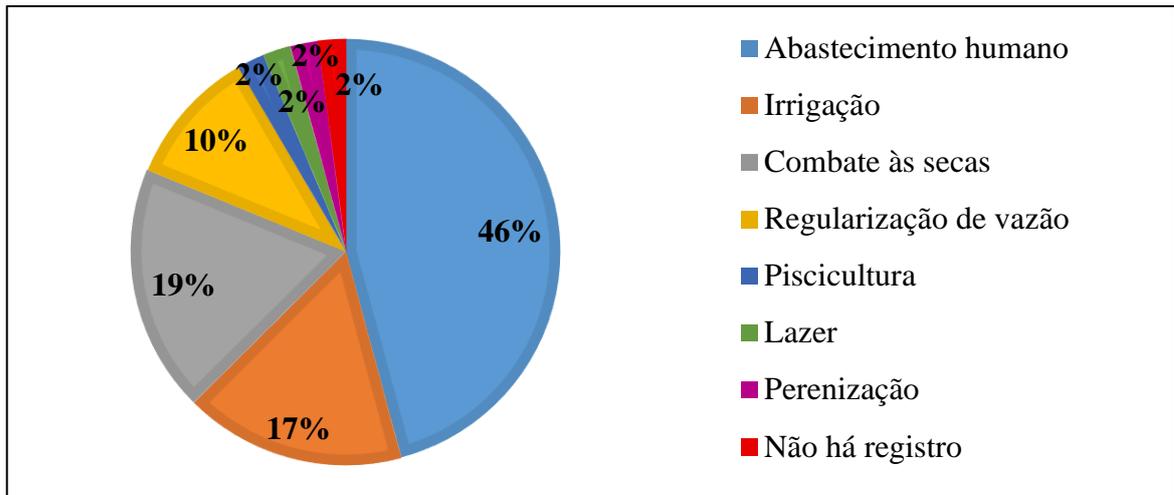


Fonte: O Autor (2023).

Assim, o objetivo geral do convênio consistiu na realização dos seguintes pontos: avaliar as anomalias presentes nas estruturas do maciço e obras complementares (torre da tomada d'água, galeria de inspeção, sangradouros, bacia de dissipação, muros alas, canal de aproximação, canal de restituição, hidromecânicos) em 38 (tinta e oito) barragens previamente estabelecidas sob jurisdição do DNOCS; identificar a magnitude (M) dessas anomalias; Avaliar o Nível de Perigo (NP) que cada uma dessas anomalias representa para a barragem; Indicar os estudos necessários para as soluções dos problemas encontrados, em virtude das anomalias detectadas em cada barragem; e, Nível de Risco Associado.

A análise minuciosa das barragens sob jurisdição do DNOCS, em Pernambuco, permitiu que alguns levantamentos fossem feitos, trazendo uma visão geral sobre os tipos e funcionamento delas. A Figura 45 traz as informações sobre a finalidade dos barramentos.

Figura 45 – Finalidade das barragens do DNOCS, em Pernambuco

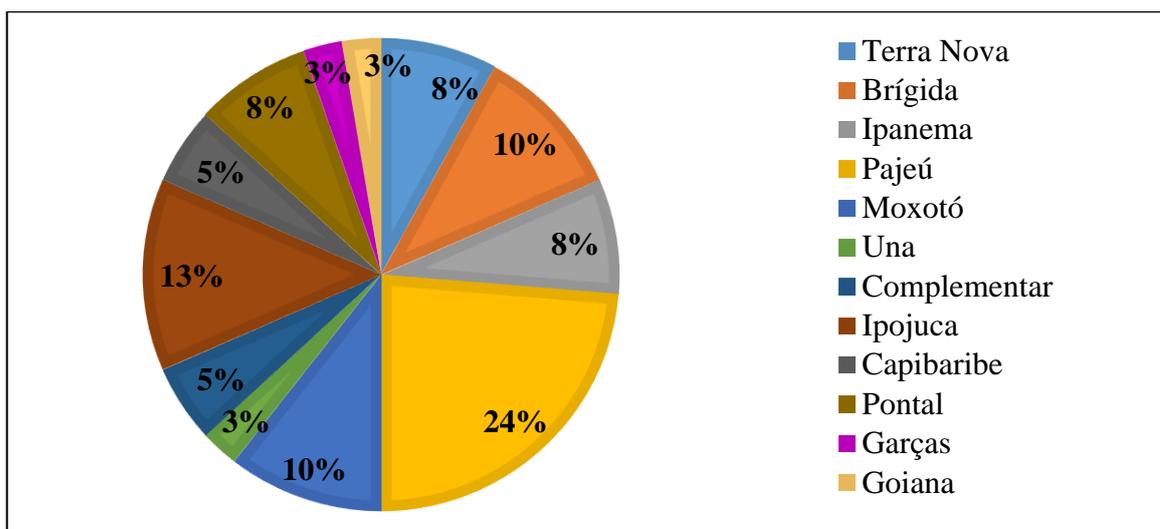


Fonte: Adaptada de UFPE e DNOCS (2021).

Dessa forma, nota-se que quase a metade dos reservatórios são destinados ao abastecimento humano, seguido do objetivo de combater às secas. É importante ressaltar que alguns possuem mais de uma finalidade.

Também, pôde-se verificar em quais bacias hidrográficas do estado as barragens estão situadas. Assim, segundo a Figura 46, observa-se que a maior quantidade está na bacia do rio Pajeú, que é a maior de Pernambuco, seguida da bacia do rio Ipojuca Terra Nova e Moxotó.

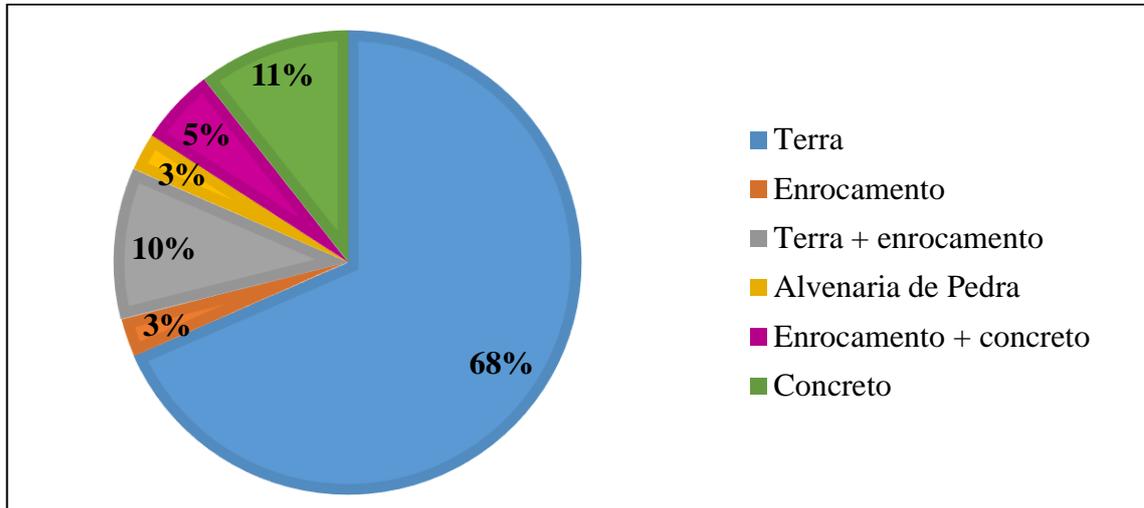
Figura 46 – Bacias que as barragens do DNOCS, em Pernambuco, pertencem



Fonte: Adaptada de UFPE e DNOCS (2021).

Por fim, tem-se os tipos dos barramentos, os quais estão categorizados na Figura 47, segundo a metodologia do Índice de Segurança de Barragem – ISB, proposto pela pesquisa de Zuffo (2005).

Figura 47 – Tipos das barragens do DNOCS, em Pernambuco



Fonte: Adaptada de UFPE e DNOCS (2021).

Então, é possível perceber que a maior parte dos barramentos são de Terra, com quantidade que supera todos os outros tipos juntos. A segunda maior quantidade presente no estado é de Concreto. Os menores números são dos tipos Alvenaria de pedra e Enrocamento.

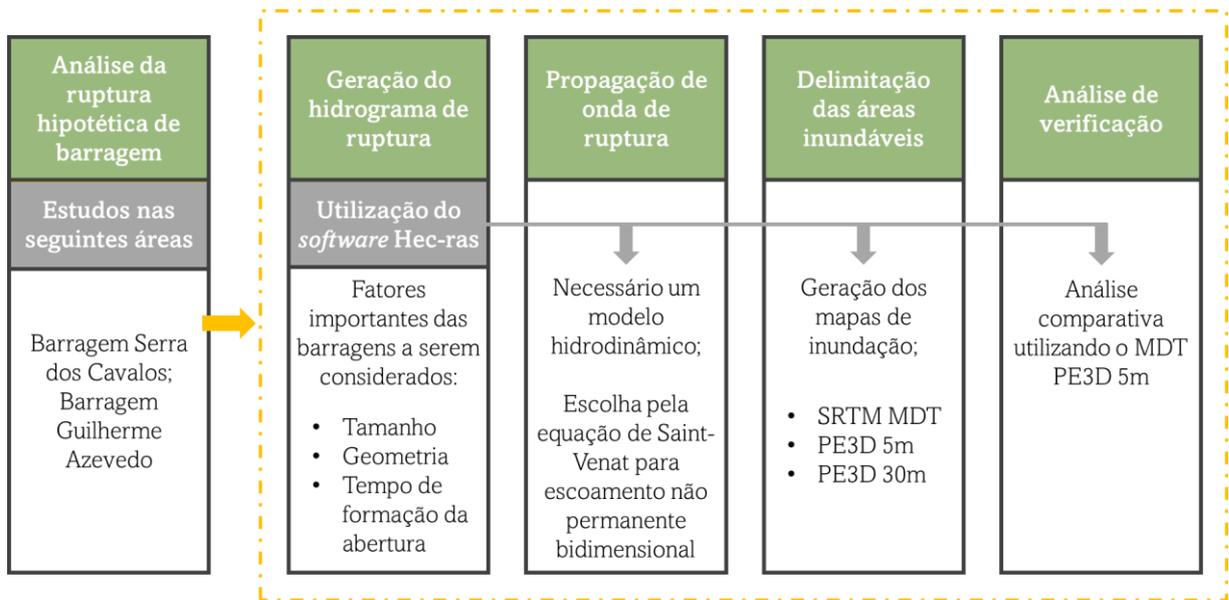
4.2 Procedimentos para obtenção dos resultados

Nesse item serão apresentados os procedimentos que possibilitaram alcançar os objetivos delineados na presente pesquisa. Para tanto, tem-se (a) a Geração da mancha de inundação, que se divide em etapas, e (b) Avaliação de Segurança de Barragens.

4.2.1 Geração das manchas de inundação

O percurso metodológico dessa etapa acontece conforme é retratado na Figura 48, que traz um resumo de todo o processo.

Figura 48 – Percurso Metodológico para geração da mancha de inundação



Fonte: O Autor (2023).

4.2.1.1 Hidrograma de ruptura

O comportamento do hidrograma de ruptura dependerá do tamanho, da geometria e do tempo de formação da abertura na barragem. Dessa forma, esses parâmetros estão diretamente relacionados ao tipo de barragem que está sendo avaliado e de como ocorrerá a ruptura (ALGHAZALI & ALHADRAWI, 2012). Destaca-se, através de dados históricos, que acidentes com barragens de concreto são mais sujeitas a problemas estruturais ou de fundação, ao passo que barragens de terra, a erosão interna e galgamento. Por isso, a formação da abertura da brecha em barramentos de concreto normalmente é brusca e em barramentos de terra geralmente é progressivo, chegando a levar horas (COLLISCHONN, 1997).

Disso, é importante salientar que a análise do pior cenário acontece quando se considera a ruptura total e brusca do barramento inteiro. Na elaboração do PAE, pode-se utilizar esse caso em busca de melhor segurança do ambiente a jusante.

Arelado a isso, destaca-se que existem duas opções para o tipo de rompimento no HEC-RAS, que são galgamento (*overtopping*) e *pipping*. O galgamento é o método para rompimentos que tem sua gênese no topo e o *pipping* é o método para rompimentos que se originam em qualquer elevação do barramento. Dessa forma, as duas opções distinguem somente por indicar o crescimento da brecha desde o local de início da falha. Segundo o USACE (2014), o tamanho final e o tempo de formação da brecha demonstram maior importância do que onde ela é originada.

Também é possível selecionar o gatilho da ruptura, isto é, o motivo pelo qual a ruptura ocorreu, podendo ser acionado pela elevação do reservatório, da elevação do reservatório mais duração ou do exato tempo do rompimento. Os coeficientes de descarga são inseridos para que seja determinada a vazão quando o método de falha for galgamento (*Weir Coefficient*) ou *pipping* (*Pressure Flow Coefficient*). A recomendação do USACE (2014) para barragens de concreto de gravidade é que seja usado o coeficiente entre 2,60 e 3,00 no rompimento por galgamento e entre 0,50 e 0,60 no rompimento por *pipping*, enquanto para barragens de terra é que seja usado o coeficiente entre 2,60 e 3,30 no rompimento por galgamento e entre 0,50 e 0,60 no rompimento por *pipping*.

Além disso, o USACE (2014) reuniu quatro diretrizes de Agências Federais dos Estados Unidos da América para delimitação de possíveis intervalos de valores para características de violação em barragem de terra/enrocamento e concreto em gravidade. Das diretrizes postas, a do Serviço Meteorológico Nacional (*National Weather Service – NWS*) detém a menor amplitude de tempo de ruptura e recomenda inclinação lateral da abertura igual a zero, largura da abertura menor ou igual a metade do comprimento da crista da barragem (L) e tempo de falha entre 0,10 e 0,20 horas.

No HEC-RAS, em *Edit > Geometric Data > SA/2D Area Conn > Breach (Plan Data)*, considera-se a ruptura da ombreira da barragem e é realizada a inserção dos dados do barramento.

4.2.1.2 Propagação da onda de ruptura

A propagação da onda de ruptura é verificada através de um modelo hidrodinâmico que realize a simulação de como será o hidrograma de ruptura nos pontos a jusante da barragem a serem inundados. Para Morris (2020), há cinco pontos essenciais que precisam ser considerados no modelo para que haja boa estimativa, são eles: hora de chegada da água da enchente; pico do nível da água – extensão da inundação; hora do pico do nível da água; profundidade e velocidade da água de inundação (permitindo a estimativa do potencial de danos), e, a duração da inundação.

O HEC-RAS possui esses parâmetros na modelagem e, assim, foram empregados. Ele permite a propagação de onda de ruptura por meio de três métodos: Equações completas de Saint Venant para escoamento não permanente unidimensional; Equações completas de Saint Venant ou as equações das Ondas Difusas para escoamento não permanente

bidimensional; e, Equação da continuidade para relacionar a vazão afluente, vazão efluente e a variação do volume do reservatório ao decorrer do tempo, conhecido como Método de Puls.

Segundo o USASE (2014), as equações completas de Saint Venant para escoamento não permanente são colocadas como a metodologia mais precisa e, com isso, indica-se para a análise do rompimento de barragem sempre que possível. Um desses principais aspectos é que ela possibilita considerar a inclinação da superfície da água para quando o hidrograma de ruptura chega no reservatório e no decorrer do rompimento da barragem. Destarte, foi a adotada na análise.

As equações completas de Saint Venant contemplam a equação da continuidade e da quantidade de movimento para gravidade, atrito, pressão e inércia. Pela orientação do USACE (2016), para galgamentos em planícies de inundações largas, onde a água pode escoar em várias dimensões, emprega-se uma análise bidimensional. Para uma aplicação bidimensional, as equações podem ser descritas pela Equação 1 da conservação da massa e Equação 2 e Equação 3 da conservação da quantidade de movimento, apresentadas no item 3.4.1.

O reservatório (*Storage Area*), a área de inundação (*2D Flow Area*), a conexão entre o reservatório e a área de inundação (*Storage Area/2D Area Connection*) e o local de condição de contorno (*Storage Area/2D Area Boundary Condition Lines*), tido como o local de saída a jusante da área de inundação, foram criados em *Edit > Geometric Data > Tools*. A área de inundação foi discretizada em *Edit > Geometric Data > 2D Flow Areas > Generate Computation Points on Regular Interval With All Breaklines* com espaçamento de pontos (*Computation Point Spacing*) de 10 m nas direções.

O coeficiente de rugosidade é definido como a resistência de canais ou rios à vazão. No HEC-RAS, essa rugosidade é representada pelo coeficiente de Manning. Com base no levantamento de coeficientes de Manning realizado por Barnes (1967) e levando em conta as características da área de estudo, no HEC-RAS, em *Edit > Geometric Data > 2D Flow Areas > Default Manning's n value*, foi considerado o coeficiente de Manning do rio como sendo 0,160.

As informações da seção transversal da barragem foram colocadas no HEC-RAS em *Edit > Geometric Data > SA/2D Area Conn > Weir/Embarkment*, sendo: a largura do coroamento (*Weir Width*); o coeficiente de descarga utilizado (*Weir Coefficient*); a cota do coroamento (*Elevation*); e, a superfície do coroamento em formato plano (*Broad Crested*).

A respeito das condições de contorno da simulação, foram inseridas no HEC-RAS em *Edit > Unsteady Flow Data > Boundary Condition*. Para a conexão entre o reservatório e o barramento, a condição de contorno utilizada foi hidrograma de cheia (*Flow Hydrograph*).

Para essa condição de contorno, foi gerado o hidrograma de cheia através das equações de regressão do Método de Froehlich (1995), conforme indicação do manual para simulação de rompimento de barragens utilizando o HEC-RAS, intitulado “*Using HEC-RAS for Dam Breack Studies*”, do *US Army Corps of Engineers*.

Froehlich utilizou 63 conjuntos de barragens de terra, terra zoneada, terra com parede central (ou seja, argila) e enrocamento para desenvolver como um conjunto de equações para prever a largura média de ruptura, inclinações laterais e tempo de falha (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2014).

Para a geração do hidrograma de cheia, informações como a largura, altura e volume do barramento são necessárias para que, posteriormente, sejam obtidos o tempo de abertura da brecha e a vazão de pico, por meio das equações do método de Froehlich (1995), conseguindo construir, por fim, o hidrograma.

Destaca-se que o hidrograma de cheia para a Barragem Guilherme Azevedo (e Barragem Jaime Nejaím – em cascata) foi estabelecido pelo Método Offline, isto é, cada hidrograma de cheia foi gerado separadamente para os barramentos através do Método de Froehlich (1995), depois foi feita a modelagem hidrodinâmica para o rompimento da Barragem Guilherme Azevedo afim de produzir o seu hidrograma de ruptura, o qual foi somado ao hidrograma de cheia da Barragem Jaime Nejaím, assim, resultado no hidrograma de cheia que foi utilizado como condição de contorno a montante desta barragem.

Por sua vez, entre o barramento e a área de inundação, a condição de contorno utilizada foi a suposição de profundidade normal (*Normal Depth*). Nela, admite-se que o rio possui escoamento uniforme nessa seção, possibilitando uma declividade da linha de energia e o HEC-RAS, de maneira automática, determinará a profundidade usando a equação de Manning. A declividade da linha de energia foi aproximada como sendo a inclinação média do trecho final do leito dos riachos correspondentes as barragens em questão, segundo a área de inundação de cada uma.

Em outras palavras, essa condição de contorno é a declividade a jusante do barramento, em que é dada pelo quociente entre a diferença de altitude do ponto mais alto (imediatamente a jusante do barramento) e do ponto mais distante até onde se está considerando a análise, pela distância entre esses dois pontos.

Como o hidrograma de ruptura só é gerado após a simulação, no HEC-RAS, em *Run > Unsteady Flow Analysis*, o modelo foi computado com um passo de tempo (*Computation Interval*) estimado em 0,10 segundos. O intervalo de tempo de saída do hidrograma (*Hydrograph Output Interval*), do mapeamento (*Mapping Output Interval*) e do detalhamento

(*Detailed Output Interval*), foi determinado como igual a 1 minuto. A janela de simulação (*Simulation Time Window*) utilizada foi de 8 horas e 10 horas, para a Barragem Serra dos Cavalos e Barragem Guilherme Azevedo (e Barragem Jaime Nejaim – em cascata), respectivamente, segundo o tempo considerado para a geração do hidrograma de cheia inicial.

4.2.1.3 Áreas inundáveis

A confecção dos mapas de inundação foi realizada utilizando o MDT SRTM, com resolução espacial de 30 metros, e o MDT PE3D, com resolução espacial de 30 metros (PE3D 30 m) e 5 metros (PE3D 5 m).

4.2.1.4 Análise de verificação

Para a verificação de consistência dos resultados, utilizou-se o MDT PE3D 5m e os parâmetros descritos anteriormente na metodologia, visando comparar as manchas de inundação geradas por malhas discretizadas com espaçamentos de pontos, nas direções x e y, de 50 x 50m, 75 x 75m e 100 x 100m e, para a Barragem Serra dos Cavalos, tempos de formação da brecha de 2,0h e 2,5h e coeficientes de Manning de 0,100 e 0,200, com os utilizados anteriormente, 1,5h e 0,160. Já para a Barragem Guilherme Azevedo, tempos de formação da brecha de 0,2h e 0,3h e coeficientes de Manning de 0,100 e 0,200, com os utilizados anteriormente, 0,1h e 0,160.

4.3 Avaliação de segurança de barragens

Essa análise consiste em determinar o nível de segurança das barragens do estado de Pernambuco sob jurisdição do DNOCS, apresentadas no item 4.1.2, através da aplicação do Índice de Segurança de Barragens – ISB, proposto por Zuffo (2005).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

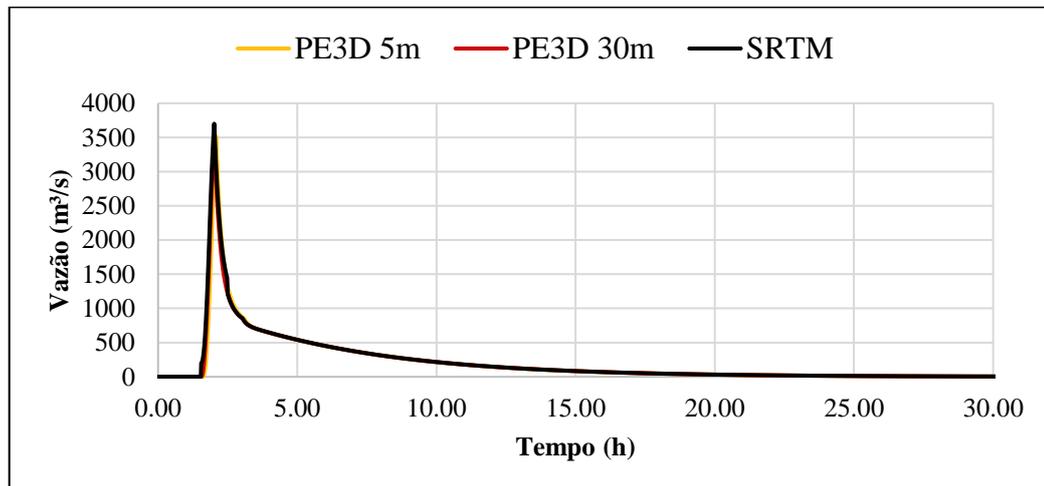
Nesse item serão apresentados os resultados obtidos na presente pesquisa.

5.1 Simulação de rompimento da Barragem Serra dos Cavalos

Nas três simulações de rompimento de barragens com os diferentes MDTs (SRTM, PE3D 30m e PE3D 5m), a ruptura da barragem ocorreu a partir de 1 hora e 37 minutos, e os hidrogramas de ruptura apresentaram valores muito próximos (Figura 49).

O hidrograma gerado a partir do MDT SRTM apresentou maior diferença dos valores de vazão, quando comparado aos hidrogramas do MDT PE3D. A vazão de pico do hidrograma do SRTM apresentou valores iguais a 3.500,85 m³/s, com tempo para atingir a vazão de pico igual a 2 hora e 2 minutos. O hidrograma do PE3D 30m apresentou a vazão de pico, bem como o tempo para atingi-lá iguais ao do MDT SRTM. O hidrograma do MDT PE3D 5m apresentou vazão de pico igual a 3.511,63 m³/s com tempo para atingir a vazão de pico sendo de 2 horas e 5 minutos. A ordem de grandeza de diferença dos valores do hidrograma foi de 1,00 m³·s⁻¹, e, por essa razão, os pontos estão sobrepostos.

Figura 49 – Hidrogramas de ruptura gerados no HEC-RAS para a barragem Serra dos Cavalos



Fonte: O Autor (2023).

A área da mancha de inundação gerada pelos MDTs PE3D 5 m, PE3D 30 m e o SRTM foram, respectivamente: 0,562 km²; 0,647 km² (aumento de 15,10% em relação ao PE3D 5 m) e 0,475 km² (redução de 15,50% em relação ao PE3D 5 m). Essa diferença

numérica pode ser expressiva para a elaboração do PAE, tendo em vista que uma residência pode ficar de fora da zona de aplicação do plano.

Essa análise, em partes, é contrária a realizada por Cook e Merwade (2009), os quais concluíram que para uma certa vazão e geometria, a área de inundação diminui com o aumento da resolução espacial e precisão vertical da base topográfica, o que se verificou na área de inundação para o PE3D 5m em relação a do PE3D 30m (o primeiro tem maior precisão e apresentou menor área de inundação, ao passo que o segundo tem menor precisão e apresentou maior área de inundação). Entretanto, ocorreu o contrário para a área do PE3D 5m quando comparado com o SRTM (o primeiro tem maior precisão e apresentou maior área de inundação do que o segundo), sendo que a resolução desse MDT também de é 30m.

Analogamente, Podhorányi *et al.* (2013), ao analisar cenários inundados com a aplicação de três MDTs com resoluções distintas (1, 5 e 10m), notaram que os resultados mostraram que a área inundada para o MDT de menor resolução foi superior ao de maior resolução. Nesse caso, tem-se semelhança com o resultado obtido neste trabalho, já que área da mancha gerada utilizando o PE3D 5m foi menor do que a PE3D 30m e, embora maior do que a área empregando o SRTM, a diferença não foi tão expressiva. Possivelmente, essa diferença ocorre devido a menor previsão da resolução do SRTM.

5.1.1 Modelos digitais do terreno

A mancha de inundação gerada pelo SRTM apresenta muitas discontinuidades, diferentemente do PE3D 30m, embora ambos tenham a mesma resolução espacial (Figuras 50 e 51).

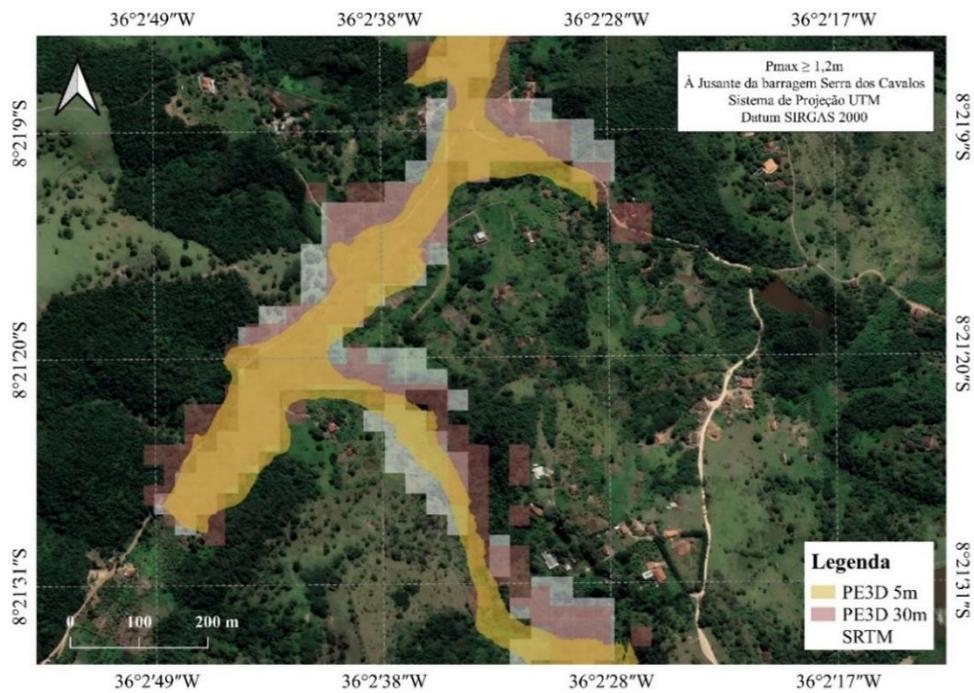
Nas três simulações, a mancha de inundação atingiu o limite estabelecido (a 3 km da face a jusante da barragem) após 1 hora e 45 minutos, 1 hora e 59 minutos e 1 hora e 05 minutos, para os MDTs SRTM, PE3D 30m e PE3D 5m, respectivamente.

À verificação do perigo resultante da inundação fez uso dos limites propostos por Ribeiro Neto *et al.* (2016) para profundidade da água e velocidade da água referentes a zona de perigo alto. Quanto a profundidade da água, os limites vão de 0 a 0,6 m (perigo baixo), de 0,6 a 1,2 m (perigo médio) e maior que 1,2 m (perigo alto). Já em relação a velocidade da água, os limites são de 0 a 0,6 m/s (perigo baixo), de 0,6 a 1,2 m/s (perigo médio) e maior que 1,2 m/s (perigo alto).

Nos resultados para Pmax e Vmax, respectivamente, constata-se que existe uma diferença com significância nos limites externos das regiões, ocorrendo porque os pixels

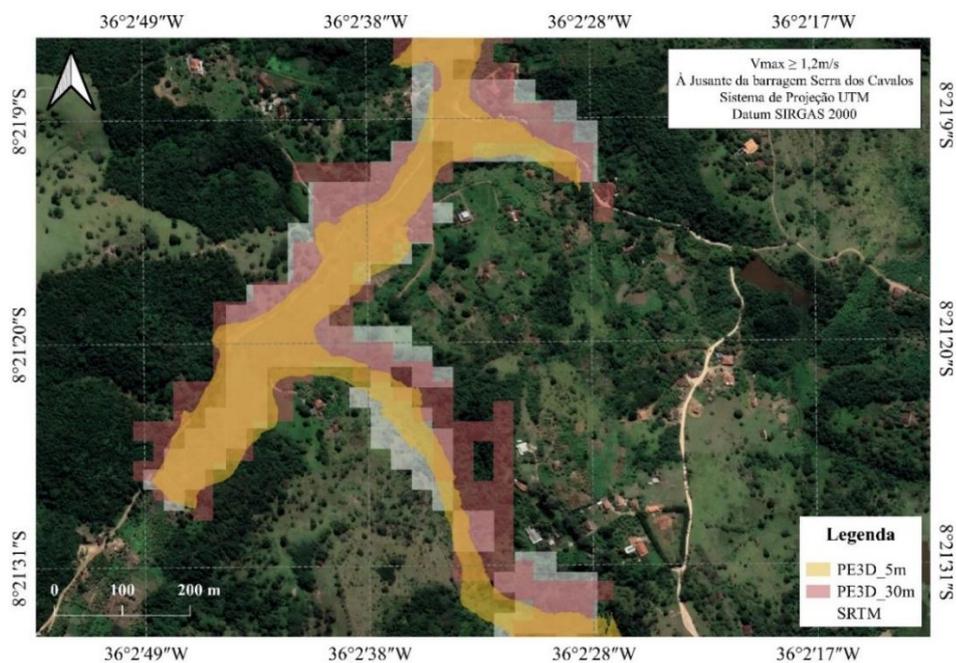
gerados para o SRTM são maiores, então, dá-se origem a bordas visivelmente quadriculares, ao passo que os pixels gerados para o PE3D 5 m e PE3D 30m são menores, assim, tem-se bordas exteriores mais tênues.

Figura 50 – Mapa, a jusante da Barragem Serra dos Cavalos, de valores da profundidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m, utilizando diferentes MDT's



Fonte: O Autor (2023).

Figura 51 – Mapa, a jusante da Barragem Serra dos Cavalos, de valores da velocidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m/s, utilizando diferentes MDT's



Fonte: O Autor (2023).

Trabalhos como o de Lima *et al.* (2021) também teve o objetivo de estudar manchas de inundação geradas pelo rompimento hipotético de barragens com diferentes MTDs, os quais constataram que houve diferenças nas dimensões das áreas, sendo a mancha de inundação mais representativa correspondente a de maior resolução.

Miliaresis e Paraschou (2005), Valeriano e Abdon (2007) e Costa *et al.* (2010), destacam que métodos com resoluções altas quando comparados a métodos tradicionais, como o *Shuttle Radar Topography Mission* – SRTM, que tem resolução de 30 m, tem-se que este último possui certo nível de incerteza para as elevações, podendo impactar, especialmente, estudos referentes aos recursos hídricos.

Mendes *et al.* (2022) destacaram que, ao se trabalhar com MDTs de alta resolução (LiDAR), dispõe-se de maiores detalhamentos nas geometrias sem generalizações do relevo e da topografia, estando relacionado diretamente com modificações na área inundada.

5.1.2 Discretização da malha

Por meio da análise de sensibilidade, possibilitou averiguar que a malha discretizada com diferentes espaçamentos de pontos influencia na amplitude do mapa das zonas de perigo para profundidade e velocidade da água. Notou-se que quanto mais discretizada é a malha, menor é a extensão do mapa para Pmax (Figura 52) e para Vmax (Figura 53). Essa diferença na extensão é essencialmente à elaboração do PAE, com uma influência que ocorre sobretudo para as equações de Saint-Venant 2D poderem ser aplicadas em mais pontos, aprimorando a precisão espacial.

A malha 50 x 50m gerou 1.085 células e teve um tempo de processamento de 2 minutos e 06 segundos, a malha 75 x 75m gerou 512 células e teve tempo de processamento de 2 minutos e 06 segundo e a malha 100 x 100m gerou 296 células e teve tempo de processamento de 2 minutos e 17 segundos. O tempo no qual a onda de inundação atingiu o limite estabelecido também sofreu alteração, sendo para a malha 50 x 50m, 75 x 75m e 100 x 100m, respectivamente, 1 hora e 05 minutos, 1 hora e 01 minutos e 1 hora e 02 minutos.

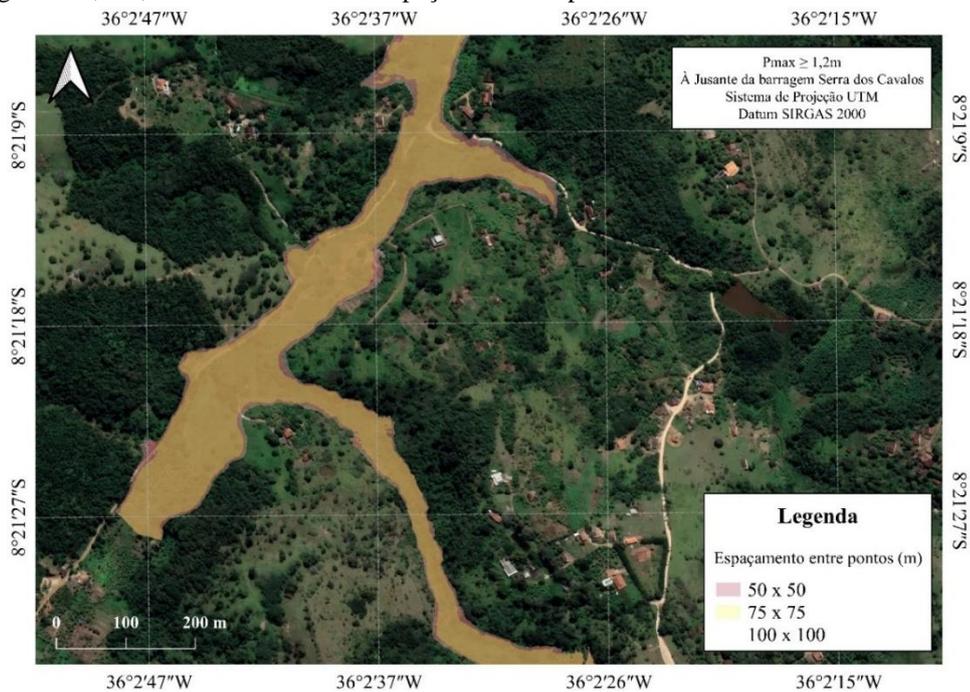
Esses resultados estão relacionados com os que foram relatados por Jarihani *et al.* (2015), os quais expressaram mudança limitada nas dimensões de malhas que vão de 30m para cerca de 120m, com um crescimento gradual para 250 m que então teve aumento ainda superior com tamanhos de grades maiores.

De maneira semelhante, neste trabalho, pode-se notar que tanto o tempo de processamento quanto o tempo no qual a onda de inundação atingiu o limite estabelecido

sofreram alterações, mas, de forma geral, minimamente. Porém, mesmo a variação tendo sido muito pequena, o tempo de processamento foi maior para a malha menos discretizada, de 100m, e menor para as outras duas malhas mais discretizadas.

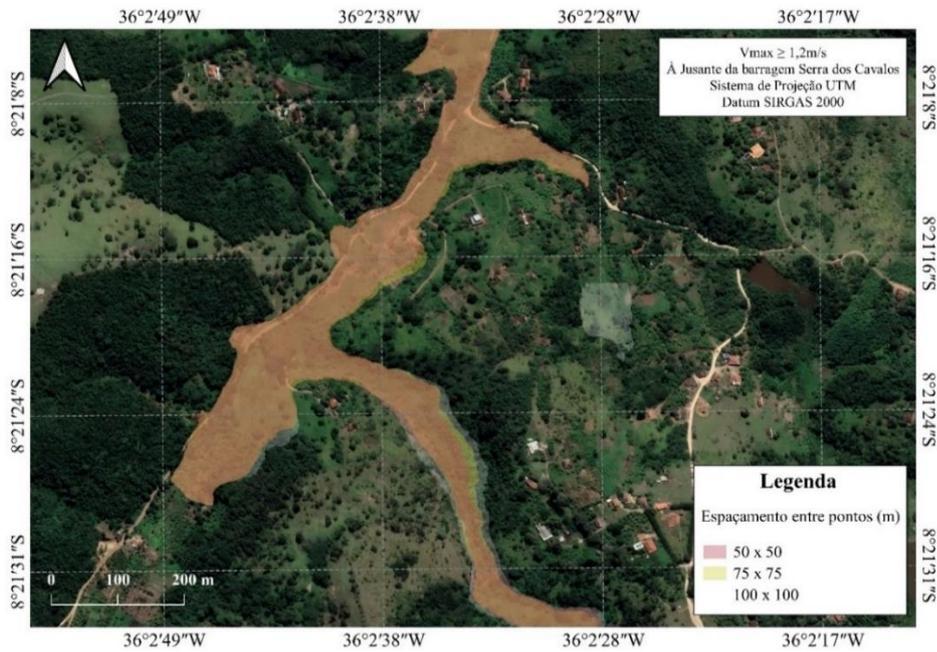
No trabalho de Ginting *et al.* (2021, p. 1), “observou-se que o uso do tamanho da grade computacional menor que 50 m não produz mais diferenças significativas do limite máximo de inundação, profundidade máxima, velocidade máxima e profundidade média”. Neste estudo, é possível ver um comportamento semelhante ao que os autores mencionaram, uma vez que depois da discretização da malha de 100 a 50m, ocorre pouca variação, até mesmo no tempo de processamento computacional da malha de 75 a 50m não ocorre qualquer variação.

Figura 52 – Mapa, a jusante da Barragem Serra dos Cavalos, de valores da profundidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m, utilizando diferentes espaçamentos de pontos utilizados na malha discretizada



Fonte: O Autor (2023).

Figura 53 – Mapa, a jusante da Barragem Serra dos Cavalos, de valores da velocidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m/s, com diferentes espaçamentos de pontos utilizados na malha discretizada

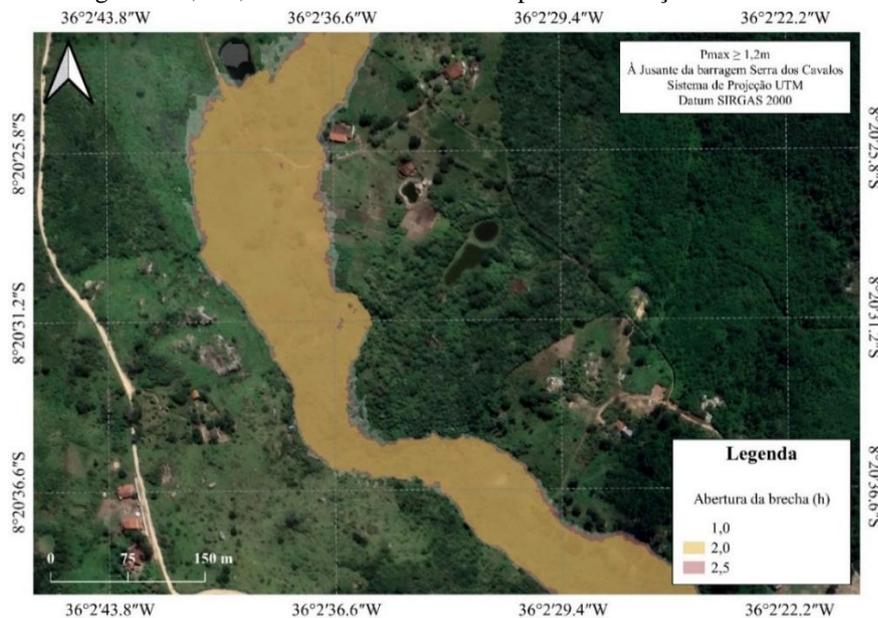


Fonte: O Autor (2023).

5.1.3 Tempo de formação da brecha

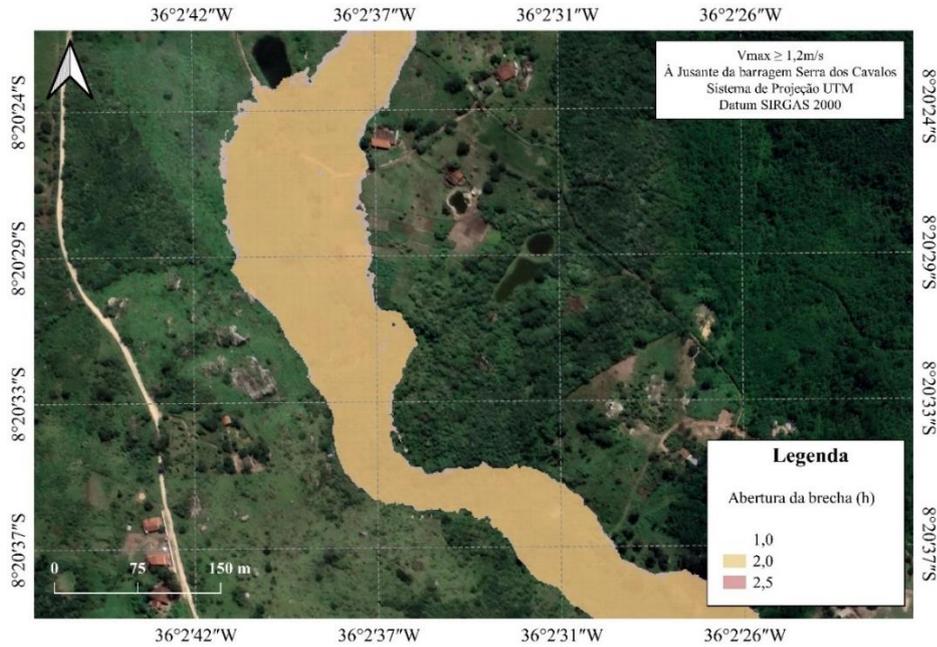
A respeito da análise de sensibilidade dos diferentes tempos de abertura total da brecha, constatou-se que o parâmetro não causa alterações consideráveis quanto a extensão do mapa de perigo (Figuras 54 e 55).

Figura 54 – Mapa, a jusante da Barragem Serra dos Cavalos, de valores da profundidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m, utilizando diferentes tempos de formação da brecha



Fonte: O Autor (2023).

Figura 55 – Mapa, a jusante da Barragem Serra dos Cavalos, de valores da velocidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m/s, utilizando diferentes tempos de formação da brecha



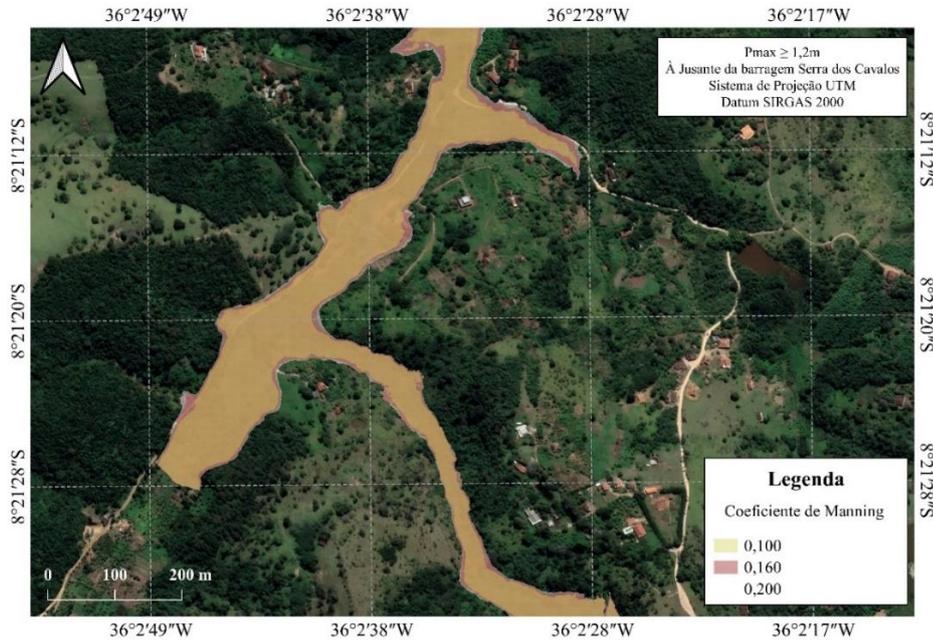
Ikromi e Wardhana (2020), ao analisarem tempos de formação de brecha de 1h, 2h, 3h, 4h e 5h, obtiveram resultados que revelaram que um tempo de formação de brecha de 1 horateve o maior efeito de inundação, isto é, a simulação empregando um tempo de formação de brecha de 1 hora produziu o pico de inundação mais alto. Os mapas de inundação do rompimento de barragem não apresentaram diferenças significativas em suas áreas. Os resultados apresentados neste trabalho foram semelhantes aos obtidos por Ikromi e Wardhana (2020).

5.1.4 Coeficientes de Manning

A partir da sensibilidade dos diferentes coeficientes de Manning, observou-se que esse parâmetro ocasionou modificações na extensão do mapa de perigo, ainda que não tão significativas (Figura 56 e 57). A amplitude dos valores de profundidade e velocidade máximas sofrem um maior impacto. O tempo para a onda de cheia atingir o limite estabelecido sofreu diferenças significativas, sendo 56 minutos, 1 hora e 05 minutos e 1 hora e 05 minutos, para, respectivamente, os coeficientes de Manning de 0,100, 0,160 e 0,200.

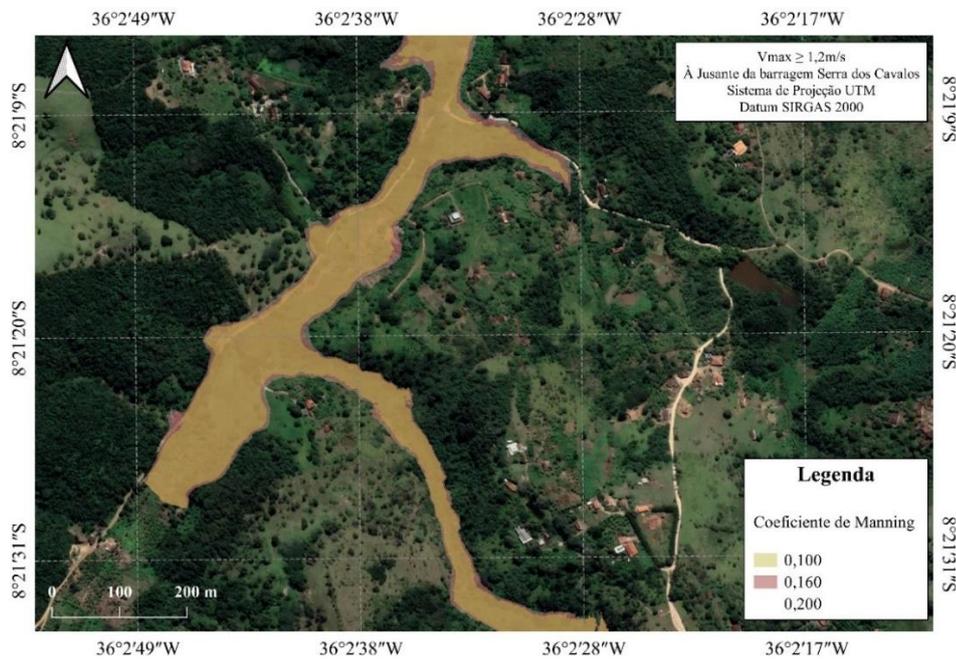
Analisando a relevância do parâmetro nos resultados adquiridos e atentando ao fato de que em propagações de ondas de cheia o valor do coeficiente pode aumentar abruptamente, orienta-se uma realização futura de calibração.

Figura 56 – Mapa, a jusante da Barragem Serra dos Cavalos, de valores da profundidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m, utilizando diferentes Coeficientes de Manning



Fonte: O Autor (2023).

Figura 57 – Mapa, a jusante da Barragem Serra dos Cavalos, de valores da velocidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m/s, utilizando diferentes Coeficientes de Manning



Fonte: O Autor (2023).

Segundo Qin e Wu (2020), o coeficiente de Manning varia temporalmente, especialmente devido a variação da profundidade do fluxo, entretanto a variação sofrida por esse fator ainda é pouca, pois ocasiona uma mudança na profundidade da água, aumentando ou diminuindo o coeficiente em menos de 20% a 30%.

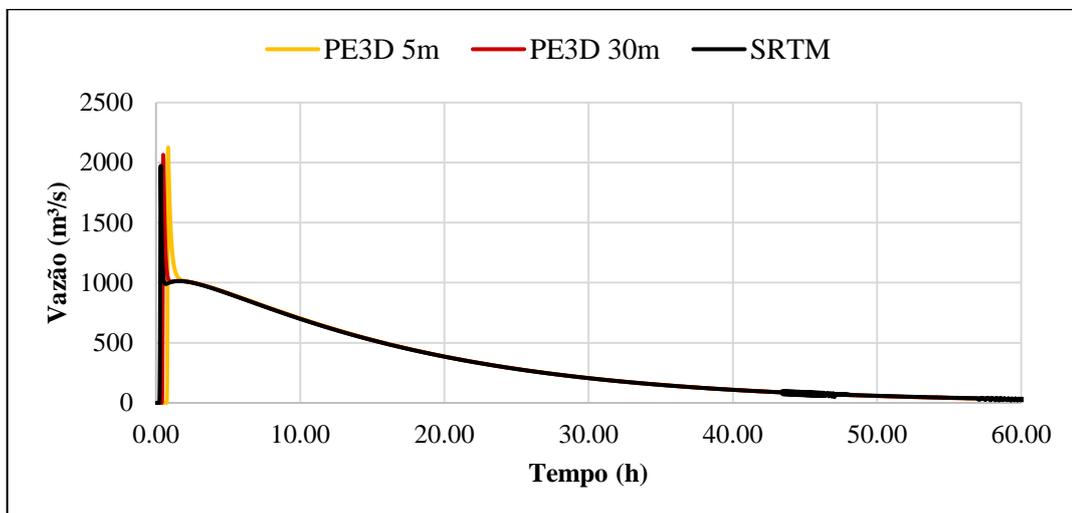
Esse comportamento corrobora com o comportamento observados nas manchas de inundação para os diferentes coeficientes de Manning aqui exibidos, uma vez que mesmo tentos variações nas áreas dos mapas, não são tão significativas, destacando que a profundidade em cada caso apresenta semelhança.

Por fim, os hidrogramas gerados a partir da análise de consistência resultaram em curvas distintas, conforme a Figura 49 apresentada no início do item 5.1, porque o valor de vazão máxima média das análises foi de 3.504,44 m³/s (desvio padrão de 5,08 m³/s) e o menor tempo para o hidrograma atingir a vazão de pico foi igual, sendo 2 horas e 2 minutos.

5.2 Simulação de rompimento da Barragem Guilherme Azevedo

Nas três simulações de rompimento de barragens com os diferentes MDTs (SRTM, PE3D 30m e PE3D 5m), a ruptura da barragem ocorreu a partir dos 14 minutos, e os hidrogramas de ruptura apresentaram valores muito próximos (Figura 58).

Figura 58 – Hidrogramas de ruptura gerados no HEC-RAS da barragem Guilherme Azevedo



Fonte: O Autor (2023).

O hidrograma gerado a partir do MDT SRTM expôs maior diferença dos valores de vazão, quando comparado aos hidrogramas do MDT PE3D. A vazão de pico do hidrograma do SRTM teve valor igual a 1.972,96 m³/s, com tempo para atingir a vazão de pico igual a 20 minutos. O hidrograma do PE3D 30m apresentou vazão de pico igual e 2.064,49 m³/s, com tempo para atingir a vazão de pico igual a 30 minutos. O hidrograma do MDT PE3D 5m exibiu vazão de pico igual a 2.125,19 m³/s, com tempo para atingir a vazão de pico sendo de

51 minutos. A ordem de grandeza de diferença dos valores dos hidrogramas foi de $1,60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, e, por essa razão, os pontos estão sobrepostos.

As áreas das manchas de inundação geradas pelos MDTs PE3D 5 m, PE3D 30 m e o SRTM foram, respectivamente: $0,289 \text{ m}^2$; $0,297 \text{ m}^2$ (aumento de 2,80% em relação ao PE3D 5 m) e $0,284 \text{ m}^2$ (redução de 1,70% em relação ao PE3D 5 m). Verifica-se que essa diferença numérica pode ser expressiva para a elaboração do PAE, tendo em vista que uma residência pode ficar de fora da zona de aplicação do plano. Esse comportamento é semelhante ao da Barragem Serra dos Cavalos, mas, neste caso, os valores das áreas foram bem próximos.

Nas três simulações, a mancha de inundação atingiu o limite estabelecido (a 1,7 km da face a jusante da barragem) após 1 hora e 45 minutos, 1 hora e 59 minutos e 1 hora e 05 minutos, para os MDTs SRTM, PE3D 30m e PE3D 5m, respectivamente.

À verificação do perigo resultante da inundação, utilizou-se dos limites propostos por Ribeiro Neto *et al.* (2016) para profundidade da água e velocidade da água referentes a zona de perigo alto. Quanto a profundidade da água, os limites vão de 0 a 0,6 m (perigo baixo), de 0,6 a 1,2 m (perigo médio) e maior que 1,2 m (perigo alto). Já em relação a velocidade da água, os limites são de 0 a 0,6 m/s (perigo baixo), de 0,6 a 1,2 m/s (perigo médio) e maior que 1,2 m/s (perigo alto).

5.2.1 Modelos digitais do terreno

Nos resultados para P_{\max} (Figura 59) e para V_{\max} (Figura 60), constata-se que existe uma diferença nos limites externos das regiões, ocorrendo porque os pixels gerados para o SRTM são maiores, então, dá-se origem a bordas visivelmente quadriculares, ao passo que os pixels gerados para o PE3D 5m e PE3D 30m são menores, assim, tem-se bordas exteriores mais tênues. Nota-se um deslocamento entre as áreas, visto que os MDTs apresentam distinções no terreno por causa da resolução espacial.

Figura 59 – Mapa, a jusante da Barragem Guilherme Azevedo, de valores da profundidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m, utilizando diferentes MDT's

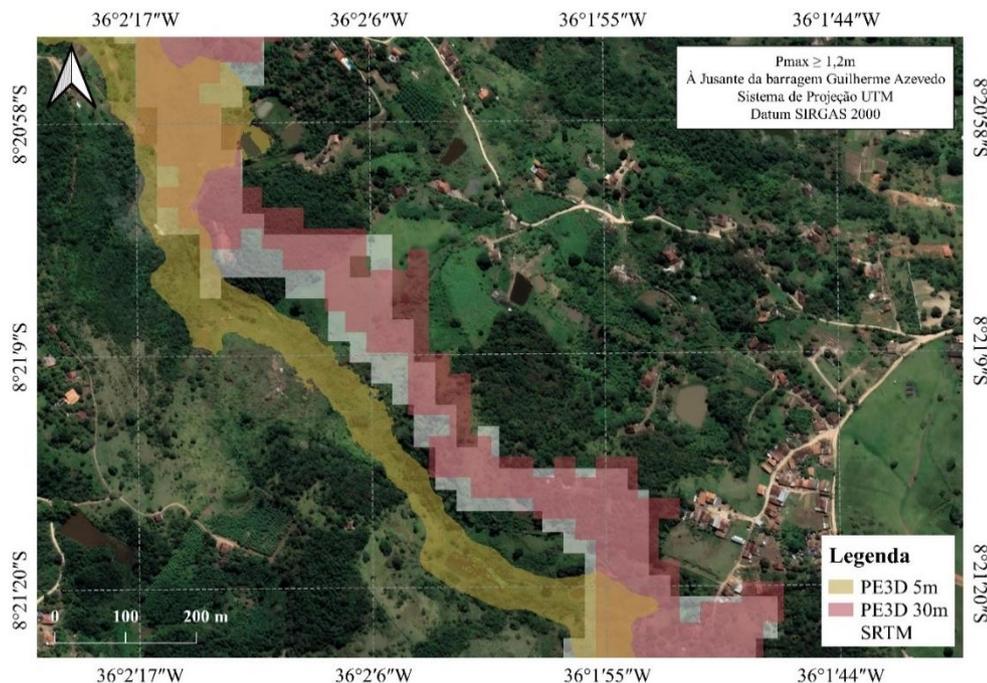
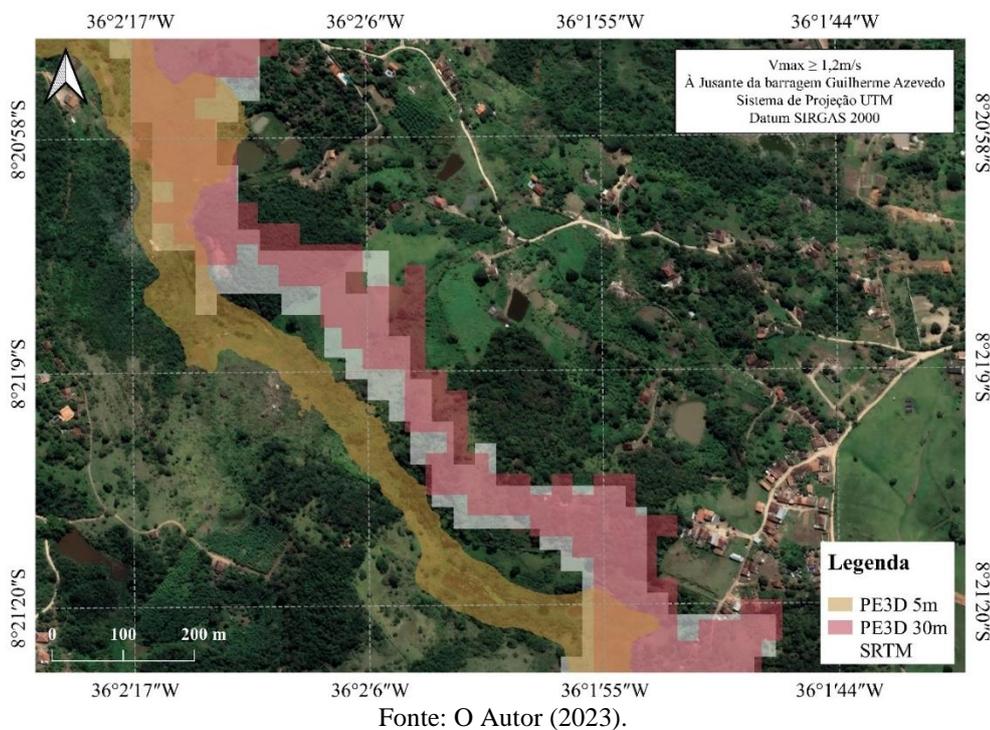


Figura 60 – Mapa, a jusante da Barragem Guilherme Azevedo, de valores da profundidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m, utilizando diferentes MDT's



Assim como ocorreu para análise da barragem Serra dos Cavalos, na barragem Guilherme Azevedo há as mesmas observações, uma vez que foi constatado que a mancha de

inundação mais representativa foi a de maior resolução, sendo, neste caso, a do PE3D 5m. Destaca-se que métodos como o *Shuttle Radar Topography Mission* – SRTM, que tem resolução de 30 m, quando comparado com os de resoluções altas, apresenta certo nível de incerteza para as elevações, podendo impactar, especialmente, estudos referentes aos recursos hídricos (MILIARESIS & PARASCHOU, 2005; VALERIANO & ABDON, 2007; COSTA *et al.*, 2010; LIMA *et al.*, 2021).

5.2.2 Discretização da malha

Por meio da análise de sensibilidade, foi possível averiguar que a malha discretizada com diferentes espaçamentos de pontos influencia na amplitude do mapa das zonas de perigo para profundidade e velocidade da água. Notou-se que quanto mais discretizada é a malha, menor é a extensão do mapa, conforme apresentado na Figura 61 para a Pmax e na Figura 62 para Vmax.

Figura 61 – Mapa, a jusante da Barragem Guilherme Azevedo, de valores da profundidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m, utilizando diferentes espaçamentos de pontos utilizados na malha discretizada

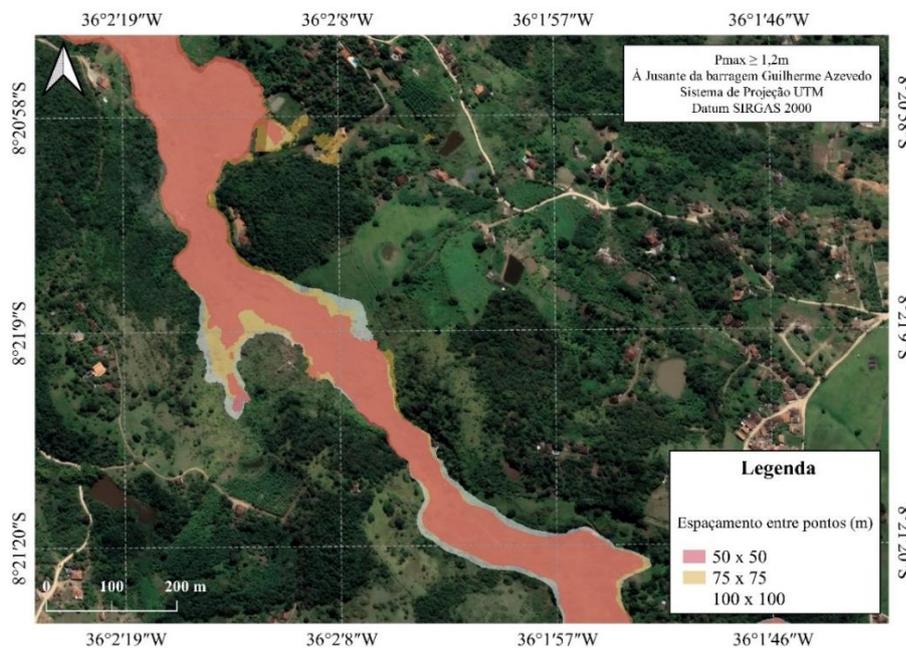
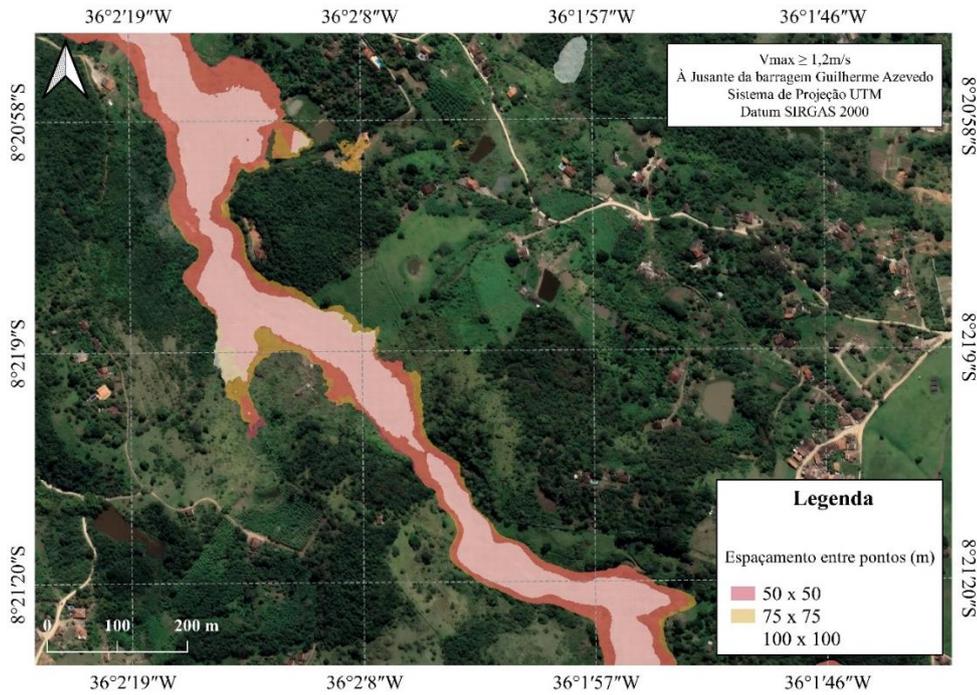


Figura 62 – Mapa, a jusante da Barragem Guilherme Azevedo, de valores da velocidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m/s, utilizando diferentes espaçamentos de pontos utilizados na malha discretizada



A malha 50 x 50m gerou 635 células e teve um tempo de processamento de 5 minutos e 51 segundos, a malha 75 x 75m gerou 293 células e teve tempo de processamento de 3 minutos e 24 segundo e a malha 100 x 100m gerou 175 células e teve tempo de processamento de 2 minutos e 07 segundos. O tempo no qual a onda de inundação atingiu a o limite estabelecido também sofreu alteração, sendo para a malha 50 x 50m, 75 x 75m e 100 x 100m, respectivamente, 1 hora e 03 minutos, 1 hora e 03 minutos e 1 hora e 04 minutos.

Esses resultados estão relacionados com os que foram relatados por Jarihani *et al.* (2015), os quais expressaram mudança limitada na malha de 30m para cerca de 120m, com um crescimento gradual para 250 m que então teve aumento ainda superior com tamanhos de grade maiores.

De maneira semelhante, aqui neste trabalho, nota-se que tanto o tempo de processamento quanto o tempo no qual a onda de inundação atingiu o limite estabelecido sofreram alterações, mas de forma geral, minimamente. Porém, mesmo a variação tendo sido muito pequena, o tempo de processamento foi maior para a malha menos discretizada, de 100m, e menor para as outras duas malhas mais discretizadas.

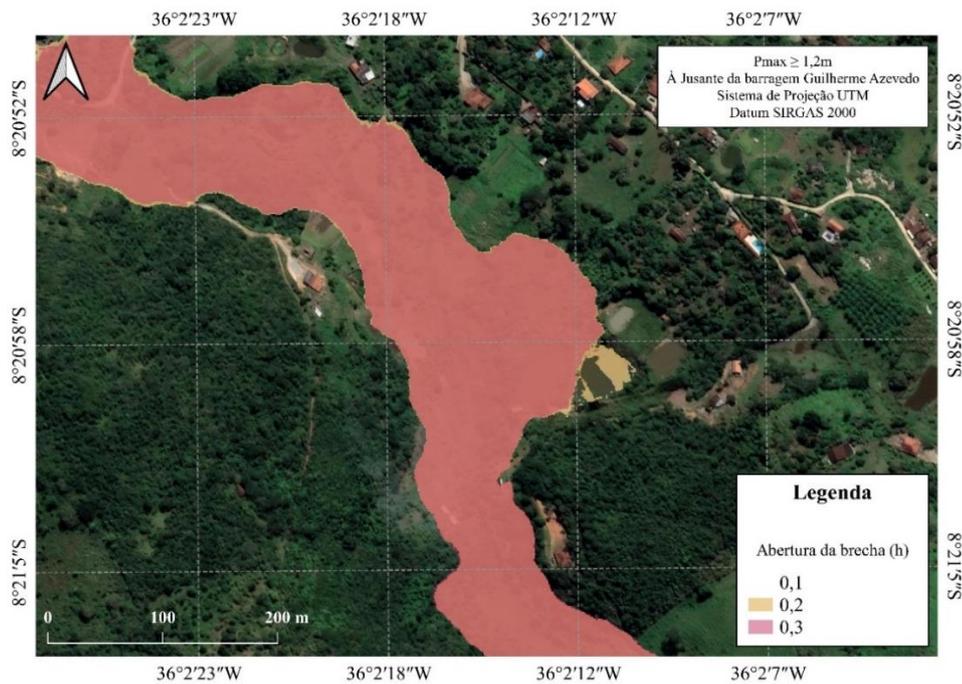
No trabalho de Ginting *et al.* (2021, p. 1), “observou-se que o uso do tamanho da grade computacional menor que 50 m não produz mais diferenças significativas do limite

máximo de inundação, profundidade máxima, velocidade máxima e profundidade média”. Para a barragem Guilherme Azevedo, bem como foi descrito para a barragem Serra dos Cavalos, é possível verum comportamento semelhante mencionado por Ginting *et al.* (2021), uma vez que depois da discretização da malha de 100 a 50m, ocorre pouca variação.

5.2.3 Tempo de formação da brecha

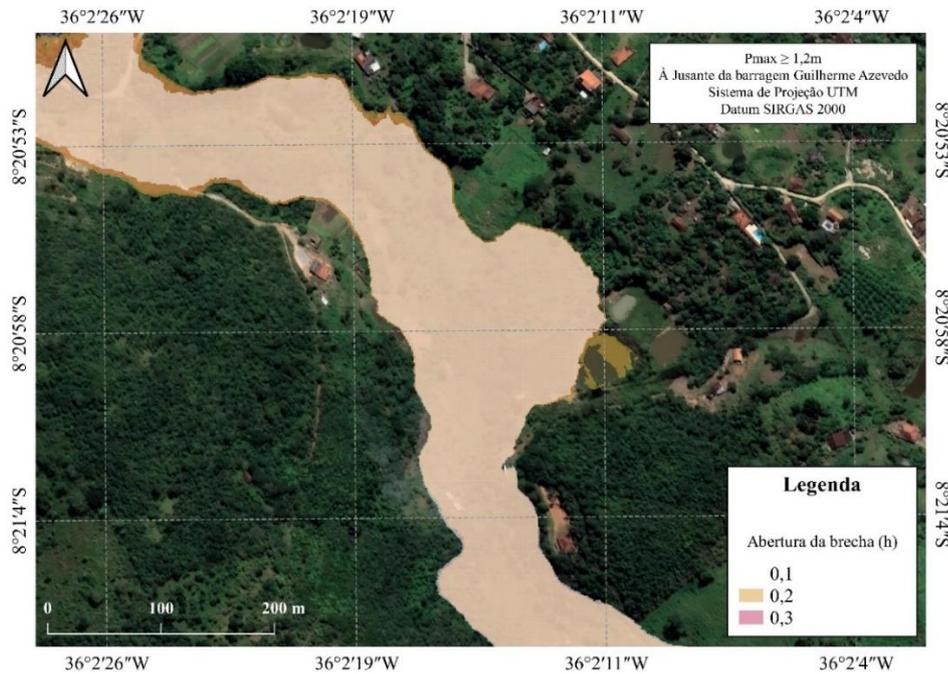
A respeito da análise de sensibilidade dos diferentes tempos de abertura total da brecha, constatou-se que o parâmetro não causa alterações consideráveis quanto a extensão do mapa de perigo (Figura 63 e 64).

Figura 63 – Mapa, a jusante da Barragem Guilherme Azevedo, de valores da profundidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m, utilizando diferentes tempos de formação da brecha



Fonte: O Autor (2023).

Figura 64 – Mapa, a jusante da Barragem Guilherme Azevedo, de valores da velocidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m/s, utilizando diferentes tempos de formação da brecha



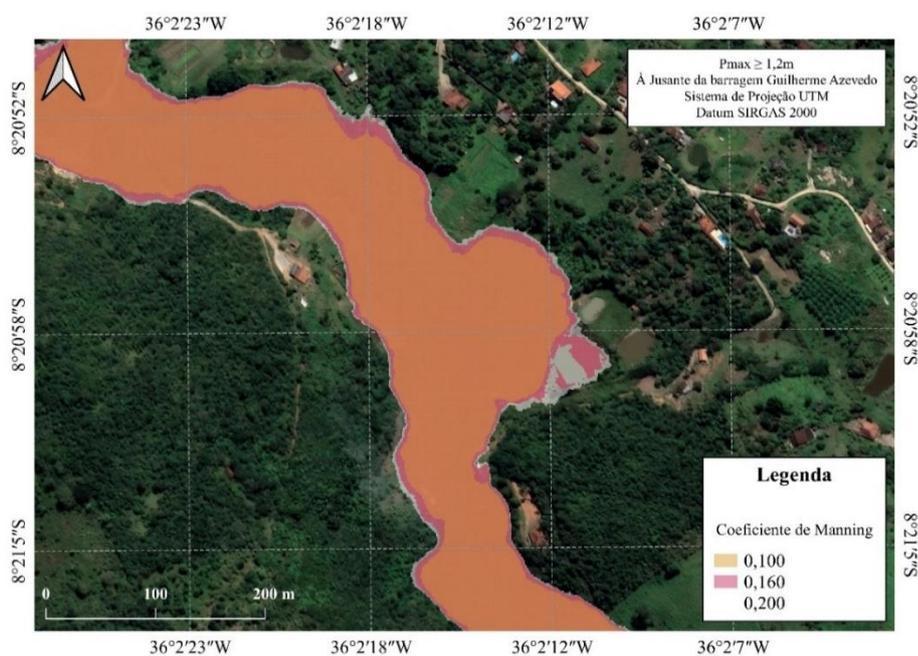
Campos *et al.* (2020) estudaram parâmetros de brecha em rupturas de barragens em cascata, em que as análises dos resultados gerais pontuaram que o tempo de formação da brecha é substancialmente inferior para a barragem a jusante e que a brecha a jusante é mais larga e alta. Conforme determinado neste trabalho pela metodologia de Froehlich (1995), o tempo de formação da brecha para a barragem a jusante, Jaime Nejaim (0,26h), foi menor do que a barragem a montante, Guilherme Azevedo (0,28h). Destaca-se que a escolha dos tempos de formação da brecha nas Figuras 63 e 64 foram em torno desses valores calculados para as barragens.

5.2.4 Coeficientes de Manning

A partir da sensibilidade dos diferentes coeficientes de Manning, observou-se que esse parâmetro ocasionou modificações na extensão do mapa de perigo (Figura 65 e 66). Além disso, a amplitude dos valores de profundidade e velocidade máximas sofrem um maior impacto. O tempo para a onda de cheia atingir o limite estabelecido sofreu diferenças significativas, sendo 1 hora e 02 minutos, 35 minutos e 1 hora e 05 minutos, para, respectivamente, os coeficientes de Manning de 0,100, 0,160 e 0,200. Analisando a relevância do parâmetro nos resultados adquiridos e atentando ao fato de que em propagações de ondas

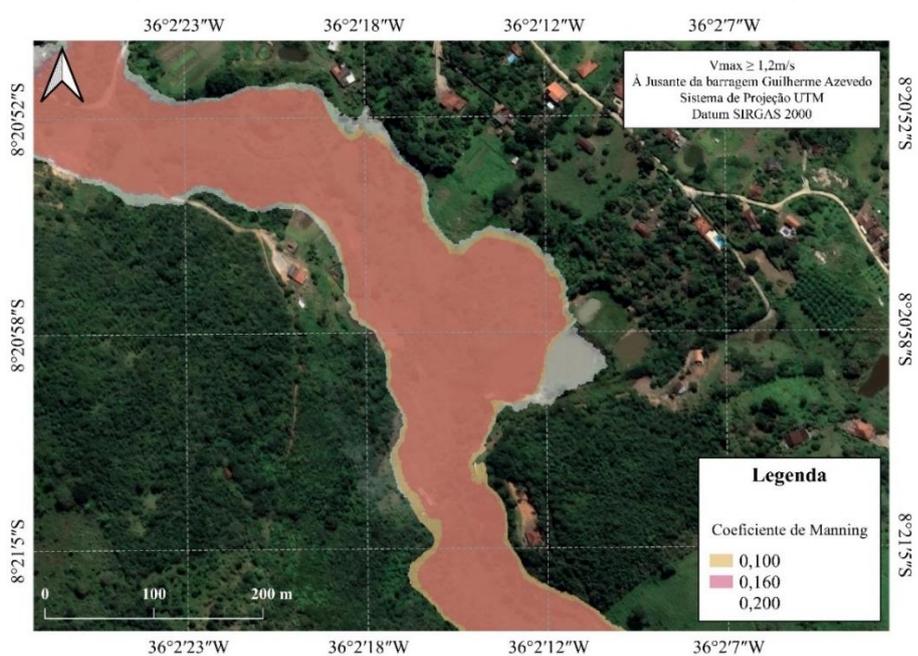
de cheia, o valor do coeficiente pode aumentar abruptamente, orienta-se uma realização futura de calibração.

Figura 65 – Mapa, a jusante da Barragem Guilherme Azevedo, de valores da profundidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m, utilizando diferentes Coeficientes de Manning



Fonte: O Autor (2023).

Figura 66 – Mapa, a jusante da Barragem Guilherme Azevedo, de valores da velocidade máxima maiores ou iguais a 1,2 m/s, utilizando diferentes Coeficientes de Manning



Fonte: O Autor (2023).

Segundo Qin e Wu (2020), o coeficiente de Manning varia temporalmente, especialmente devido a variação da profundidade do fluxo, entretanto a variação sofrida por esse fator ainda é pouca, pois ocasiona uma mudança na profundidade da água, aumentando ou diminuindo o coeficiente em menos de 20% a 30%.

Esse comportamento corrobora em partes com o comportamento observados nas manchas de inundação para os diferentes coeficientes de Manning, já que houve variações significativas nas áreas dos mapas no menor e maior valor do coeficiente em relação ao de 0,160. Isso mostra um comportamento semelhante ao que aconteceu para a barragem Serra dos Cavalos, embora tenha a diferença do tempo de chegada da onda para o coeficiente de 0,160, possivelmente ocorrendo devido a configuração de barragens em cascata e que esse valor do coeficiente foi o principal adotado para analisar o caso, sendo os outros dois valores, 0,100 e 0,200, estimativas inferior e superior, respectivamente.

Por fim, os hidrogramas gerados a partir da análise de consistência resultaram em curvas muito próximas, conforme a Figura 58 apresentada no início do item 5.1, porque o valor de vazão máxima média das análises foi de 2.054,21 m³/s (desvio padrão de 62,57 m³/s) e o menor tempo para o hidrograma atingir a vazão de pico foi igual, sendo 20 minutos.

5.3 Análise geral sobre os rompimentos hipotéticos das barragens

Devido a barragem Serra dos Cavalos ser de terra, a ruptura da brecha demora acontecer, conforme consta no hidrograma desse reservatório (Figura 49), em relação a Barragem Guilherme Azevedo, em que a ruptura da brecha ocorre de forma mais rápida, pois a estrutura final é de concreto, como visto no hidrograma desse reservatório (Figura 58).

Destaca-se que a análise do rompimento hipotético de Guilherme Azevedo acontece em cascata, já que imediatamente a jusante está a barragem de Jaime Nejaim, com estrutura de concreto. As manchas de inundação estudadas são para o seu efeito já após a barragem de Jaime Nejaim. Para tanto, a geração da mancha de inundação em cascata se procedeu pelo Método Offline, onde cada reservatório é simulado separadamente, com o hidrograma de saída do reservatório de montante sendo utilizado como condição de contorno de entrada para o reservatório imediatamente a jusante.

Outro ponto importante, é a dimensão do impacto à vida que mancha de inundação pode ajudar a prevenir. Dessa forma, as áreas que as manchas de inundação geradas pelo SRTM, PE3D 30m e PE3D 5m, para a barragem Serra dos Cavalos, atingiriam 11, 14 e 8

casas, respectivamente. Para o efeito cascata, da barragem Guilherme Azevedo à barragem Jaime Nejaím, as manchas de inundação geradas pelo SRTM, PE3D 30m e PE3D 5m, seriam atingidas 17, 21 e 7 casas, respectivamente.

5.4 Aplicação do Índice de Segurança de Barragens – ISB

Para a aplicação da metodologia ISB, utilizou-se de informações prévias sobre cada corpo d'água em estudo, através do documento que reúne os relatórios de inspeção, as fichas de inspeção e os memoriais fotográficos de inspeção das 38 barragens sob jurisdição do DNOCS, em Pernambuco, sendo válido ressaltar que esse documento foi produto do convênio firmado entre a UFPE e o DNOCS, em 2021.

É importante destacar que as informações em relação ao critério das “instalações a montante”, isto é, quanto a posição da cascata, não estavam disponíveis no documento do convênio, tendo, para tanto, que serem buscadas essas informações utilizando um mapa de Massas d'Água, disponibilizado pelo Catálogo de Metadados da ANA.

Por meio dos dados contidos nas fichas, para cada barragem, atribuiu-se um conceito para cada um dos dezoito critérios, necessários à aplicação do ISB. Cada um desses conceitos foi representado por uma nota (eixo y), que varia de 1 a 100 para os critérios contemplados, através do cruzamento do conceito conseguido para determinado critério (eixo x) e sua curva de função de valor. Disso, a nota foi elevada ao seu referido peso, isto é, o peso do critério, estabelecido mediante opiniões técnicas.

Partindo dos critérios propostos pelo ISB, bem como pela minuciosa análise do documento do convênio UFPE:DNOCS, tornou-se possível reunir as informações para avaliar os reservatórios. Os Quadros 6 e 7 trazem fichas de avaliação organizadas pelo autor desse trabalho para a posterior aplicação do índice às barragens Guilherme Azevedo e Serra dos Cavalos, respectivamente.

Quadro 6 – Ficha de avaliação da barragem Guilherme Azevedo

CRITÉRIOS AVALIADOS	Barragem Guilherme Azevedo
Importância	Ausência de clareza com a informação. Considerou o pior caso (zero pessoas).
Dimensões	Altura entre 15 e 30m e volume menor de 10 ⁶ m ³ . Considerou-se a pior situação, já que não há nota para essa classificação.
Tipo de Barragem	Barragem de Terra.
Tipo de Vertedor	Vertedor único sem comporta.
TR órgãos de segurança	Não há essa informação do Relatório/Ficha Técnica.
Instalações a jusante	Presença de árvores e arbustos.
Instalações a montante	A barragem está posicionada no terço de montante.
Idade	63 anos.
Qualidade dos dados técnicos	Indica-se a presença de parte do projeto.
Presença de vazamentos	Foram observados vazamentos e corrosão nos dispositivos de controle da entrada e saída d'água.
Presença de deformações	Pequenas deformações/afundamentos provocados pela erosão das chuvas e tráfego de veículos.
Deteriorações em aspectos gerais e taludes	Presença de afundamentos e buracos no talude montante e coroamento. Inclusive, pela avaliação do coroamento, há ameaça de transbordamento da barragem.
Erosão a jusante	Inexistente.
Condições do vertedor	A estrutura do vertedouro encontra-se aterrada e possivelmente no mesmo nível do coroamento da barragem
Eutrofização do reservatório	Não foram identificadas ocorrências de eutrofização, então se considerou a melhor situação, quando se tem "menos de 5% do lago tomado por macrófitas".
Alteração no uso do solo	Alteração significativa.
Eliminação da vegetação	Há forte presença de vegetação de pequeno, médio e grande porte.
Histórico de acidentes	Não foram disponibilizados registros.

Fonte: O Autor (2023).

Quadro 7 – Ficha de avaliação da barragem Serra dos Cavalos

CRITÉRIOS AVALIADOS	Barragem Serra dos Cavalos
Importância	Ausência de clareza com a informação. Considerou o pior caso (zero pessoas).
Dimensões	Altura entre 15 e 30m e volume menor de 10 ⁶ m ³ . Considerou-se a pior situação, já que não há nota para essa classificação.
Tipo de Barragem	Barragem de Terra.
Tipo de Vertedor	Vertedor único sem comporta.
TR órgãos de segurança	Não há essa informação do Relatório/Ficha Técnica.
Instalações a jusante	Presença de árvores e arbustos.
Instalações a montante	A posição da barragem está no terço de montante.
Idade	106 anos.
Qualidade dos dados técnicos	Indica-se presença de parte do projeto.
Presença de vazamentos	Observou-se corrosão e vazamentos na tubulação da estrutura de saída.
Presença de deformações	Deformação na galeria.
Deteriorações em aspectos gerais e taludes	Deterioração do revestimento de concreto do vertedor e da torre de tomada d'água.
Erosão a jusante	Presença de erosões na região a jusante do sangradouro.
Condições do vertedor	Existem erosões no vertedouro; observou-se que o vertedouro se encontra aterrado e em nível próximo ao coroamento da barragem.
Eutrofização do reservatório	Não foram identificadas ocorrências de eutrofização, então se considerou a melhor situação, quando se tem "menos de 5% do lago tomado por macrófitas".
Alteração no uso do solo	Com alguma alteração.
Eliminação da vegetação	Há forte presença de vegetação de pequeno, médio e grande porte.
Histórico de acidentes	Não foram disponibilizados registros

Fonte: O Autor (2023).

Logo, o valor do ISB foi calculado a partir da produtória de todas as dezoito notas, conforme item 3.8.2. Na Tabela 5 são apresentados os resultados da aplicação da metodologia ISB para as 38 barragens estudadas em Pernambuco. A classificação de segurança das barragens pelo Índice de Segurança de Barragens – ISB seguiu a recomendação do EUA – *Design of Small Dams* (1987).

Pelos resultados do ISB, 58,0% das 38 barragens, onde se aplicou a metodologia, exibiram “condição insatisfatória”, demonstrando que há fragilidades nas condições da segurança das barragens em condições normais de carga. Nesse panorama, são necessárias ações corretivas imediatas para sanar os problemas.

A outra parte das barragens analisadas, que corresponde a 42,0% do total, apresentaram “condição deficiente”, indicando que a limitação no potencial na segurança da barragem é evidente em condições de cargas normais. Para tanto, ações imediatas são indicadas, visando a correção das deficiências. Além disso, medidas de controle na operação do reservatório se tornam essenciais até que os problemas sejam resolvidos.

Também, notou-se que 63,0% das barragens não possuem documentação alguma que seja referente ao projeto, não se tem informações a respeito ou não foram disponibilizadas, ao passo que 37,0% apresentaram informações relativas ao projeto de maneira inadequadas ou insuficientes. Constatou-se a ausência de dados sobre período de retorno dos órgãos de descarga para 100% delas. Foi observado que todas as barragens possuíam as dimensões da altura do maciço e volume acumulado, bem como as idades.

As barragens identificadas em condições mais sofríveis foram: B9; B20; B23; B24; B25; e, B31. O resultado do ISB para a B23 foi de 18, o mais baixo, para B9 e B24 foi de 19, e para B20, B25 e B31 foi de 20. Os problemas encontrados na B23, que contribuíram significativamente para seu desempenho crítico, foram as deteriorações em aspectos gerais e taludes, a erosão observada a jusante, as condições dos órgãos de descarga e as instalações a jusante, onde há núcleos urbanos. Os outros barramentos exibiram, de forma geral, os mesmos problemas, modificando a intensidade de cada conceito, em sua maioria.

Tabela 5 – Resultado da aplicação da Metodologia ISB para 38 barragens de Pernambuco

Continua

CRITÉRIOS AVALIADOS	BARRAGENS EM ESTUDO																		
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15	B16	B17	B18	B19
Importância	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Dimensões	50	50	50	50	20	50	50	33	50	73	33	50	50	50	20	20	100	20	50
Tipo de Barragem	40	40	45	40	40	45	40	100	40	100	40	40	40	40	40	100	100	40	40
Tipo de Vertedor	2	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	100	100	50
TR órgãos de segurança	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Instalações a jusante	100	10	10	10	10	100	100	10	10	100	35	100	100	10	100	100	35	10	10
Instalações a montante	75	75	40	75	75	75	75	75	75	40	75	40	75	40	75	75	75	75	20
Idade	75	93	95	80	94	93	90	92	33	95	95	95	94	93	90	9	61	2	95
Qualidade dos dados técnicos	30	30	30	30	30	30	30	30	10	10	10	30	10	10	30	10	10	30	30
Presença de vazamentos	52	52	20	100	52	52	52	6	20	6	6	52	6	100	20	6	6	100	52
Presença de deformações	52	100	5	100	100	100	52	100	100	100	5	52	5	52	52	100	5	100	100
Deteriorações em aspectos gerais e taludes	100	6	6	20	6	50	6	6	6	6	20	6	6	20	2	20	20	50	6
Erosão a jusante	68	100	2	35	2	35	2	100	2	2	68	2	2	35	100	100	68	100	2
Condições do vertedor	28	2	28	62	28	62	28	28	2	28	2	2	62	62	2	28	62	28	2
Eutrofização do reservatório	100	100	100	100	100	100	50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Alteração no uso do solo	21	21	60	60	21	100	21	100	60	100	21	21	60	21	21	100	100	60	21
Eliminação da vegetação	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	40	10	10
Histórico de acidentes	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	60	6	6
CLASSIFICAÇÃO DO ISB	36	29	21	39	25	47	28	32	19	28	21	24	23	33	26	32	39	34	21

Fonte: O Autor (2023).

Resumo das condições de segurança:**Boa: $91 \leq \text{ISB} \leq 100$** **Satisfatória: $81 \leq \text{ISB} \leq 90$** **Regular: $61 \leq \text{ISB} \leq 80$** **Deficiente: $31 \leq \text{ISB} \leq 60$** **Insatisfatória: $0 \leq \text{ISB} \leq 30$**

Tabela 5 – Resultado da aplicação da Metodologia ISB para 38 barragens de Pernambuco

Conclusão

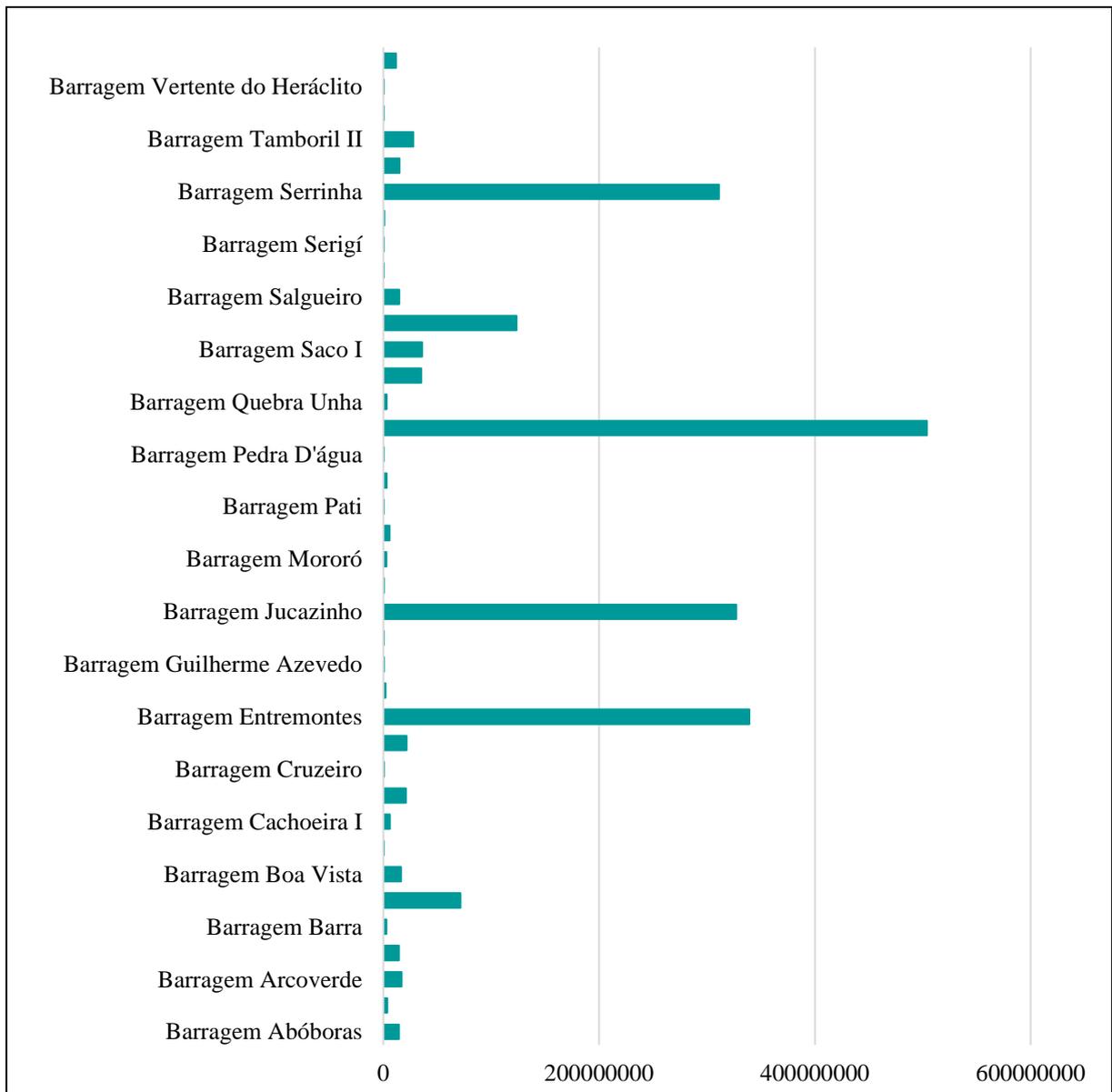
CRITÉRIOS AVALIADOS	BARRAGENS EM ESTUDO																		
	B20	B21	B22	B23	B24	B25	B26	B27	B28	B29	B30	B31	B32	B33	B34	B35	B36	B37	B38
Importância	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Dimensões	20	20	50	20	100	20	50	74	50	20	20	20	20	100	50	50	20	20	50
Tipo de Barragem	40	40	40	100	50	40	45	67	40	40	67	40	40	45	40	40	40	40	40
Tipo de Vertedor	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	100	50	50
TR órgãos de segurança	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Instalações a jusante	10	10	70	10	100	100	10	100	10	100	100	100	100	100	10	10	100	100	70
Instalações a montante	40	75	75	75	75	75	20	75	100	75	75	75	75	40	75	75	75	75	40
Idade	29	73	73	21	80	22	90	22	94	90	90	70	2	70	90	86	15	90	75
Qualidade dos dados técnicos	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	30	10	10	10	30	10	10
Presença de vazamentos	20	100	100	20	6	6	52	100	100	20	52	6	20	6	100	52	100	100	100
Presença de deformações	100	100	100	100	5	5	100	100	100	100	100	100	20	100	100	100	100	100	100
Deteriorações em aspectos gerais e taludes	6	20	6	6	6	6	6	6	20	6	60	6	6	6	20	6	50	20	6
Erosão a jusante	2	100	2	2	2	100	35	100	35	68	68	2	68	35	100	35	2	2	2
Condições do vertedor	28	28	28	2	2	2	28	2	62	100	2	2	2	28	2	2	100	2	28
Eutrofização do reservatório	100	100	100	100	100	100	50	100	100	100	100	100	100	85	100	85	100	100	100
Alteração no uso do solo	21	21	21	21	60	60	21	100	21	60	60	60	60	60	21	21	60	100	60
Eliminação da vegetação	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Histórico de acidentes	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
CLASSIFICAÇÃO DO ISB	20	33	29	18	19	20	28	34	36	36	35	20	22	31	30	25	36	27	29

Fonte: O Autor (2023).

Resumo das condições de segurança:**Boa: $91 \leq ISB \leq 100$** **Satisfatória: $81 \leq ISB \leq 90$** **Regular: $61 \leq ISB \leq 80$** **Deficiente: $31 \leq ISB \leq 60$** **Insatisfatória: $0 \leq ISB \leq 30$**

Evidencia-se que os resultados adquiridos corroboram com os que McCully (2002) obteve, ou seja, grande parte dos problemas acontece com barragens de pequeno porte e, nesse caso, elas correspondem ao maior número das barragens construídas. Os aspectos que mais cooperaram à ausência de segurança das estruturas, além dos já listados ao mencionar as barragens com a piores notas no ISB, foram a inexistência do registro de acidentes, fazendo com que fosse considerado a pior situação para a pontuação do índice, e quanto a posição da cascata, fazendo com que precisasse buscar essa informação além do documento fornecido pelo convênio. A Figura 67 traz o levantamento da capacidade de todas as 38 barragens do DNOCS, evidenciando que a maioria é de pequeno porte.

Figura 67 – Levantamento do volume (m³) das barragens do DNOCS, em Pernambuco



Fonte: UFPE e DNOCS (2021).

As causas de rupturas encontrados nas estruturas da Índia por Narayana, Singh e Pandya (1984) e em São Paulo por Zuffo (2005) foram as mesmas constatadas neste trabalho, sendo: a capacidade inadequada e desgaste excessivo do vertedor; estabilidade estrutural duvidosa das barragens; e, presença de vazamentos. Verifica-se, então, a seriedade dos resultados adquiridos pelo ISB.

À vista disso, tem-se que a metodologia ISB é extremamente simples de ser aplicada e acarreta um resultado que possibilita a identificação dos problemas específicos de cada estrutura, com o propósito de realizar as medidas corretivas adequadas.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho abordou aspectos que compreende o estudo do rompimento hipotético de barragens, bem como uma análise geral de segurança dessas estruturas. A metodologia empregada possibilitou a observação da aplicabilidade do modelo HEC-RAS acoplado aos modelos digitais do terreno.

A resolução espacial do MDT, a discretização da malha e o tempo de formação da brecha interferiram na geração dos hidrogramas de ruptura no HEC-RAS, especialmente nos primeiros intervalos de tempo.

A comparação dos modelos digitais do terreno para a Barragem Guilherme Azevedo apresentou diferença considerável de deslocamento da mancha de inundação gerada utilizando o MDT PE3D 5m em relação aos MDTs PE3D 30m e SRTM. Isso pode ter ocorrido devido a pequena área do reservatório (e, conseqüentemente, a pequena mancha de inundação que seu rompimento produz), que foi gerada com um MDT sem grandes extensões, tendo, assim, relação com o tamanho do pixel que acabou ficando maior em relação a área.

Para a análise de sensibilidade, a discretização da malha utilizada na simulação numérica influenciou tanto na extensão dos mapas de profundidades, quanto de velocidades máximas, das zonas de perigo alto. Observou-se que quanto mais discretizada a malha, maior foi a área. Houve aumento no tempo de chegada da onda de inundação ao passo que a malha se tornou menos discretizada. O tempo de processamento da simulação no HEC-RAS não teve diferenças considerável.

Constatou-se que o tempo de formação da brecha não causou alterações significativas na extensão dos mapas de profundidades e velocidades máximas, nem no tempo em que a onda de inundação atingiu o ponto mais distante analisado.

Diferentemente do tempo de formação da brecha, o Coeficiente de Manning foi um aspecto no qual se observou influência na extensão dos mapas de profundidades e velocidades máximas da zona de perigo alto, mas que seu impacto ainda não foi significativo na amplitude desses valores e no tempo de chegada da onda de cheia no ponto mais a jusante analisado, ressaltando que essas diferenças foram mais marcantes a análise do rompimento hipotético da barragem Serra dos Cavalos.

O grau de detalhamento do MDT dependerá essencialmente do propósito do estudo. No caso de estudo de ruptura de barragens para elaboração do PAE, este trabalho sugere uma resolução espacial de 5 m para MDTs adquiridos por meio de aerolevantamentos com laser LiDAR.

Observou-se que a Metodologia ISB é conservadora em seus resultados, isto é, rígida para as questões de segurança de estruturas desta natureza, uma vez que ela parte de um número maior de parâmetros a serem avaliados e seu intuito inicial é de ir sempre a favor da segurança. Isso finda por se apresentar como um fator muito positivo.

Destarte, fica o alerta sobre os 38 barramentos analisados, já que a avaliação os colocou entre as condições insatisfatórias e deficientes, demonstrando que precisam de intervenção para serem corrigidos os problemas e, com isso, melhorar a segurança. Inclusive, as barragens Guilherme Azevedo e Serra dos Cavalos ficaram classificadas como “condição insatisfatória”.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Relatório de segurança de barragens**. 2016. Disponível em: < <https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/rsb-2016/relatorio-de-seguranca-de-barragens-2016.pdf>>. Acesso em: 08 dez. 2021.

_____. **Relatório de Segurança de Barragens 2019 aponta para crescimento de barragens em condições críticas e aumento das ações de fiscalização**. 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/relatorio-de-seguranca-de-barragens-2019-aponta-para-crescimento-de-barragens-em-condicoes-criticas-e-aumento-das-acoes-de-fiscalizacao>>. Acesso em: 02 dez 2021.

_____. **Massas d'água – Catálogo de Metadados da ANA**. 2019. Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/7d054e5a-8cc9-403c-9f1a-085fd933610c>>. Acesso em 13 dez. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM. **Report trimestral descaracterização de barragens a montante**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/boletim-de-barragens-de-mineracao/arquivos/nota_tecnica_2022_descaracterizacao_publicacao_3.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2022.

ALBERTA ENVIRONMENTAL PROTECTION, *Inspection of Small Dams*, setembro de 1998, in <http://www3.gov.ab.ca/env/water/reports/safetyguide.pdf>, , pesquisa realizada em 04/07/2005.

ALGHAZALI, N. O. S.; ALHADRAWI, A. H. D. *The Mathematical Model of RCC Dam Break: Bastora Dam as a Case Study*. *Journal of Kerbala University*, v. 8, n. 1, p. 313-324, 2012.

ARAÚJO, K. F. M.; COSTA, L. F.; GONÇALVES, A. L. Impactos psicossociais dos desastres da mineração em Mariana e Brumadinho: uma revisão integrativa. 2022. **Rev. PsicolSaúde e Debate**. Fev., 2022:8(1): 221-237.

AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNÁNDEZ, M. F. **Manual de hidráulica**. 9. ed. São Paulo: Blucher, 2018. 632 p.

BARNES, H. H. *Roughness characteristics of natural channels*. *United States Government Printing Office*, 1967.

BARROS, E. O. PAMBOUKIAN. S. V. D. Análise do desastre em Mariana através da classificação supervisionada de imagens de sensoriamento remoto. 2017. **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**, São Paulo, v. 17, n. 1, p. 8-26, 2017

BRANDALIZE, A. A. **Perfilamento a laser: Comparação com Métodos Fotogramétricos**. 2018. ESTEIO Engenharia e Aerolevantamentos S/A. Curitiba/PR. Disponível em: <<http://www.lidar.com.br/arquivos/brandalizeperf.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2022.

BRASIL. Código Civil (1916). **Lei nº 3.071, de 1º de janeiro 1916**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/13071.htm>. Acesso em: 27 abr. 2022.

_____. Constituição (1934). **Constituição**: República Federativa do Brasil. Brasília: Senado Federal, 1934. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao34.htm>. Acesso em: 27 abr. 2022.

_____. **Decreto nº 24.643, de 10 de julho de 1934**. 1934. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/L14066.htm>. Acesso em: 27 abr. 2022.

_____. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. **Política Nacional do Meio Ambiente – PNMA**. 1981. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm#:~:text=LEI%20N%C2%BA%206.938%2C%20DE%2031%20DE%20AGOSTO%20DE%201981&text=Disp%C3%B5e%20sobre%20a%20Pol%C3%ADtica%20Nacional,aplica%C3%A7%C3%A3o%2C%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%A2ncias.>. Acesso em: 27 abr. 2022.

_____. Constituição (1988). **Constituição**: República Federativa do Brasil. Brasília: Senado Federal, 1988. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm>. Acesso em: 27 abr. 2022.

_____. Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997. **Política Nacional de Recursos Hídricos – PNRH**. 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm>. Acesso em: 27 abr. 2022.

_____. Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. **Criação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA**. 2000. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19984.htm>. Acesso em: 27 abr. 2022.

_____. Ministério Público Federal. **Ação Civil Pública contra Estado da Paraíba, CRE Engenharia Ltda, Andrade Galvão Engenharia Ltda, Holanda Engenharia Ltda**. João Pessoa, 2005.

_____. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. **Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB**. 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm>. Acesso em: 27 abr. 2022.

_____. Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. **Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB**. 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm>. Acesso em: 03 abr. 2022.

BISERRA, L. H. R.; SANTANA, C. F. D.; PEREIRA, S. R. S.; SOUSA, M. G. Análise da classificação de risco das barragens de Sergipe com base no banco de dados do SNISB. In: XV SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, Caruaru. **Anais...** Caruaru: ABRHidro, 2020. p. 1-20.

CAMPOS, J. N. B. **Lições em modelos e simulação hidrológica**. Fortaleza: ASTEF/EXPRESSÃO GRÁFICA, 2009. 166 p.

CARVALHO, T. P. **Modelagem do escoamento transcrito sob regimes permanente e transiente em canais**. 2021. 94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2021.

CBGB – NRSP. Guia Básico de Segurança de Barragens. São Paulo-SP, 1999.

CIRILO, J. A.; BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P.; MASCARENHAS, F. C. B.; CANALI, G. V.; CABRAL, J. J. S. P.; AZEVEDO, J. R. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L. **Hidráulica aplicada**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2014a. 627p.

CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B.; SILVA, L. A. C.; CAMPOS, J. H. A. L. Suporte de Informações Georreferenciadas de Alta Resolução para Implantação de Infraestrutura e Planejamento Territorial. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s.l.], v. 07, n. 04, p.755-763, 2014b.

COELHO, T. P. Dilemas e obstáculos na economia de Brumadinho frente à minério-dependência. **Revista Ciência & Cultura**, v.72, n.2, p.29-33, 2020.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS – CBDB. **A história das barragens no Brasil, séculos XIX, XX e XXI: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens**. Rio de Janeiro: CBDB, 2011. 524 p.

CONCEIÇÃO, J. C. O.; RIBEIRO, A. L.; SILVA, W. C. T. BARRAGENS E A IMPORTANCIA DOS SEUS LIMITES DE SEGURANÇA: PARA APRENDER COM AS CATÁSTROFES DE MINAS GERAIS. **Revista Científica Semana Acadêmica**. Fortaleza, ano MMXX, Nº 000200, 30/10/2020. Disponível em: <<https://semanaacademica.org.br/artigo/barragens-e-importancia-dos-seus-limites-de-seguranca-para-aprender-com-catastrofes-de-minas>>. Acesso em: 02 dez 2021.

CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE HIDRÁULICA, XXVIII., 2018, Buenos Aires - Argentina. **Estudo de cenários de rupturas de barragens e impactos nas manchas de inundação utilizando base topográfica SRTM e aerolevantamento a laser LIDAR [...]**. Buenos Aires: Secretaria de Infraestrutura e Política Hídrica e Instituto Nacional da Água, 2018.

COOK, A.; MERWADE, V. *Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping*. **Journal of Hydrology**, v. 377, n. 1, p. 131-142, 2009.

EUA - DESIGN OF SMALL DAMS. *A Water Resources Technical Paper, U. S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, CO, EUA, 1987.*

FARIA, A. A. C. **A light e a utilização dos recursos hídricos da bacia do alto tietê para a geração de energia elétrica**. 2011. Disponível em: <<http://arquivo.ambiente.sp.gov.br/cea/2011/12/AntonioAugusto.pdf>>. Acesso em: 18 mar. 2022.

FIGUEIREDO, A. P. S. **Determinação da Mancha de Inundação do Município de Itajubá na Enchente de janeiro /2000**. XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – INPE. Belo Horizonte. 2003.

FIRMIANO, F. D. Conflitos Socioambientais no estado de Minas Gerais: uma análise do ano de 2019. **Revista de Ciências Sociais** — Fortaleza, v. 52, n. 3, nov. 2021/fev. 2022, p. 135–179.

FREITAS, C. M., BARCELLOS, C., ASMUS, C. I. R. F., SILVA, M. A., XAVIER, D. R. Da Samarco em Mariana à Vale em Brumadinho: desastres em barragens de mineração e Saúde Coletiva. 2019. **Cadernos de Saúde Pública**, 35(5), 1-7.

FROEHLICH, D. C. *Embankment Dam Breach Parameters Revisited. First International Conference, Water Resources Engineering, Environmental and Water Resources Institute (EWRI)*, 14 - 18. ASCE, **Water Resources Engineering Proceeding**, p. 887 – 891, 1995.

G1. **Brumadinho antes e depois: veja imagens do rompimento de barragem da Vale**. 2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/01/25/antes-e-depois-veja-imagens-do-rompimento-de-barragem-da-vale-em-brumadinho-mg.ghtml>>. Acesso em 23 mar. 2022.

GAYATHRI, K. D.; GANASRI, B. P.; DWARAKISH, G. S.; *international conference on water resources, coastal and ocean Engineering (ICWRCOE 2015)*. **Aquatic Procedia**, v.4, p. 1001 – 1007, 2015.

GINTING, B. M.; YUDIANTO, D.; WILLY; GINTING, A. H. *Finding an Optimum Grid Size for Numerical Simulations of Dam-break Flow Using Open-Access Digital Elevation Models*. **IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.** 832 012058.

GOODCHILD, M.; HAINING, R.; WISE, S. *Integrating GIS and spatial data analysis: problems and possibilities*. **International Journal Of Geographical Information Systems**, [s.l.], v. 6, n. 5, p.407-423, set. 1992.

GUEDES, J. F. C. **Análise institucional de prevenção e gestão de desastres de barragens: contribuições de Camará**. 2011. 109f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

HENRIQUE, B. I. **Avaliação dos impactos a jusante da barragem lombada do sabão, em Porto Alegre/RS, em caso de rompimento**. 2020. 116f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA. Rompimento da Barragem de Fundão: **Documentos relacionados ao desastre da Samarco em Mariana/MG**. 2020. Disponível em:

<<https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/notas/2020/rompimento-da-barragem-de-fundao-documentos-relacionados-ao-desastre-da-samarco-em-mariana-mg#mapas>>. Acesso em: 23 mar. 2022.

JARIHANI, A. A.; CALLOW, J. N.; TIM R. MCVICAR, T. R.; VAN NIEL, T. G.; LARSEN, J. R. *Satellite-derived Digital Elevation Model (DEM) selection, preparation and correction for hydrodynamic modelling in large, low-gradient and data-sparse catchments*. *Journal of Hydrology*, v. 524, p. 489–506, 2015.

KANJI, M. A. **Parecer Técnico sobre as Causas da Ruptura da Barragem Camará**. São Paulo, 2004.

LACAZ, F. A. C.; PORTO, M. F. S.; PINHEIRO, T. M. P. Tragédias brasileiras contemporâneas: o caso do rompimento da barragem de rejeitos de Fundão/Samarco. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, 42:e9, p.1-12, 2017.

LASCHEFSKI, K. A. Rompimento de barragens em Mariana e Brumadinho (MG): Desastres como meio de acumulação por despossessão. **AMBIENTES**. Volume 2, Número 1, 2020, p. 98-143. ISSN: 2674-6816.

LEITE, S. R. **Modelo para Avaliação de Riscos em Segurança de Barragens com Associação de Métodos de Análise de Decisão Multicritério e Conjuntos Fuzzy**. 2019. 222f. Dissertação (Mestrado – Mestrado Profissional em Computação Aplicada) – Universidade de Brasília, Brasília 2019.

LIMA, V. N.; MELO, M. F. O.; ALCÂNTARA, L. A.; FRANÇA, L. L. S.; PASSOS, J. B. Aquisição manual da categoria hidrografia com base em produtos do PE3D. In: VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, Recife. **Anais...** Recife: UFPE, 2018. p. 127-136.

LIMA, R. P.; ELMIRO, M. A. T.; NERO, M. A.; TEMBA, P. C.; FONSECA, B. M.; CASTIGLIONE, L.H.G. *Assessment of digital terrain models in dam break simulation studies*. *Bulletin of Geodetic Sciences*. 27(spe): e2021005, 2021.

LIRA, C. C. **Análise da supressão vegetal e exploração mineral na construção da barragem serro azul em Palmares, Pernambuco**. 2019. 88f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão Ambiental) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Recife, 2019.

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Sistemas e Ciência da Informação Geográfica**. 3 ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.

LOPES, V. A. R. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica integrada de bacias e sistemas lagunares com influência do vento**. 2017. 200 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

MCCULLY, P., extraído do capítulo 4 – When Things Fall Apart: The Technical Failure of Large Dams - do livro *Silenced Rivers: The Ecology and Politics of Large Dams*, 2002.

MEDEIROS, C. H. de A. C. **Segurança de Barragens, Desafios para sua Implementação: Aspectos da Lei 12.334**. Salvador, 21 out 2010. Palestra proferida no Dia Internacional de Redução de Desastres.

MELO, M. R. S. **Barragens e seus impactos negativos na ictiofauna**. 2012. 51f. Trabalho de Conclusão de Curso (Instituto de Ciências Agrárias) – Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, 2012.

MENDES, T. A.; SOUSA, M. B.; PEREIRA, S. A. S.; SANTOS, K. A.; FORMIGA, K. T. M. Uso do modelo HEC-RAS com base em informações de LiDAR para avaliação de inundações urbanas. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.27, n.1, p. 141-157, 2022.

MINAS GERAIS. **Secretaria de Estado de Desenvolvimento Regional, Política Urbana e Gestão Metropolitana**. Relatório: avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG. Belo Horizonte: Sedru; 2016. 289 p

MILANEZ, B.; MAGNO, L.; PINTO, G. R. **Da política fraca à política privada: o papel do setor mineral nas mudanças da política ambiental em Minas Gerais, Brasil**. Cadernos de Saúde Pública, v. 35, no5, pp. 1-7, 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/0102-311x00051219>>. Acesso em 27 abr. 2022.

MILIAREISIS, G. C.; PARASCHOU, C. V. E. *Vertical accuracy of the SRTM DTED level 1 of Crete*. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 7, n. 1, p. 49-59, 2005.

MONTEIRO, L. R.; KOBIYAMA, M. Proposta de metodologia de mapeamento de perigo de inundação. **Revista de Gestão de Água da América Latina – REGA**, Vol. 10, nº. 2, p. 13-25, jul./dez. 2013.

MOHR, J. *Dam-break flood analysis: Review and recommendations*. *International 669 Commission on Large Dams*, 1998.

MORAES, I. C.; CONCEIÇÃO, F. T.; CUNHA, C. M. L.; MORUZZI, R. B. Comparação de metodologias na definição de fluxos acumulados a partir de modelos digitais de elevação do terreno aplicado a suscetibilidade de inundações. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.19, n.2, p. 223-235, 2014.

MORRIS, M. W. CADAM – *Concerted action on dambreak modelling*. Final Report, 2020.

NARAYANA, G. S., SINGH, M. e PANDYA, A. B., *Problems in Dam Safety encountered in India: Case histories, Proceedings of the International Conference on Safety of Dams – Coimbra / 23-28 de abril de 1984*, A. A. Balkema / Rotterdam / Boston, 1984.

NASCIMENTO, F. P. Classificação da pesquisa. Natureza, método ou abordagem metodológica, objetivos e procedimentos. In: _____. **Metodologia da Pesquisa Científica: teoria e prática – como elaborar TCC**. Brasília: Thesaurus, 2016. cap. 6, 11p.

NEVEZ, Y. T. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica acoplada 1D/2D utilizando imagens de perfilamento a laser**. 2019. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

NIEBLE, C. M. **Relatório de Diagnóstico do Sinistro da Barragem de Camará**. São Paulo, 2004.

PERNAMBUCO. **Bacia hidrográfica do rio Ipojuca**. 2005. Disponível em: <http://www.condepefidem.pe.gov.br/c/document_library/get_file?p_1_id=78673&folderId=141869&name=DLFE-12005.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2023.

PFAFF, Christine. *The Bureau of Reclamation's: Civilian Conservation Corps Legacy*. US Department Of Interior. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, 2010.

PFAFF, Christine. *“Happy Days” of the Depression: The Civilian Conservation Corps in Colorado*. In Colorado Heritage, Spring 2001.

PILGER, I. O. **Delimitação de áreas susceptíveis à inundação no município de Santa Teresa-ES utilizando SIG**. 2020. 21 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização Lato Sensu em Educação e Gestão Ambiental) – Instituto Federal do Espírito Santo, Santa Teresa, 2020.

PAIVA JÚNIOR, H. B. **Efeitos do Rompimento da Barragem de Camará na Área Urbana do Município de Alagoa Grande-PB**. 2006. 98 f. Dissertação. Mestrado em Engenharia Urbana-Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, João Pessoa, 2006.

PARAÍBA. **Comissão Parlamentar de Inquérito Destinada a Investigar Possíveis Irregularidades Quanto ao Arrombamento da Barragem “Camará”, Bem como Apontar suas Causas e Definir Responsabilidades**. Relatório Parcial. 2004.

PINHEIRO FILHO, J. D. **A serra dos cavalos e as suas biomemórias para a história do abastecimento d'água em Caruaru/PE**. I Congresso Internacional da Diversidade do Semiárido – CONIDIS. Campina Grande. 2016.

_____. **Da Serra dos Cavalos ao Vale do Ipojuca (Caruaru/PE): águas e história ambiental no semiárido brasileiro**. HALAC – Historia Ambiental, Latinoamericana y Caribeña , v.9, n.2, p. 237-262, 2019.

PODHORÁNYI, M.; UNUCKA, J.; BOBÁL', P.; ŘÍHOVÁ, V. *Effects of LIDAR DEM resolution in hydrodynamic modelling: model sensitivity for cross-sections*. *International Journal of Digital Earth*, v. 6, n. 1, p. 3-27, 2013.

POLIGNANO, M. V.; LEMOS, R. S. Rompimento da barragem da Vale em Brumadinho: impactos socioambientais na bacia do rio Paraopeba. **Revista Ciência & Cultura**, v.72, n.2, p.37-43, 2020.

QIN, J.; WU, T. *Comments on “A modified particle filter-based data assimilation method for a high-precision 2-D hydrodynamic model considering spatial-temporal variability of roughness: Simulation of dam-break flood inundation” by Cao et al.* **Water Resources Research**, 56, e2019WR026856. 2020.

REIS, P. A.; SCHMIDT, M. A. R. Avaliação dos Modelos HEC-RAS e GRASS na Identificação de Áreas Vulneráveis a Inundações em Áreas Urbanas. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, vol. 40 – 1, 2017, p. 115-126.

RIBEIRO NETO, A.; BATISTA, L. F. D. R.; COUTINHO, R. Q. *Methodologies for generation of hazard indicator maps and flood prone areas: municipality of Ipojuca/PE.* **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S. l.], v. 21, n. 2, p. 377-390, abr. 2016.

RIBEIRO, J. S. **O uso do Sistema de Informação Geográfica (SIG) nas pesquisas de Administração.** 2018. 30 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

SALMOND, John A. *The Civilian Conservation Corps and the Negro.* **The Journal of American History**, Vol. 52, No. 1 (Jun., 1965), pp. 75-88. URL: <http://www.jstor.org/stable/1901125>. Accessed: 21/1/2015 06:34.

SAMARCO. **Um ano do rompimento de Fundão.** 2016. Disponível em: <https://www.samarco.com/wp-content/uploads/2020/12/Book-Samarco_final_baixa.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2022.

SECRETARIA DE COMUNICAÇÃO – SECOM. **Rompimento da barragem de Camará.** 2004. Disponível em: <<http://www.secom.pb.gov.br/secom/galeriadefotos>>. Acesso em: 02 fev. 2023.

SILVA, M. M. A.; MEDEIROS, M. J. L.; SILVA, P. C. S.; SILVA, M. M. P. **Impactos Ambientais causados em decorrência do rompimento da Barragem Camará no município de Alagoa Grande, PB.** *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, v. 6, n. 1, 2006.

SILVA, R. S. A.; MEDEIROS, A. B. S.; OLIVEIRA JÚNIOR, A. P.; FREITAS NETO, O.; SANTOS JÚNIOR, O. F. Acidentes e incidentes em barragens brasileiras: uma análise dos dados disponíveis nos relatórios de segurança de barragens e da legislação vigente. **Holos**. v.37, n.6, p. 1-17. 2021.

SILVA, C. I. A. **Pequenas barragens de água: definição do grau de hierarquização para fins de fiscalização.** 2021. 92f. Dissertação (Mestrado em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Campina Grande, Sumé, 2021.

SILVA, E. J. G. **Efeito da resolução espacial do modelo digital do terreno na estimativa da mancha de inundação decorrente da ruptura hipotética da barragem Jucazinho.** 2021. 29f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2021.

- SILVEIRA, R. M. S.; SILVEIRA, C. T. Análise comparativa entre modelos digitais de elevação com distintas características de processamento e aquisição. **Bol. geogr.**, Maringá, v. 33, número especial, p. 106-121, 2015.
- SOARES, A. L. C; DUARTE, S. F.; GOMES, L. N. L.; OLIVEIRA, S. C. Impacto do rompimento da barragem de rejeitos de minério de ferro da mina do feijão, em Brumadinho, quanto ao uso e à cobertura do solo e à qualidade das águas superficiais do rio Paraopeba. **Rev. UFMG**, Belo Horizonte, v. 27, n. 2, p. 356-381, mai./ago. 2020.
- SOUZA, K. R.; KERBAUY, M. T. M. Abordagem quanti-qualitativa: superação da dicotomia quantitativa-qualitativa na pesquisa em educação. **Educação e Filosofia**, Uberlândia, v. 31, n. 61, p. 21-44, jan./abr. 2017.
- SOURCE, E. G. *The Ambiguous Practices of the Civilian Conservation Corps*. **Social History**, Vol. 17, No. 2 (May, 1992), pp. 229-249.
- SZYMKIEWICZ, R. *Numerical Modeling in Open Channel Hydraulics*. Dordrecht: Springer, 2010. 417 p.
- TENG, J.; JAKEMAN, A. J.; VAZE, J.; CROKE, B. F. W.; DUTTA, D.; KIM, S. *Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis*. **Environmental Modelling & Software**, [s.l.], v. 90, p.201-216, abr. 2017.
- TREVISOL NETO, O. **Métodos e técnicas de pesquisa**. ed. 1. Chapecó: ARGOS, 2017. 96p.
- TUNDISI, J. G. **Reservatórios como sistemas complexos: Teoria, aplicações e perspectivas para uso múltiplo**. In.: HENRY, R. (Ed.) *Ecologia de reservatórios: estrutura, função e aspectos sociais*. Botucatu: FUNDIBIO, FAPESP, 1999. 799 p.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO – UFPE; DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA AS SECAS – DNOCS. **Elementos para avaliação de riscos de barragens do estado de Pernambuco (UFPE:EARBPE)**. 2021.
- UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS - USACE. *Using HEC-RAS for dam break studies*. Hydrologic Engineering Center, 74 p., 2014.
- VALE. **Plano de ação de emergência barragem 1**. (PAEBM), 2016. Digitado.
- VALERIANO, M. M.; ABDON, M. M. Aplicação de dados SRTM a estudos do Pantanal. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 59, n. 1, p. 63-71, 2007.
- VELTROP, J., *Water, Dams and Civilization*, World Bank Technical Paper Number 115. 1991.
- WAHL, T. L. *Prediction of Embankment Dam Breach Parameters: A Literature Review and Needs Assessment*. United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Dam Safety Office: Water Resources Research Laboratory, 1988

ZHOURI, A.; OLIVEIRA, R.; ZUCARELLI, M.; VASCONCELOS, M. *The Rio Doce Mining Disaster in Brazil: between policies of reparation and the politics of affectation. Dossier Mining, Violence, Resistance. Vibrant*, v. 14, no2, pp. 1-21, 2017.

ZHOURI, A.; VALENCIO, N.; TEIXEIRA, R. O. S.; ZUCARELLI, M. C.; LASCHEFSKI, K.; SANTOS, A. F. M. O desastre da Samarco e a política das afetações: classificações e ações que produzem o sofrimento social. **Revista Ciência & cultura**, v. 68, pp. 36-40, 2016.

ZUFFO, M. S. R. **Metodologia para avaliação de segurança de barragens**. 2005. 192f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.