



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MAYRA ANGELINA QUARESMA FREIRE

**ANÁLISE DE HIPOTÉTICA RUPTURA DA BARRAGEM DE BITA: AVALIAÇÃO DE  
MEDIDAS PREVENTIVAS, IMPLEMENTAÇÃO DO PLANO DE AÇÃO  
EMERGENCIAL E IMPACTOS SOCIAMBIENTAIS**

RECIFE  
2024

MAYRA ANGELINA QUARESMA FREIRE

**ANÁLISE DE HIPOTÉTICA RUPTURA DA BARRAGEM DE BITA: AVALIAÇÃO DE  
MEDIDAS PREVENTIVAS, IMPLEMENTAÇÃO DO PLANO DE AÇÃO EMERGENCIAL  
E IMPACTOS SOCIAMBIENTAIS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Civil.

**Área de concentração:** Recursos Hídricos/Geotecnia

Orientador: Prof. PhD. Samuel Franca Amorim

Coorientador: MSc. Júlio Tenório de Oliveira

RECIFE

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Quaresma Freire, Mayra Angelina .

Análise de hipotética ruptura da barragem de Bitá: Avaliação de medidas preventivas, implementação do plano de ação emergencial e impactos socioambientais / Mayra Angelina Quaresma Freire. - Recife, 2024.

128 : il., tab.

Orientador(a): Samuel França Amorim

Coorientador(a): Júlio Tenório de Oliveira

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Civil - Bacharelado, 2024.

Inclui referências, apêndices.

1. Barragem de Bitá. 2. Plano de Ação de Emergência. 3. Simulação de ruptura. I. Amorim, Samuel França . (Orientação). II. Oliveira, Júlio Tenório de. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

MAYRA ANGELINA QUARESMA FREIRE

**ANÁLISE DE HIPOTÉTICA RUPTURA DA BARRAGEM DE BITA: Avaliação de medidas preventivas, implementação do plano de ação emergencial e impactos socioambientais**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Civil.

**Área de concentração:** Recursos Hídricos/Geotecnia

Orientador: Prof. PhD. Samuel Franca Amorim

Coorientador: MSc. Júlio Tenório de Oliveira

Aprovado em 18 de abril de 2024.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. PhD. Samuel Franca Amorim (Orientador)

---

Prof. MSc. Washington Moura de Amorim Junior

---

Prof. PhD. Jaime Cabral

"Naquela mesa ele sentava sempre,  
E me dizia sempre o que é viver melhor.  
Naquela mesa ele contava histórias,  
Que hoje na memória eu guardo e sei de cor."  
Ao meu avô Roberto, cuja memória vive em  
cada batida do meu coração. Naquela mesa,  
onde compartilhamos conversas simples e  
preciosas, ele me ensinou o verdadeiro  
significado da vida.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, que me concedeu força, sabedoria e perseverança durante toda a jornada desta pesquisa.

Ao meu pai Romero Freire, cuja sabedoria e gentileza são como um farol, guiando-me nas águas da vida, antes de saber o que eu queria ser na vida, já sabia que queria ser igual ao senhor. À minha mãe Marlise Quaresma, que é a minha melhor amiga, que sempre esteve comigo, cujo amor incondicional é o alicerce que sustenta minha jornada. À minha irmã Maria Clara, que é a minha metade, me traz alegria contagiante e ilumina cada momento e será a próxima engenheira da família. Minha eterna gratidão por vocês, que são meus pilares de apoio e inspiração, que são a minha vida.

Gostaria de expressar minha sincera gratidão à minha família materna e paterna, agradeço por todo o apoio e amor que me proporcionaram ao longo dos anos.

À minha querida amiga Camila Karine, sua presença constante mesmo à distância foi um verdadeiro apoio e inspiração.

Aos meus queridos amigos Gabriele Ferreira, Carolina Secundes, Vinicius Cezar, Jefferson Fernandes e Lucas Quadros, sou imensamente grata pelo apoio e pela presença constante. Em especial, desejo destacar a minha amiga Gabriela Barbosa, cuja amizade foi um presente inestimável originado na faculdade, mas que transcendeu seus limites físicos. Nunca nos separamos, permanecendo unidas em todas as circunstâncias, enfrentando desafios de todos os tamanhos e compartilhando a alegria das vitórias lado a lado, sempre fomos suficientes.

À equipe da Gerência de Segurança de Barragens da COMPESA, onde tive a oportunidade de realizar meu primeiro estágio. Foi lá que adquiri os conhecimentos fundamentais que foram essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa. Em destaque, gostaria de estender meu agradecimento ao gerente Hudson, cuja liderança inspiradora e orientação foram fundamentais para minha formação profissional.

Ao meu coorientador, Júlio, que também foi meu supervisor na COMPESA. Ele não apenas me ensinou tudo o que eu precisava para conduzir esta pesquisa, mas também me deu orientação e, quando necessário, até mesmo puxões de orelha. Sou grata por seus ensinamentos, não só como engenheiro, por sua paciência, dedicação e sabedoria ao longo deste percurso.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão ao professor Samuel, que gentilmente concordou em me orientar neste projeto. Agradeço pela confiança depositada em mim e pelo tempo dedicado para me ajudar a alcançar meus objetivos acadêmicos.

Agradeço a todos que me ajudaram nessa jornada, seja de forma direta ou indiretamente.

## RESUMO

A ocorrência de rupturas em barragens representa uma ameaça significativa, dada a magnitude dos danos associados. Em resposta a esse desafio, a Lei nº 12.334/2010, que foi posteriormente aprimorada pela Lei nº 14.066/2020 foi promulgada, estabelecendo a Política Nacional de Segurança de Barragens e delineando diretrizes para prevenir e gerenciar emergências. Um dos principais instrumentos dessa legislação é o Plano de Segurança de Barragens, que requer, para barragens de alto potencial de dano, a elaboração de um Plano de Ação de Emergência (PAE), abrangendo medidas críticas de resposta em casos de ruptura. Neste contexto este estudo se concentra na simulação de ruptura, mapeamento e análise das áreas de inundação da Barragem de Bita, pertencente à Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), localizada em Ipojuca. O objetivo central é a elaboração de Planos de Contingência que incluam a delimitação das zonas de autossalvamento, zonas secundárias de salvamento e a identificação de rotas de fuga, visando salvaguardar a vida da população em situações de emergência. Por meio de estudos hidrológicos, da aplicação da equação de Froehlich (1995) e do programa Hec-Ras 6.4.1, foram definidos três cenários hidráulicos distintos, cada um com características específicas. Utilizando o Modelo Digital de Elevação (MDE) do PE3D e processando os dados no QGIS e ArcGIS Pro, foram produzidos mapas detalhados de inundação, classificados conforme critérios de perigo específicos, para fornecer uma representação visual clara das áreas potencialmente afetadas em situações emergenciais. A partir dos resultados foi possível concluir que a mancha de inundação exerceu um impacto expressivo em infraestruturas locais em tempos distintos para cada cenário de ruptura. No Cenário 1, caracterizado pela ruptura por *piping*, a mancha de inundação atingiu as infraestruturas locais após 1 hora e 17 minutos da sua ruptura, enquanto no Cenário 2, caracterizado pela ruptura por galgamento, ocorreu após 1 hora e 34 minutos, ambas atingiram um total de 358 edificações. No entanto, o Cenário 3, caracterizado pela ruptura por operação hidráulica extrema, apresentou um tempo de inundação mais rápido, atingindo as infraestruturas locais após 1 hora e 8 minutos, totalizando 248 edificações. Esses resultados enfatizam a necessidade de uma gestão de riscos eficaz e uma resposta preparada diante de cenários críticos, conforme preconizado pela legislação vigente. Este estudo contribui não apenas para a implementação do Plano de Ação de Emergência, mas também para a avaliação dos impactos socioambientais decorrentes das possíveis inundações, fortalecendo assim a segurança das comunidades afetadas.

**Palavra-chave:** Barragem de Bita; Plano de Ação de Emergência; Simulação de ruptura.

## ABSTRACT

The occurrence of dam ruptures represents a significant threat due to the magnitude of associated damages. In response to this challenge, Law No. 12,334/2010, subsequently enhanced by Law No. 14,066/2020, was enacted, establishing the National Dam Safety Policy and outlining guidelines to prevent and manage emergencies. One of the main instruments of this legislation is the Dam Safety Plan, which requires, for dams with high damage potential, the development of an Emergency Action Plan (EAP), encompassing critical response measures in case of rupture. In this context, this study focuses on the simulation of rupture, mapping, and analysis of inundation areas of the Bitá Dam, owned by the Pernambuco Sanitation Company (COMPESA), located in Ipojuca. The main objective is the elaboration of Contingency Plans that include the delineation of self-rescue zones, secondary rescue zones, and the identification of escape routes, aiming to safeguard the lives of the population in emergency situations. Through hydrological studies, the application of the Froehlich equation (1995), and the Hec-Ras 6.4.1 software, three distinct hydraulic scenarios were defined, each with specific characteristics. Using the Digital Elevation Model (DEM) from PE3D and processing the data in QGIS and ArcGIS Pro, detailed inundation maps were produced, classified according to specific danger criteria, to provide a clear visual representation of potentially affected areas in emergency situations. From the results, it was possible to conclude that the inundation footprint had a significant impact on local infrastructures at different times for each rupture scenario. In Scenario 1, characterized by piping rupture, the inundation footprint reached local infrastructures after 1 hour and 17 minutes from its rupture, while in Scenario 2, characterized by overtopping rupture, it occurred after 1 hour and 34 minutes, both affecting a total of 358 buildings. However, Scenario 3, characterized by extreme hydraulic operation rupture, presented a faster inundation time, reaching local infrastructures after 1 hour and 8 minutes, totaling 248 buildings. These results emphasize the need for effective risk management and prepared response to critical scenarios, as advocated by current legislation. This study contributes not only to the implementation of the Emergency Action Plan but also to the assessment of socio-environmental impacts resulting from potential floods, thus strengthening the safety of affected communities.

Keywords: Bitá Dams; Emergency Action Plan; Rupture simulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa holândes de 1577 da região de Apipucos destacando o açude Apipucos. ....	24
Figura 2 - Barragem de Bitá. ....	25
Figura 3 - Principais causas de ruptura em barragens de terra. ....	25
Figura 4 - Processo de rompimento por galgamento. ....	27
Figura 5 - Início da erosão retrogressiva. ....	28
Figura 6 - Processo de rompimento por piping. ....	28
Figura 7 - Geometria da Brecha. ....	29
Figura 8- Formação de brecha por piping. ....	30
Figura 9 - Formação de brecha por galgamento. ....	30
Figura 10 - Localização do município onde se encontra o local de estudo. ....	38
Figura 11 - Localização da Barragem Bitá na Unidade de Planejamento UP04 – Metropolitana Sul. ....	39
Figura 12 - Imagem de satélite de situação da Barragem de Bitá e arredores. ....	40
Figura 13 - Bacia Hidrográfica da barragem Bitá. ....	45
Figura 14 - Temperaturas normais para o município de Ipojuca -PE, em °C. ....	49
Figura 15 - Precipitações médias mensais na bacia da barragem Bitá (mm). ....	50
Figura 16 - Evapotranspiração mensal para bacia da barragem de Bitá (mm). ....	50
Figura 17 - Chuva de projeto para barragem Bitá com recorrência de 10.000 anos e duração de 360 min. ....	52
Figura 18 - Tipos de solo da bacia hidrográfica da barragem de Bitá. ....	53
Figura 19 - Uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica da barragem Bitá. ....	54
Figura 20 - Hidrogramas de projeto para barragem Bitá com tempos de recorrência de 100, 1.000 e 10.000 anos. ....	57
Figura 21 - Etapas a serem seguidas para a análise de ruptura de barragem. ....	57
Figura 22 - Distribuição de áreas com produtos disponíveis em março de 2024. ....	60
Figura 23 - MDE com malha geométrica de 50x50 m. ....	61
Figura 24 - Hidrograma de Ruptura - Cenário mais provável. ....	62
Figura 25 - Hidrograma de Ruptura - Cenário extremo ....	63
Figura 26 - Hidrograma de Ruptura – Operação extrema ....	63
Figura 27 - Fluxograma de notificações. ....	69
Figura 28 - Mancha de inundação do cenário mais provável ....	71

Figura 29 - Mancha de inundação do cenário extremo .....	72
Figura 30 - Mancha de inundação do cenário extremo .....	73
Figura 31 - Detalhamento dos pontos vulneráveis no cenário 1.....	74
Figura 32 - Detalhamento dos pontos vulneráveis no cenário 2.....	75
Figura 33 - Detalhamento dos pontos vulneráveis no cenário 3.....	76
Figura 34 - Delimitação da Zona de Autossalvamento – ZAS.....	77
Figura 35 - Delimitação da Zona de Segurança Secundária.....	78
Figura 36 - Mapa de rota de fuga .....	79
Figura 37 - Perfil do terreno e cota máxima de inundação na seção a aproximadamente 4,10 km da barragem BITA com as seguintes coordenadas: 8°21'39.72"S e 35° 1'7.51"O – Elevações do Nível da água de 7,84 m e 6,93 m do ponto mais baixo do rio. ....	81
Figura 38 - Perfil do terreno e cota máxima de inundação na seção a aproximadamente 5,38 km da barragem BITA com as seguintes coordenadas: 8°21'26.71"S e 35° 0'21.39"O – Elevações do Nível da água de 5, 23 m e 4,54 m do ponto mais baixo do rio. ....	81
Figura 39 - Perfil do terreno e cota máxima de inundação na seção a aproximadamente 5,53 km da barragem BITA com as seguintes coordenadas: 8°21'29.47"S e 35° 0'13.46"O – Elevações do Nível da água de 3,18 m e 2,87 m do ponto mais baixo do rio. ....	82
Figura 40 - Perfil do terreno e cota máxima de inundação na seção a aproximadamente 8,60 km da barragem BITA com as seguintes coordenadas: 8°21'34.05"S e 34°58'30.44"O – Elevações do Nível da água de 1,51 m e 1,37 m do ponto mais baixo do rio. ....	82
Figura 41 - Reserva ecológica e mancha de inundação.....	84
Figura 42 - Área de mata atlântica afetada .....	85
Figura 43 - CENÁRIO MAIS PROVÁVEL: P01 .....	92
Figura 44 - CENÁRIO MAIS PROVÁVEL: P02 .....	93
Figura 45 - CENÁRIO MAIS PROVÁVEL: P03 .....	94
Figura 46 - CENÁRIO MAIS PROVÁVEL: P04 .....	95
Figura 47 - CENÁRIO MAIS PROVÁVEL: P05 .....	96
Figura 48 - CENÁRIO MAIS PROVÁVEL: P06 .....	97
Figura 49 - CENÁRIO MAIS PROVÁVEL: P07 .....	98
Figura 50 - CENÁRIO MAIS PROVÁVEL: P08 .....	99
Figura 51 - CENÁRIO EXTREMO: P01 .....	100
Figura 52 - CENÁRIO EXTREMO: P02 .....	101
Figura 53 - CENÁRIO EXTREMO: P03 .....	102
Figura 54 - CENÁRIO EXTREMO: P04 .....	103

Figura 55 - CENÁRIO EXTREMO: P05 .....	104
Figura 56 -CENÁRIO EXTREMO: P09 .....	105
Figura 57- CENÁRIO EXTREMO: P07 .....	106
Figura 58 - CENÁRIO EXTREMO: P08 .....	107
Figura 59 - CENÁRIO EXTREMO: P09 .....	108
Figura 60 - CENÁRIO - OPERAÇÃO EXTREMA: P01 .....	109
Figura 61 - CENÁRIO DE OPERAÇÃO EXTREMA: P02 .....	110
Figura 62 - CENÁRIO DE OPERAÇÃO EXTREMA: P03 .....	111
Figura 63 - CENÁRIO DE OPERAÇÃO EXTREMA: P04 .....	112
Figura 64 - CENÁRIO DE OPERAÇÃO EXTREMA: P06 .....	113
Figura 65 - CENÁRIO DE OPERAÇÃO EXTREMA: P06 .....	114
Figura 66 - CENÁRIO DE OPERAÇÃO EXTREMA: P07 .....	115
Figura 67 - Mapa de rota de fuga - P01 .....	116
Figura 68 - Mapa de rota de fuga - P02 .....	117
Figura 69 - Mapa de rota de fuga - P03 .....	118
Figura 70 - Mapa de rota de fuga - P04 .....	119
Figura 71 - Mapa de rota de fuga - P05 .....	120
Figura 72 - Mapa de rota de fuga - P06 .....	121
Figura 73 - Mapa de rota de fuga - P07 .....	122
Figura 74 - Mapa de rota de fuga - P08 .....	123
Figura 75 - Mapa de rota de fuga - P09 .....	124
Figura 76 - Mapa de rota de fuga - P10 .....	125
Figura 77 - Mapa de rota de fuga - P11 .....	126
Figura 78 - Mapa de rota de fuga - P12 .....	127
Figura 79 - Mapa de rota de fuga - P13 .....	128

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cota X Área X Volume .....	42
Tabela 2 - Dados característicos .....	61
Tabela 3 - Dados característicos .....	62
Tabela 4 - População esperada nos pontos de encontro. ....	80
Tabela 5 - Resultados da simulação hidrodinâmica nas seções de controle.....	80

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Possíveis modos de falha para diferentes tipos de barragens.....	23
Quadro 2 - Hidrogramas de ruptura.....	31
Quadro 3 - Formulações matemáticas disponíveis para calcular a vazão de pico.....	32
Quadro 4 - Parâmetros de formação da brecha.....	33
Quadro 5 - Modelos para simulação de rompimento de barragens. ....	34
Quadro 6 - Equações utilizadas no HEC-RAS. ....	37
Quadro 7 - Ficha técnica da Barragem Bitá. ....	40
Quadro 8 - Resumo das características do material.....	43
Quadro 9 - Intensidades para diferentes tempos de recorrência e durações a partir da equação IDF Recife. ....	51
Quadro 10 - Valores dos números CN da curva de runoff para bacias rurais. ....	54
Quadro 11 - Classificação hidrológica dos solos da bacia da barragem Bitá.....	55
Quadro 12 - Critérios para graduação do nível de perigo da inundação dinâmica.....	64
Quadro 13 - Critérios para graduação do nível de perigo da inundação dinâmica.....	64
Quadro 14 - Classificação do nível de resposta.....	68

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.2	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	17
1.3	OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	18
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>19</b>
2.1	SEGURANÇA DE BARRAGENS	19
2.1.1	Plano de Ação de Emergência	21
2.2	TIPOS DE RUPTURAS DE BARRAGENS	23
2.3	RUPTURAS DE BARRAGENS DE TERRA	24
2.3.1	Galgamento	26
2.3.2	Piping	27
2.4	BRECHA DE RUPTURA	29
2.5	HIDROGRAMA DE RUPTURA	30
2.6	MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE RUPTURA	34
2.6.1	HEC-RAS	36
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>38</b>
3.1	ÁREA DE ESTUDO	38
3.2	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA BARRAGEM BITA	40
3.2.1	Ficha técnica da barragem	40
3.2.2	Material construtivo da barragem	43
3.2.3	Características hidrológicas	44
3.2.3.1	Área de drenagem	44
3.2.3.2	Coefficiente de Compacidade	45
3.2.3.3	Fator de forma	46
3.2.3.4	Índice de conformação	47
3.2.3.5	Tempo de Concentração	47

3.2.4	Dados Hidrometeorológicos .....	48
3.2.4.1	Temperatura .....	48
3.2.4.2	Precipitação.....	49
3.2.4.3	Evapotranspiração.....	50
3.2.5	Curva Intensidade-Duração-Frequência .....	51
3.2.5.1	Chuva de Projeto – Método dos Blocos Alternados .....	51
3.2.6	Classificação Hidrológica dos Solos.....	52
3.2.7	Hidrogramas de Projeto – Método SCS.....	56
3.3	MODELAGEM DE RUPTURA .....	57
3.4	PREPARAÇÃO PARA OS DADOS DE ENTRADA.....	59
3.5	GERAÇÃO DOS MAPAS DE INUNDAÇÃO.....	64
3.6	ZONA DE AUTOSSALVAMENTO E ZONA DE SEGURANÇA SECUNDÁRIA..	65
3.7	ROTA DE FUGA .....	66
3.8	SEÇÕES DE CONTROLE.....	66
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>67</b>
4.1	AÇÕES ESPERADAS .....	68
4.2	CENÁRIO MAIS PROVÁVEL – RUPTURA POR PIPING.....	70
4.3	CENÁRIO EXTREMO – RUPTURA POR GALGAMENTO .....	71
4.4	CENÁRIO DE RUPTURA DURANTE A OPERAÇÃO HIDRÁULICA EXTREMA 72	
4.5	IDENTIFICAÇÃO DE PONTOS VULNERÁVEIS .....	73
4.6	Delimitação da Zona de Autossalvamento .....	76
4.7	Delimitação da Zona de Segurança Secundária .....	77
4.8	Rotas de fuga .....	78
4.9	Resultados da simulação nas seções de controle .....	80
4.10	Áreas de risco ambiental.....	83
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>86</b>

<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>88</b>
APÊNDICE A – MAPAS DETALHADOS DA MANCHA DE INUNDAÇÃO DO CENÁRIO 1 .....	92
APÊNDICE A – MAPAS DETALHADOS DA MANCHA DE INUNDAÇÃO DO CENÁRIO 2 .....	100
APÊNDICE A – MAPAS DETALHADOS DA MANCHA DE INUNDAÇÃO DO CENÁRIO 3 .....	109
APÊNDICE A – MAPAS DETALHADOS DA ROTA DE FUGA .....	116

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A gestão dos recursos hídricos é um desafio constante principalmente no atual cenário de aquecimento global, chuvas fortes e concentradas e longos períodos de estiagem, desempenhando um papel crucial no progresso da humanidade. Nesse contexto, a construção de barragens emerge como uma solução, proporcionando benefícios substanciais ao possibilitar o armazenamento de água mesmo durante períodos de seca. Isso resulta em uma melhoria significativa na qualidade de vida criando condições propícias para o crescimento urbano.

As barragens desempenham um papel central na sustentação de atividades econômicas fundamentais, como a geração de energia, o abastecimento de água e o controle de enchentes. No entanto, sua construção e operação requerem vigilância devido ao risco significativo de eventos devastadores como o recente desastre na Líbia. Segundo o CNN Brasil (2023) “As chuvas da tempestade Daniel causaram o rompimento de duas barragens, resultando em mais de 5,3 mil mortes e 10 mil desaparecidos”. Este trágico incidente destaca a urgência na implementação de medidas de segurança e gestão eficazes para prevenir impactos sociais, econômicos e ambientais catastróficos relacionados a barragens em todo o mundo.

De acordo com o Relatório de Segurança de Barragens (RSB) de 2021, ocorreram 13 acidentes e 37 incidentes em 16 estados durante o ano no Brasil, com a maioria concentrada na região central do país. Esses números destacam a crescente preocupação com a segurança das barragens em todo o país, devido ao aumento no número de construções e ao envelhecimento das estruturas.

A *International Committee of the Red Cross* (IFRC, 2012) define desastres como eventos súbitos e calamitosos que interrompem as atividades de uma sociedade ou comunidade, causando perdas humanas, materiais, econômicas ou ambientais que excedem a capacidade de recuperação da sociedade ou comunidade afetada apenas com seus próprios recursos. Essa definição enfatiza a importância de abordar não apenas os desastres naturais, mas também as falhas nas estruturas humanas, que podem se tornar fontes significativas de desastres caso não sejam adequadamente gerenciadas e monitoradas.

Torna-se crucial incentivar o avanço das pesquisas e descobertas relacionadas às abordagens de gestão de segurança de barramentos. Isso contribui de maneira significativa para a identificação e correção de possíveis problemas e métodos ineficazes.

Nesse contexto, a Barragem de Bitá, localizada em Pernambuco, é um componente vital na região de Ipojuca, fornecendo recursos hídricos essenciais para a comunidade. A lei nº

14.066/2020 (Brasil, 2020) estabelece critérios específicos para a segurança de barragens, que caso sejam atendidos, indicam a obrigatoriedade de um estudo para avaliação de segurança e conformidade legal. A Barragem de Bitá possui 19 metros de altura, atendendo assim ao critério que refere que a altura do maciço deve ser igual ou superior a 15 metros para ser englobada pela Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Além disso, de acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), a barragem se enquadra na categoria de Dano Potencial Associado (DPA) considerado alto e na categoria de risco alto, conforme critérios estabelecidos pelo órgão fiscalizador. Logo é imperativo realizar uma avaliação completa da segurança dessa estrutura, incluindo a análise de medidas preventivas, a implementação de um plano de ação emergencial e a consideração dos impactos socioambientais em caso de ruptura.

O principal objetivo deste trabalho é conduzir uma análise detalhada da segurança da Barragem de Bitá, com foco na avaliação das medidas preventivas, na implementação de um plano de ação emergencial e nos impactos socioambientais potenciais. Serão abordados aspectos relacionados à hidrologia, aos recursos hídricos e aos cenários de risco, fornecendo informações essenciais para a tomada de decisões e aprimoramento da segurança da estrutura.

## 1.2 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

A análise aprofundada proposta nesta pesquisa se faz necessária para a garantia da segurança da população de localidades próximas à Barragem de Bitá, observando a vida humana como o ativo mais valioso a ser afetado por possíveis rupturas. O estudo visa identificar riscos e implementar medidas para proteger as 98.932 pessoas residentes em Ipojuca, conforme o censo demográfico de 2022.

Esta pesquisa é enriquecida pela experiência adquirida durante meu estágio na Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), na Gerência de Segurança de Barragens. Durante esse período, pude participar ativamente da realização de simulações de ruptura e do desenvolvimento de planos de ações emergenciais. Este envolvimento direto permitiu-me compreender a complexidade das estratégias de prevenção e resposta diante de potenciais cenários de crise.

Além disso, tal pesquisa se faz primordial para manter a segurança econômica de um dos polos de geração de renda do estado. O documento “Estratégia de Longo Prazo 2023-2027- SUAPE”, dimensiona mais de 220 empresas no Complexo de SUAPE, aos quais estariam em risco com uma possível ruptura.

Por fim, também é necessário a análise de impactos ambientais, considerando a presença da Unidade de Conservação Estação Ecológica Bita e Utinga e a concentração de mata atlântica próximo ao local da barragem. A ruptura da barragem de Bita pode causar danos significativos, sendo crucial avaliar e minimizar impactos para preservar ecossistemas locais, evitar a poluição da água e a perda de habitats naturais.

### 1.3 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

Esta pesquisa visa realizar uma análise de impacto de uma possível ruptura da Barragem de Bita, determinando a Zonas de Autossalvamento (ZAS), Zona de Segurança (ZSS) e possíveis impactos socioambientais.

Como objetivos específicos, pode-se listar:

- Caracterizar a bacia hidrográfica da Barragem de Bita e analisar seu regime pluviométrico;
- Estimar vazões de projeto utilizando curvas Intensidade, Duração e Frequência (IDF);
- Delimitar a Zona de autossalvamento e a Zona de Segurança;
- Avaliar as possíveis rotas de fugas;
- Investigar os impactos socioambientais decorrentes da ruptura da barragem;
- Mapear as residências dentro da Zona de Autossalvamento.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 SEGURANÇA DE BARRAGENS**

Segundo o Ministério da Integração Nacional (2002), as barragens são obras que carregam consigo um elevado potencial de risco devido à possibilidade de colapso, o que pode resultar em consequências catastróficas. Isso inclui danos às próprias estruturas das barragens, à biodiversidade do meio ambiente, com a destruição de fauna e flora, e, principalmente, à perda de vidas humanas. Conforme informações fornecidas pelo Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), o país conta com um total de 26.185 barragens cadastradas até o ano de 2024. No entanto, destaca-se que apenas 5.920 dessas barragens estão classificadas quanto ao Dano Potencial Associado (DPA), enquanto as demais ainda não possuem essa categorização. Esses números ressaltam a necessidade de uma atenção especial à segurança dessas estruturas para garantir a proteção adequada das comunidades e do meio ambiente.

Neste contexto, a regulamentação e a aplicação de critérios específicos desempenham um papel fundamental na definição dos padrões de segurança necessários. Os critérios de classificação e regulamentação desempenham um papel crucial na definição dos padrões de segurança de barragens. De acordo com a legislação nacional, a escrita da Lei Nº. 12.334/2010, que foi posteriormente aprimorada pela Lei nº 14.066/2020, que versa acerca da Política Nacional de Segurança de Barragens, e resoluções do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), diversas características são consideradas na classificação de barragens. Estes critérios incluem:

1. Altura do maciço, medida do encontro do pé do talude de jusante com o nível do solo até a crista de coroamento do barramento, maior ou igual a 15 (quinze) metros;
2. Categoria de dano potencial associado médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas;
3. Categoria de risco alto, a critério do órgão fiscalizador.

A avaliação de riscos envolve a análise minuciosa de uma série de fatores, incluindo as características da barragem, a geologia e hidrologia da região, a população e infraestrutura nas áreas de influência, bem como as consequências potenciais de diferentes cenários de falha. Em paralelo, a análise do Dano Potencial Associado avalia os impactos econômicos,

sociais e ambientais que podem ocorrer em decorrência de uma possível ruptura da barragem. Esses processos fornecem informações valiosas para a tomada de decisões informadas em relação à segurança das barragens, orientando a implementação de medidas de mitigação e o desenvolvimento de planos de emergência eficazes.

A observância estrita de normas técnicas e a adoção de boas práticas são pilares essenciais na busca pela segurança de barragens. Normas técnicas estabelecem diretrizes detalhadas para o projeto, construção, operação e manutenção dessas estruturas. Elas abrangem aspectos que vão desde o dimensionamento dos materiais à gestão de resíduos e a segurança das estruturas de controle. O cumprimento rigoroso dessas normas é imperativo para garantir que as barragens atendam aos mais altos padrões de qualidade e segurança.

A análise de casos de estudo e exemplos relevantes de barragens é essencial para compreender os desafios e lições aprendidas no campo da segurança de barragens, especialmente no contexto brasileiro. Um exemplo notável é o desastre ocorrido em Sairé, Pernambuco, em junho de 2020, conforme noticiário apresentado pela CNB Recife, a barragem de abastecimento localizada no sítio Estivas rompeu devido ao excesso de chuva, trazendo como consequência a inundação de parte de Sairé e dos municípios de Barra de Guabiraba e Cortês, que estão localizados no fluxo do rio. Esse trágico incidente lançou luz sobre a necessidade de um controle mais rigoroso e eficaz das barragens no país.

A segurança de barragens é um tópico de extrema relevância e complexidade, abrangendo critérios rigorosos de classificação, regulamentações detalhadas, avaliações de riscos, normas técnicas, monitoramento constante e aprendizado com exemplos passados. A proteção da vida humana, do meio ambiente e dos recursos hídricos depende da aplicação diligente dessas práticas. A garantia da segurança de barragens é um compromisso contínuo que exige a cooperação de especialistas, reguladores, operadores e comunidades locais.

O Plano de Segurança de Barragem (PSB) é um componente fundamental da gestão da segurança de barragens. Ele é um instrumento de planejamento elaborado pelo empreendedor, responsável pela barragem, e tem como objetivo principal estabelecer diretrizes, procedimentos e ações que visam garantir a segurança da estrutura e a proteção das comunidades a jusante em caso de emergência. Como previsto no Art. 8º da Lei de Segurança de Barragens, o PSB deve compreender, no mínimo, as seguintes informações:

1. Plano de Ação de Emergência (PAE), exigido conforme o art. 11 desta Lei;
2. Relatórios das inspeções de segurança regular e especial
3. Identificação e avaliação dos riscos, com definição das hipóteses e dos

- cenários possíveis de acidente ou desastre;
4. Mapa de inundação, considerado o pior cenário identificado;
  5. Identificação e dados técnicos das estruturas, das instalações e dos equipamentos de monitoramento da barragem.

A segurança de barragens é uma exigência que transcende os campos da engenharia, meio ambiente e gestão de recursos hídricos. A complexidade desse desafio exige a aplicação rigorosa de critérios de classificação, regulamentações específicas e boas práticas de engenharia. É uma responsabilidade compartilhada por empreendedores, órgãos reguladores, especialistas e comunidades locais.

#### 2.1.1 Plano de Ação de Emergência

O Plano de Ação de Emergência (PAE), no contexto da PNSB representa uma ferramenta de suma importância na gestão e monitoramento das barragens, sendo sua elaboração um requisito obrigatório estabelecido pela legislação federal. A Lei Federal nº 14.066/2020, delinea a PNSB e aborda a responsabilidade de elaborar esses planos para todas as estruturas de contenção de rejeitos, resíduos, sedimentos e/ou acumulação de água classificadas como de Dano Potencial Associado alto.

A PNSB tem como pilares fundamentais a prevenção, a preparação e a resposta a situações emergenciais envolvendo barragens. Nesse contexto, o Plano de Ação de Emergência assume um papel central, uma vez que visa aprimorar a preparação e a prontidão das partes envolvidas para lidar com situações de risco em barragens, protegendo vidas, o meio ambiente e a infraestrutura local. Dentro do plano e conforme o Art. 12º da lei de segurança de barragens de 2020, é essencial incluir no PAE pelo menos:

1. Descrição das instalações da barragem e das possíveis situações de emergência;
2. Procedimentos para identificação e notificação de mau funcionamento, de condições potenciais de ruptura da barragem ou de outras ocorrências anormais;
3. Procedimentos preventivos e corretivos e ações de resposta às situações emergenciais identificadas nos cenários acidentais;
4. Programas de treinamento e divulgação para os envolvidos e para as comunidades potencialmente afetadas, com a realização de exercícios

- simulados periódicos;
5. Atribuições e responsabilidades dos envolvidos e fluxograma de acionamento;
  6. Medidas específicas, em articulação com o poder público, para resgatar atingidos, pessoas e animais, para mitigar impactos ambientais, para assegurar o abastecimento de água potável e para resgatar e salvaguardar o patrimônio cultural;
  7. Dimensionamento dos recursos humanos e materiais necessários para resposta ao pior cenário identificado;
  8. Delimitação da Zona de Autossalvamento (ZAS) e da Zona de Segurança Secundária (ZSS), a partir do mapa de inundação referido no inciso XI do caput do art. 8º desta Lei;
  9. Levantamento cadastral e mapeamento atualizado da população existente na ZAS, incluindo a identificação de vulnerabilidades sociais;
  10. Sistema de monitoramento e controle de estabilidade da barragem integrado aos procedimentos emergenciais;
  11. Plano de comunicação, incluindo contatos dos responsáveis pelo PAE no empreendimento, da prefeitura municipal, dos órgãos de segurança pública e de proteção e defesa civil, das unidades hospitalares mais próximas e das demais entidades envolvidas;
  12. Previsão de instalação de sistema sonoro ou de outra solução tecnológica de maior eficácia em situação de alerta ou emergência, com alcance definido pelo órgão fiscalizador;
  13. Planejamento de rotas de fuga e pontos de encontro, com a respectiva sinalização.

É importante ressaltar que, dado o contexto sensível da possibilidade de ruptura da barragem, a realização de simulações de ruptura desempenha um papel fundamental. Essas simulações permitem a elaboração precisa dos mapas de inundação, contribuindo para um planejamento mais eficaz e para a proteção das comunidades e do meio ambiente.

Assim, o PAE não apenas atende às obrigações legais, mas também representa uma ferramenta vital na gestão proativa de situações de risco em barragens, garantindo a segurança das pessoas, a preservação do ecossistema e a integridade da infraestrutura local.

## 2.2 TIPOS DE RUPTURAS DE BARRAGENS

A ruptura de barragens é uma ocorrência caracterizada pela falha estrutural de uma barragem, podendo ser influenciada por diversos fatores, além do tipo específico da barragem em questão.

De acordo com a Eletrobrás (2003), as barragens podem sofrer rupturas devido as seguintes causas:

- Rompimento de um dos taludes da barragem pela estabilidade ao cisalhamento (montante ou jusante);
- Ruptura da fundação (fratura de rocha, deslizamento de camadas, etc.);
- Galgamento, normalmente por evento hidrológico extremo;
- Ruptura por *piping*, em função de falhas no corpo da barragem;
- Ações de guerra ou terroristas.

Estas causas de rupturas deverão ser analisadas para a barragem em questão, desprezando-se os casos impossíveis e concentrando-se nos casos possíveis, mesmo que com baixa probabilidade (Eletrobrás, 2023).

O tipo de barragem é um dos fatores mais influentes na causa das rupturas. As barragens de concreto estão mais propensas a enfrentar problemas na estrutura ou na fundação, já as barragens de terra estão mais sujeitas à erosão interna e ao fenômeno de galgamento (Collischonn, 1997).

O Quadro 1 apresenta diversos tipos de falhas e sua relação com os diferentes tipos de barragens.

Quadro 1 - Possíveis modos de falha para diferentes tipos de barragens.

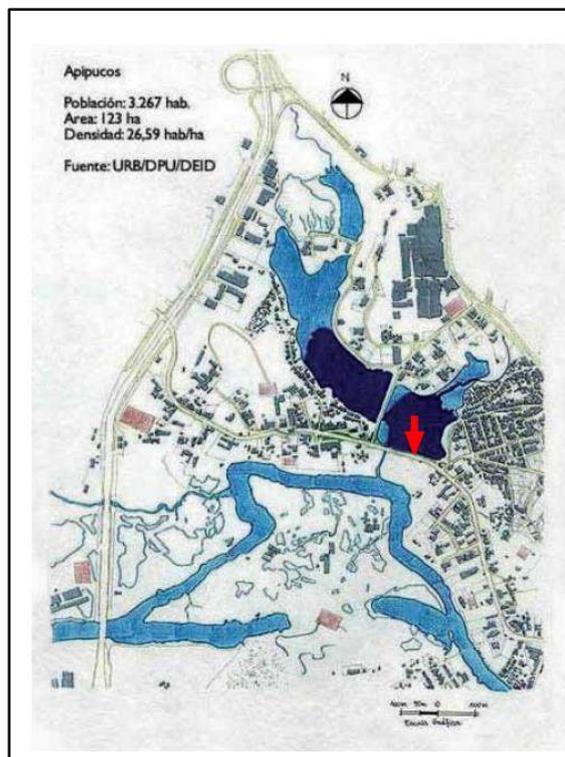
Tipo de falha	Terra	Concreto Gravidade	Concreto Arco	Contra - forte	Concreto arcos- múltiplos
<b>Galgamento</b>	X	X	X	X	X
<i>Piping</i>	X	X	X	X	X
<b>Defeitos nas fundações</b>	X	X	X	X	X
<b>Escorregamentos</b>	X	X		X	
<b>Tombamentos</b>		X	X		
<b>Rachaduras</b>	X	X	X	X	X
<b>Falhas de equipamento</b>	X	X	X	X	X

Fonte: Adaptado de USACE (2014).

### 2.3 RUPTURAS DE BARRAGENS DE TERRA

Segundo FAO (2011) “As barragens de terra têm sido usadas desde tempos mais remotos com a finalidade de aprisionar e desviar o fluxo de água”. Conforme o Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB), um exemplo notável de uso de barragens de terra é o açude de Apipucos, localizado na área urbana do Recife, PE, considerado a mais antiga barragem documentada no Brasil. Sua presença é registrada em um mapa holandês de 1577, como mostrado na Figura 1 (CBDB, 2011).

Figura 1 - Mapa holandês de 1577 da região de Apipucos destacando o açude Apipucos.



Fonte: CBDB, 2011.

As barragens de terra são estruturas simples compactadas que dependem de sua massa para resistir ao deslizamento e tombamento e são encontradas em todo o mundo. Demonstra-se na Figura 2 a barragem de Bitá, que é uma barragem de terra (FAO, 2011).

Figura 2 - Barragem de Bita.

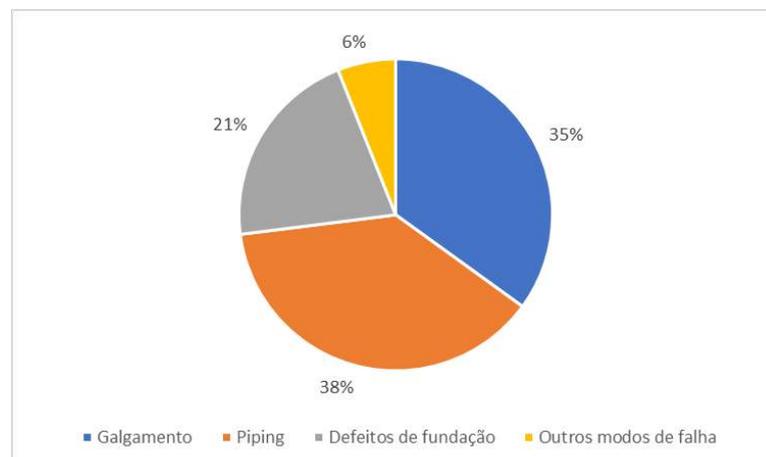


Fonte: Autor.

Uma das desvantagens da construção de uma barragem de terra é sua susceptibilidade a problemas causados pela água em contato com a estrutura. Além disso, é necessário extremo cuidado na compactação do solo e um acompanhamento periódico para detectar possíveis pontos frágeis ou vazamentos na estrutura (Abreu, 2015).

É essencial reconhecer que o risco de ruptura de uma barragem nunca pode ser completamente eliminado. Portanto, todos os possíveis efeitos, mesmo os de baixa probabilidade, devem ser cuidadosamente considerados durante a concepção de projetos civis de barragens. De acordo com os estudos de Costa (1985), as principais causas de ruptura em barragens de terra estão apresentadas na Figura 3.

Figura 3 - Principais causas de ruptura em barragens de terra.



Fonte: Adaptado de Costa (1985).

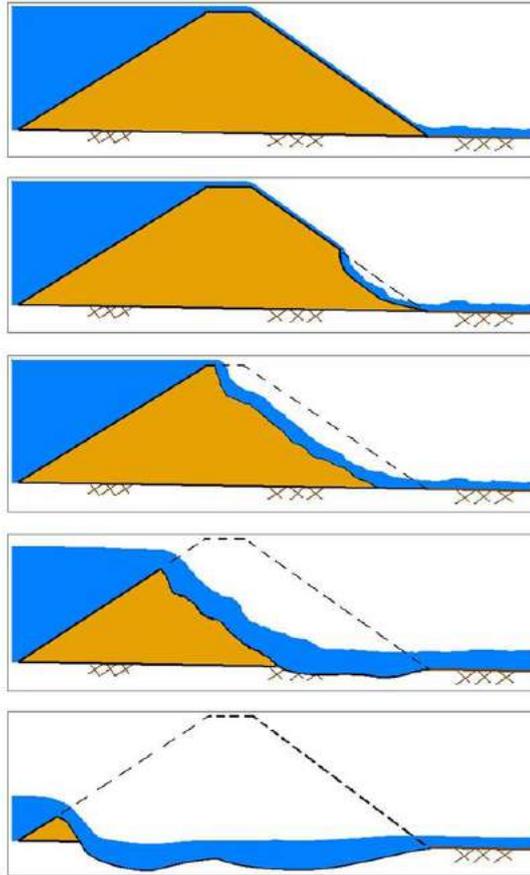
Conforme apresentado no gráfico, a ruptura por piping e galgamento são as mais comuns, o que confirma as observações de Caputo (1987), que destacou esses fenômenos como as causas predominantes de rupturas em barragens de terra. Dada a proeminência das causas apresentadas, serão descritos os principais mecanismos de ruptura de barragens de terra a partir das estatísticas.

### 2.3.1 Galgamento

O galgamento é um termo que se refere a um mecanismo de ruptura em barragens que ocorre quando frente de cheia, geralmente causada por eventos como chuvas intensas ou o rompimento de uma barragem a montante, se propaga e passa rapidamente sobre a crista da barragem.

Barragens de terra não suportam o transbordamento e se forem galgadas certamente irão romper (Oliveira, 2008). No galgamento de barragem, ela funciona como um vertedor espesso, e a ruptura geralmente tem início na face a jusante, perto da base, expandindo-se para montante e para os lados. À medida que a água passa sobre o coroamento, seu padrão de escoamento sofre alterações, o que contribui para a erosão e pode levar ao colapso da barragem. Figura 4 representa visualmente o processo de ruptura por galgamento.

Figura 4 - Processo de rompimento por galgamento.



Fonte: USACE (2014).

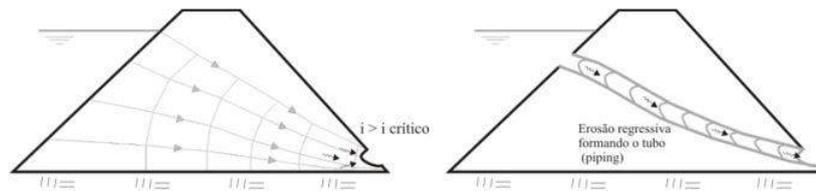
Compreender a variabilidade na ocorrência do galgamento requer uma análise minuciosa das incertezas associadas a esse fenômeno. Essa abordagem é essencial para desvendar os fatores que contribuem para a sua manifestação e para identificar possíveis fontes de incerteza ao longo desse processo complexo.

### 2.3.2 Piping

A ruptura de uma barragem por *piping* ocorre devido à erosão interna que pode ser progressiva ou retrogressiva, e à formação de canais internos, tubos, que comprometem a integridade da estrutura. O processo geralmente começa com a infiltração de água na barragem, que, sob pressão hidrostática, começa a fluir de montante para jusante provocando a erosão do solo ou o material de enchimento da barragem de dentro para fora. Conforme essa erosão continua aumentando progressivamente devido as tensões de fluxo, ela forma canais ou tubulações internas, que permitem que a água flua por dentro da barragem, enfraquecendo-a. A Figura 5 apresenta o início da erosão retrogressiva no talude de jusante devido à pressão

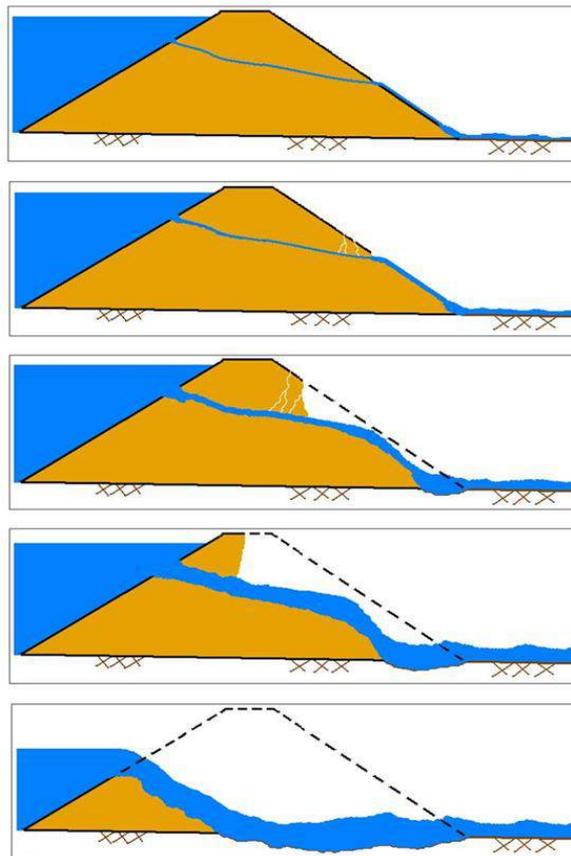
hidrostática e seu avanço para o talude de montante enquanto a Figura 6 representa visualmente o processo de ruptura por piping.

Figura 5 - Início da erosão retrogressiva.



Fonte: Perini (2009).

Figura 6 - Processo de rompimento por piping.



Fonte: USACE (2014).

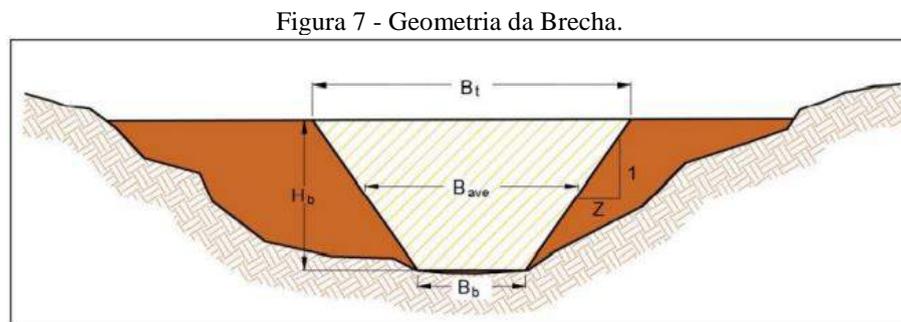
Os fatores que causam o início, a continuação e a progressão da erosão, bem como a abertura de brechas, são fortemente afetadas pelo gradiente hidráulico. Portanto, é crucial considerar sempre essa informação nas análises relacionadas ao fenômeno de *piping* (Perini, 2009).

## 2.4 BRECHA DE RUPTURA

Os parâmetros que influenciam a formação da brecha afetam o hidrograma resultante da ruptura da barragem. Portanto, a estimativa da onda de cheia está intrinsecamente ligada ao processo de cálculo da brecha. Essa determinação da brecha é realizada por meio da aplicação de modelos matemáticos de regressão (USACE, 2014).

Os parâmetros característicos da brecha podem ser divididos em dois grupos: parâmetros geométricos e hidrográficos (Xu & Zhang, 2009). O parâmetro geométrico da brecha engloba características como a altura, largura e inclinação dos taludes laterais. Por outro lado, o parâmetro hidrológico está relacionado à vazão máxima e ao tempo de desenvolvimento da cheia resultante da ruptura da barragem (Rocha, 2016).

Na Figura 7, estão representados os elementos que descrevem os parâmetros geométricos da brecha, sendo a altura da brecha ( $H_b$ ), a largura média ( $B_{ave}$ ) e o fator de inclinação lateral ( $Z$ ).



Fonte: (ROCHA, 2016).

A formação da brecha está diretamente relacionada ao tipo de barragem sob consideração. No contexto das barragens de concreto, é mais comum que a ruptura seja um evento instantâneo, frequentemente resultando no colapso total da estrutura. Por outro lado, em relação às barragens de terra, é mais apropriado considerar a ruptura como um processo progressivo, e de acordo com estudos anteriores verifica-se que a geometria final da brecha tende a assumir uma forma trapezoidal (Froehlich & Tufail, 2004).

A Figura 8 esquematiza o processo de evolução do fenômeno de *piping*, que se inicia com a criação de um canal concentrado no interior do maciço da barragem e progride até a formação de uma brecha mais ampla, culminando na eventual ruptura da barragem.

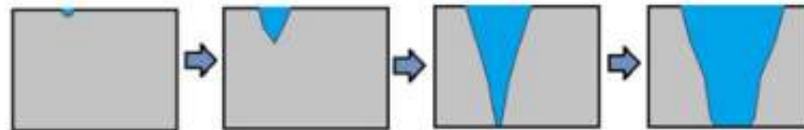
Figura 8- Formação de brecha por piping.



Fonte: (Faria, 2019)

A Figura 9 apresenta a evolução do processo de formação da brecha causada pelo galgamento da seguinte forma: o processo tem início em um ponto de fragilidade ou de cota mais baixa, dando origem a uma brecha inicial em forma de "V". Posteriormente, essa brecha se aprofunda, alarga-se lateralmente devido à erosão e, por fim, culmina na ruptura da estrutura.

Figura 9 - Formação de brecha por galgamento.



Fonte: (Faria, 2019)

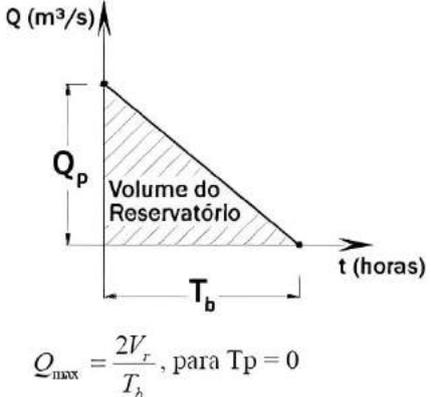
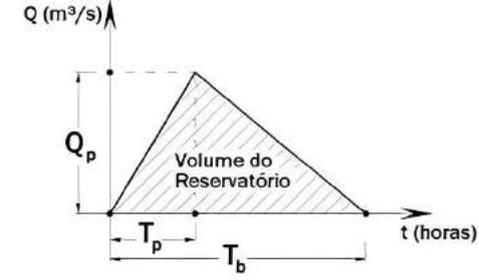
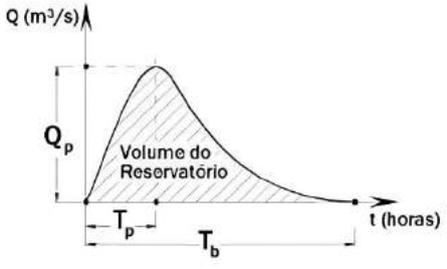
## 2.5 HIDROGRAMA DE RUPTURA

Para simular o evento de ruptura, o primeiro passo essencial é criar o hidrograma da vazão efluente no momento da ruptura (USACE, 2014).

O hidrograma de ruptura é uma representação gráfica que descreve a variação da vazão de água em um rio ou canal durante e após a ocorrência de uma ruptura de barragem ou evento similar, sendo que o valor máximo de vazão ocorre no ponto mais alto do hidrograma em um momento específico. Ele é uma ferramenta fundamental na gestão de riscos de inundação e no planejamento de medidas de segurança relacionadas a barragens.

Para a geração dos hidrogramas de ruptura, deve ser utilizado dados relacionados aos parâmetros fisiográficos da bacia, como declividade e tempo de concentração, informações sobre o trânsito de cheias, incluindo cotas de volume e cotas de descarga, bem como dados meteorológicos, como chuvas. Também deve ser considerado os parâmetros relativos à formação da brecha e seu ponto de gatilho, assim como os volumes da água que se propagam após a ruptura. É possível empregar os seguintes tipos de hidrogramas para simular a propagação da onda de cheia, sendo  $Q_p$  ou  $Q_{max}$  a descarga máxima defluente da barragem em ruptura ( $m^3/s$ ),  $V_r$  o volume do reservatório da barragem no momento da ruptura ( $m^3$ ),  $T_p$  é o tempo de pico (s),  $T_b$  é o tempo de base (s) e  $k$  é o fator de ponderação, varia entre 0,1 a 0,5.

No Quadro 2 é apresentado os tipos de hidrograma.

Autor	Hidrograma
<p>Hidrograma Triangular Simplificado Mascarenhas (1990)</p>	 $Q_{\max} = \frac{2V_r}{T_b}, \text{ para } T_p = 0$
<p>Hidrograma Triangular Gradual Mascarenhas (1990)</p>	 $Q(t) = Q_{\max} - Q_{\max} \left( \frac{t - T_p}{T_b - T_p} \right), \text{ para } T_p \neq 0$
<p>Hidrograma com Decaimento Parabólico Barfield et al. (1981) apud Brasil (2005)</p>	 $Q(t) = Q_{\max} \left[ \left( \frac{t}{T_p} \right) e^{\left( 1 - \frac{t}{T_p} \right)} \right]^k$

Fonte: Adaptado de BRASIL (2005).

O Hidrograma com Decaimento Parabólico foi utilizado no presente estudo devido à natureza da barragem em questão, que é de terra construída do tipo homogênea. Esta escolha estratégica se baseia na capacidade desse modelo de representar o tempo de esvaziamento de forma mais gradual, em comparação com abordagens como o hidrograma triangular. Em

barragens de terra, é comum observar trechos de descida que exibem um decaimento aproximadamente exponencial. A aplicação do Hidrograma com Decaimento Parabólico visa, assim, fornecer uma representação mais condizente com os padrões observados em situações reais, contribuindo para uma análise mais precisa e detalhada do comportamento hidrológico específico dessa infraestrutura.

A fim de determinar a vazão máxima resultante da ruptura, diversos autores desenvolveram expressões matemáticas que relacionam essa vazão máxima com características específicas da barragem. Dentre as diferentes equações elaboradas com base em barragens de terra e enrocamento, destacam-se os estudos de MacDonald e Langridge-Monopolis (1984), Von Thun e Gillette (1990), Froehlich (1995), Froehlich (2008), e Xu e Zhang (2009), entre outros. No Quadro 3 são apresentadas algumas dessas equações.

Quadro 3 - Formulações matemáticas disponíveis para calcular a vazão de pico.

<b>Autores</b>	<b>Largura média (m)</b>	<b>Tempo de formação (h)</b>	<b>Vazão de Pico (m<sup>3</sup>/s)</b>
<b>Froehlich (1995)</b>	$B = 0,1803K_o * V_w^{0,32} * h_b^{0,19}$	$t_f = 0,00254 * V_w^{0,53} * h_b^{-0,9}$	$Qp = 0,607 * K_o * V_w^{0,295} * h_b^{1,24}$
<b>Von Thun e Gillette (1990)</b>	$B = 2,5h_w + C_b$	(1) $t_f = \frac{B}{4h_w}$ (2) $t_f = \frac{B}{(4h_w + 61)}$	-
<b>Hagen (1982)</b>	-	-	$Qp = 325(V_w * h_w * 10^{-6})^{0,42}$
<b>McDonald e Langridge-Monopolis (1984)</b>	-	$t_f = 0,0179 * V_{er}^{0,364}$	$Qp = 1,154 * (V_w * h_w)^{0,412}$
<b>Bureau of Reclamation (1988)</b>	$B = 3h_w$	$t_f = 0,011 * B$	$Qp = 19,1h_b^{1,85}$
<b>Crítério da Eletrobrás</b>	$B = 2,1576K_o(V_w * h_w)^{0,25}$	$t_f = 0,00714 * V_w^{0,47} * h_w^{-0,9}$	-
<b>Kirkpatrick (1977)</b>	-	-	$Qp = 1,268(h_w + 0,3)^{2,5}$

Fonte: Adaptado USACE (2014).

Onde: B = largura média da brecha (m); C<sub>b</sub> = coeficiente empírico característico do material; h<sub>b</sub> = altura da brecha (m); h<sub>d</sub> = altura da barragem (m); h<sub>w</sub> = altura de água acima do fundo da brecha (m); K<sub>o</sub> = coeficiente empírico dependente do tipo de rompimento; Q<sub>p</sub> = vazão de pico; t<sub>f</sub> = tempo de formação da brecha (h); V<sub>w</sub> = volume de água acima do fundo da brecha (m<sup>3</sup>); V<sub>er</sub> = Volume de material erodido (m<sup>3</sup>).

Nesse trabalho será utilizado as equações de regressão propostas por Froehlich (1995), pois além de se destacarem como ferramentas analíticas fundamentais, são amplamente reconhecidas e utilizadas em estudos de ruptura de barragens de terra, essas equações oferecem uma base sólida para a determinação dos parâmetros relacionados às brechas, proporcionando uma compreensão aprofundada do comportamento hidráulico em barragens. É importante enfatizar certos parâmetros específicos ao aplicar as equações de Froehlich(1995) neste estudo. Destacam-se o coeficiente  $K_0$ , definido em 1,4 para galgamento e 1,0 para *piping*.

O tempo de pico está correlacionado com a evolução da brecha e, em geral, é determinado com base em tabelas que consideram as características específicas das barragens e o tipo da brecha. No Quadro 4, são apresentadas formulações que podem ser utilizadas como referência para as simulações, os parâmetros que descrevem a formação da brecha, incluindo o tempo de ruptura e as dimensões, são estabelecidos pelo US Army Corps of Engineers (USACE, 2014).

Quadro 4 - Parâmetros de formação da brecha.

País	Tipo de barragem	Tempo de ruptura – $t_f$ (horas)	Declivida de das laterais (H:V)	Largura média da brecha - $B_m$	Referência
USA (USACE, 2014)	Terra e enrocamento	Entre 0.1 e 1.0	Entre 0.0 e 1.0	Entre 2.0HD e 5.0 HD	NWS
		Entre 0.1 e 4.0	Entre 0.0 e 1.0	Entre 0.5HD e 5.0 HD	USACE 2007
	Gravidade	Entre 0.1 e 0.2	Vertical	$\leq 0.5 L$	NWS
		Entre 0.1 e 0.5	Vertical	Múltiplos Trechos	USACE 2007
	Arco	$\leq 0.1$	Vertical	$0.8L$ e $L$	NWS
		$\leq 0.1$	Vertical	$0.8L$ e $L$	USACE 2007
	Rejeito	Entre 0.1 e 0.3	Entre 1.0 e 2.0	$0.8L$ e $L$	FERC
		$\leq 0.1$	Entre 1.0 e 2.0	$0.8L$ e $L$	NWS

Fonte: Adaptado de USACE (2014).

Com os parâmetros citados acima, como a vazão de pico, o tempo de pico e o tempo de base, é possível criar o hidrograma de ruptura.

## 2.6 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE RUPTURA

O emprego da modelagem matemática assume uma posição de suma importância na garantia da integridade das barragens. Essa abordagem proporciona uma compreensão minuciosa e a capacidade de antever o comportamento das estruturas em uma gama variada de cenários, abarcando inclusive situações de potenciais rupturas. Os ganhos resultantes dessa prática reverberam tanto na segurança das próprias barragens quanto na segurança das comunidades localizadas a jusante dessas estruturas críticas.

No âmbito científico, ao longo do tempo, uma diversidade de modelos foi desenvolvida para simular o fenômeno de ruptura de barragens. Tais modelos, caracterizados por distintos níveis de complexidade, variam em termos de precisão das simulações, estabilidade numérica e robustez dos cálculos subjacentes. Isso proporciona aos engenheiros e pesquisadores a flexibilidade de escolher a abordagem que melhor se ajusta às necessidades específicas de suas análises e aos objetivos de suas investigações. No Quadro 5 estão exemplo de modelos dessas simulações

Quadro 5 - Modelos para simulação de rompimento de barragens.

<b>Simulação</b>	<b>Modelo</b>	<b>Organização/suporte</b>
<b>1D</b>	HEC-RAS	USACE
	MIKE 11	DHI
	DAMBRK	NWS
	SMPDBK	NWS
	FLDWAV	NWS
	Hydro 1D	Mott MacDonald
	InfoWorks RS	Wallingfor Software
	ISIS	Wallingfor Software
	BOSS DAMBRK	Boss International
	Sobek	WL/Delft Hydraulics
	DBK 1	IWHR, China
	Cliv PLUS	EPUSP
	HAESTED DAMBRK	HAESTED METHODS

Quadro 5 - Modelos para simulação de rompimento de barragens. (Continuação).

<b>Simulação</b>	<b>Modelo</b>	<b>Organização/suporte</b>
	LATIS	Tams
	TVDDAM	Royal Institute of Technology
	RUBAR 3	Cemagref
	SOBEK	Delft Hydraylics
	DYNET – ANUFLOOD	ANY – Reite Ltd
	RECAS	ENEL Centro di Ricerca Idraulica
	STREAM	ENEL Centro di Ricerca Idraulica
	FLORIS	ETHZ
	RUPTURE	EDF – Ladoratoire National Hydraulique
	DAMBRK – UK	Binnie & Partners
<b>2D</b>	MIKE 21	DHI
	HEC-RAS	USACE
	JFLOW	Jeremy Benn Associates
	Hydro 2D	Mott MacDonald
	DIVAST	Cardiff University
	DelftFLS	Delft Hydraulics
	SMS	USACE, EMRL E FHWA
	DBK 2	IWHR, China
	FLOOD 2D	ENEL Centro di Ricerca Idraulica
	2D-MB	ETHZ
	RUBAR 20	Cemagref
	DYX. 10	Consulting Engineers Reiter Lts
	TELEMAC-2D	EDF – Ladratoire National Hydraulique

Quadro 5 - Modelos para simulação de rompimento de barragens. (Conclusão)

Simulação	Modelo	Organização/suporte
<b>3D</b>	MIKE 3	DHI
	Hydro 3D	Mott MacDonald
	Delft 3D	Delft Hydraulics
	FLUENT	FLUENT
	TRIVAST	Cardiff University
	TELEMAC-3D	EDF – Laboratoire National Hydraulique

Fonte: Adaptado de Lauriano (2009)

### 2.6.1 HEC-RAS

O *Hydrologic Engineer Center* (HEC), integrante do *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE), é responsável pelo desenvolvimento do programa livre de modelagem hidráulica unidimensional denominado HEC-RAS, que possui a capacidade de ser aplicado não apenas na análise de rios, mas também na modelagem de situações envolvendo a possível ruptura de barragens e na simulação da propagação de enchentes. Esta ferramenta desempenha um papel crucial na avaliação de riscos e na gestão de eventos hidrológicos críticos, contribuindo para a segurança e o planejamento das áreas afetadas por tais eventos.

É possível realizar modelagem hidrodinâmica bi-dimensional (2D) com fluxo não permanente, modelagem unidimensional (1D) com fluxo não permanente, bidimensional com fluxo não permanente.

O HEC-RAS emprega as equações de *Saint Venant* como a base fundamental para suas simulações hidráulicas, permitindo a modelagem precisa de eventos de inundação e a gestão de recursos hídricos. Essas equações encapsulam os princípios de conservação de massa, e conservação da quantidade de movimento, essenciais para a análise de escoamentos não permanentes em rios e canais. No Quadro 6 estão as equações utilizadas no HEC-RAS.

Quadro 6 - Equações utilizadas no HEC-RAS.

<b>Conservação de massa:</b>	$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$
<b>Conservação da quantidade de movimento:</b>	$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (\frac{Q^2}{A})}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gAS_o - gAS_f$

Onde: Q é a vazão; t é o tempo; A é área da seção; x é a distância do trecho do rio; h é a profundidade do escoamento; S<sub>o</sub> é a declividade do fundo do rio; S<sub>f</sub> é a declividade da linha de energia; g é a aceleração da gravidade.

É de suma importância a obtenção de um modelo detalhado e preciso do terreno para a criação de um modelo hidráulico abrangente e exato. A qualidade dos dados topográficos desempenha um papel significativo nesse processo. No entanto, é importante destacar que a presença de falhas no Modelo Digital de Elevação (MDE), conhecidas como sumidouro, que conforme definido por Mendes & Cirilo (2001), referem-se a áreas circundadas por elevações com valores de cotas superiores, assemelhando-se a pequenas depressões no terreno, podem impactar adversamente a qualidade do modelo hidráulico, sendo seu preenchimento o primeiro passo para a obtenção de um modelo de terreno mais preciso.

No contexto da modelagem 2D ou modelagem combinada 1D/2D com o HEC-RAS, o processo envolve várias etapas essenciais para criar uma representação precisa da hidrologia. É necessário definir o sistema de coordenadas a ser usado no modelo por meio do RAS Mapper, geralmente selecionando um arquivo de projeção adequado. Em seguida, é crucial desenvolver um modelo digital de elevação para estabelecer propriedades geométricas e hidráulicas e para criar mapas de inundação no RAS-Mapper.

Segundo Lauriano (2009), ao criar um modelo no HEC-RAS, é essencial considerar diversos parâmetros fundamentais. Estes incluem: a condição de contorno de montante, que pode ser representada por um hidrograma de montante, a condição de contorno de jusante, que pode ser definida por aspectos como a inclinação à jusante, um cotograma ou uma curva chave de escoamento permanente; a inclusão de seções transversais ao longo do eixo do rio, conhecidas como seções topobatimétricas, a identificação e caracterização de estruturas hidráulicas presentes, tais como barragens, pontes e diques; e por fim, a especificação dos coeficientes de rugosidade da superfície, geralmente representados pelo número de Manning.

Tendo em vista a abordagem sistemática e direta fornecida pelo HEC-RAS na realização

de modelagem hidráulica, abrangendo tanto simulações 2D quanto 1D/2D, fica evidente que este programa se destaca como uma ferramenta robusta e eficaz para a análise e previsão de eventos hidrológicos. Sua capacidade de integrar informações geospaciais detalhadas e as diversas etapas envolvidas na criação de modelos hidráulicos o torna uma escolha sólida para profissionais e pesquisadores que buscam simulações precisas e abrangentes em estudos relacionados à água e ao controle de inundação.

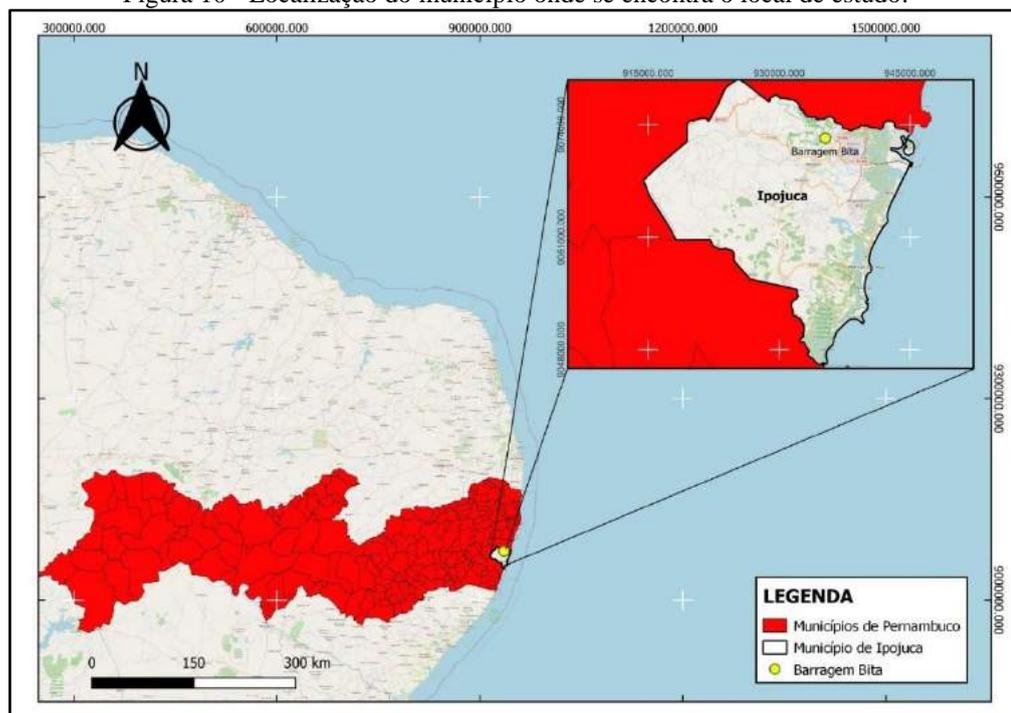
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

A Barragem de Bita, pertencente à Companhia Pernambucana de Saneamento – COMPESA, está localizada no município de Ipojuca, no estado de Pernambuco como observa-se na Figura 10.

Inserido na Mesorregião Metropolitana do Recife (RMR) e na Microrregião de SUAPE, ele desempenha um papel significativo como um dos componentes essenciais da Região, situando-se a aproximadamente 40 quilômetros ao sul da capital pernambucana.

Figura 10 - Localização do município onde se encontra o local de estudo.

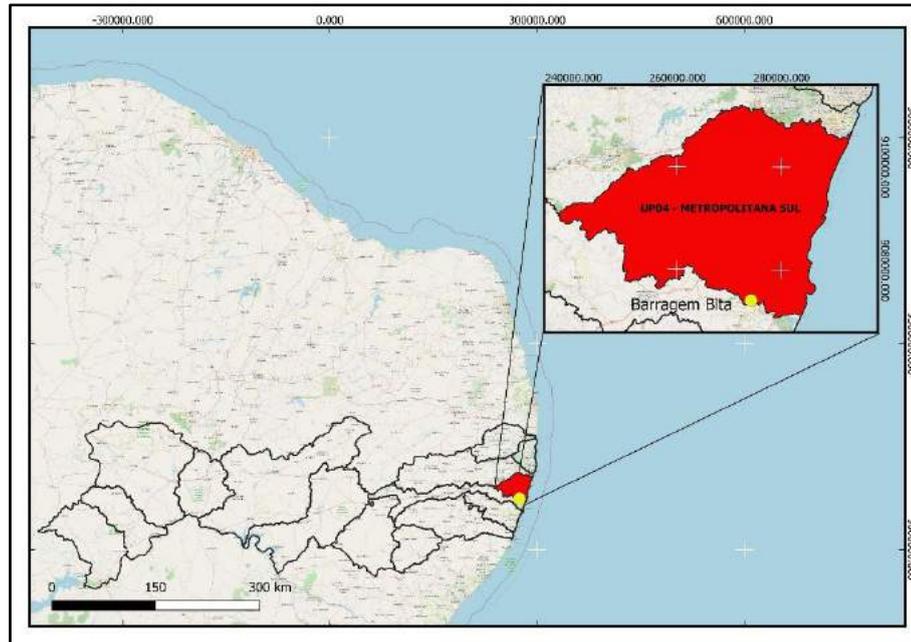


Fonte: Autor.

A Barragem de Bita está situada ao longo do rio de mesmo nome, que faz parte da bacia

hidrográfica formada pelo conjunto de rios litorâneos denominados Metropolitana Sul, englobando os principais cursos d'água da região, como os rios Pirapama, Gurjaú, Jaboatão e Duas Unas como demonstrado na Figura 11. Essa área faz parte da Unidade de Planejamento Hídrico UP04, conforme estabelecido no Plano Estadual de Recursos Hídrico (2022).

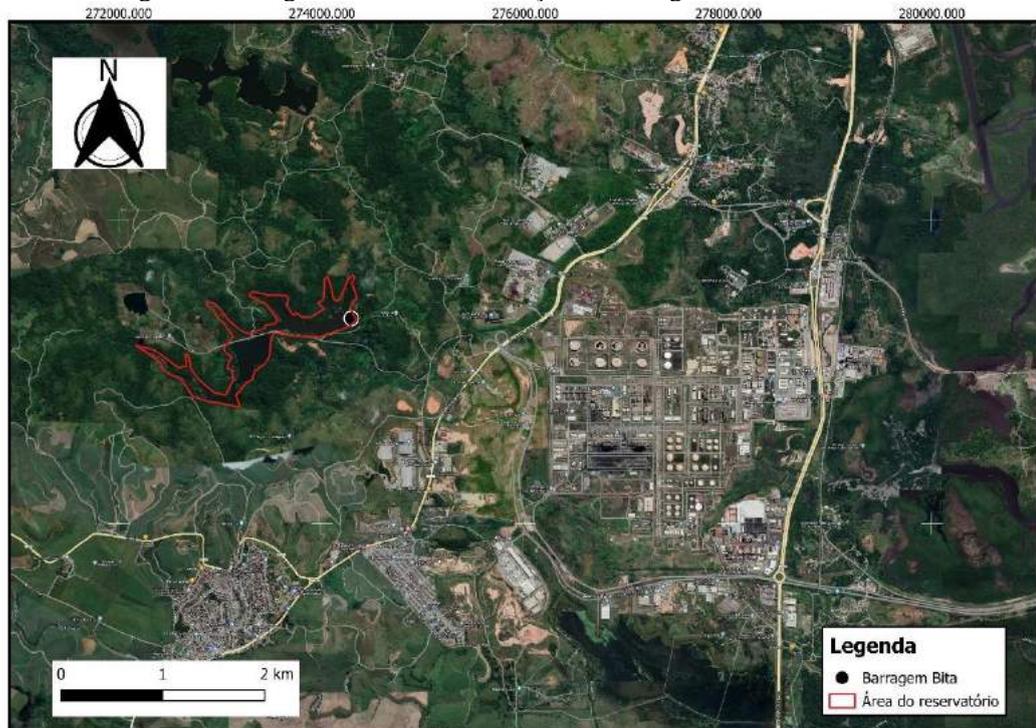
Figura 11 - Localização da Barragem Bitá na Unidade de Planejamento UP04 – Metropolitana Sul.



Fonte: Autor.

A Unidade de Planejamento UP04 – Metropolitana Sul abrange uma área total de 1.264,94 quilômetros quadrados, situada integralmente no estado de Pernambuco, correspondendo a aproximadamente 1,29% da extensão total do estado. Esta área abrange nove municípios, incluindo Cabo de Santo Agostinho e Jaboatão dos Guararapes, que estão completamente inseridos na região. Além disso, o município de Moreno tem sua sede localizada dentro dos limites da unidade. Parcialmente inseridos na região estão os municípios de Escada, Pombos, Ipojuca, Recife, São Lourenço da Mata e Vitória de Santo Antão. Na Figura 12 é demonstrado o mapa de situação da barragem Bitá e seus arredores.

Figura 12 - Imagem de satélite de situação da Barragem de Bitá e arredores.



Fonte: Imagem extraída do Software Google Earth, 18/02/2024.

## 3.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA BARRAGEM BITÁ

### 3.2.1 Ficha técnica da barragem

Abaixo, encontra-se Quadro 7 com a ficha técnica detalhada da barragem Bitá, fornecendo informações relevantes sobre suas características e especificações e a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** com a relação de cota, área alagada e volume armazenado.

Quadro 7 - Ficha técnica da Barragem Bitá.

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA BARRAGEM	
DENOMINAÇÃO OFICIAL	Bitá
EMPREENDEDOR	COMPESA
ENTIDADE FISCALIZADORA	PE-APAC
LOCALIZAÇÃO	
RIO	Bitá
MUNICÍPIO	Ipojuca
UNIDADE DA FEDERAÇÃO	PE
LATITUDE	8° 22' 17.3" S
LONGITUDE	35° 2' 57.9" W
BARRAGENS A MONTANTE E A JUSANTE	Não existem

Quadro 7 - Ficha técnica da Barragem Bitá (Continuação).

<b>BARRAGEM</b>	
<b>TIPO</b>	Terra
<b>ALTURA MÁXIMA ACIMA DA FUNDAÇÃO</b>	19 m
<b>COTA DE COROAMENTO</b>	37,5 m
<b>COMPRIMENTO DO COROAMENTO</b>	345 m
<b>LARGURA DO COROAMENTO</b>	6,0 m
<b>INCLINAÇÃO TALUDE DE MONTANTE</b>	3:1
<b>INCLINAÇÃO TALUDE DE JUSANTE</b>	2,5:1
<b>BARRAGEM AUXILIAR</b>	
<b>TIPO</b>	Concreto + abraço em terra compactada
<b>ALTURA MÁXIMA ACIMA DA FUNDAÇÃO</b>	15 m
<b>COTA DE COROAMENTO</b>	37,5 m
<b>COMPRIMENTO DO COROAMENTO</b>	-
<b>LARGURA DO COROAMENTO</b>	6,0 m
<b>INCLINAÇÃO TALUDE MONTANTE E JUSANTE</b>	2:1
<b>BACIA HIDROGRÁFICA</b>	
<b>ÁREA</b>	19,8 km <sup>2</sup> (13,2 km <sup>2</sup> + 6,6 km <sup>2</sup> )
<b>PRECIPITAÇÃO MÉDIA NA BACIA</b>	1.888 mm/ano
<b>VOLUME ANUAL MÉDIO AFLUENTE</b>	13,4 hm <sup>3</sup>
<b>VAZÕES MÁXIMAS (Tr = 100 ANOS)</b>	149 m <sup>3</sup> /s
<b>VAZÕES MÁXIMAS (Tr = 1.000 ANOS)</b>	214 m <sup>3</sup> /s
<b>VAZÕES MÁXIMAS (Tr = 10.000 ANOS)</b>	300 m <sup>3</sup> /s
<b>RESERVATÓRIO</b>	
<b>NÍVEL MÍNIMO OPERACIONAL (NMO)</b>	20,7 m
<b>NÍVEL MÁXIMO NORMAL (NMN)</b>	34,7 m
<b>NÍVEL MÁXIMO MAXIMORUM (NMM)</b>	36,5 m
<b>CAPACIDADE (NMN)</b>	2.779.849 m <sup>3</sup>
<b>CAPACIDADE ÚTIL</b>	2.779.849 m <sup>3</sup>
<b>ÁREA INUNDADA (NMN)</b>	526.000 m <sup>2</sup>
<b>VAZÃO REGULARIZADA (90%)</b>	710 l/s (PERH, 1998)
<b>TEMPO DE Esvaziamento</b>	-
<b>LOCALIZAÇÃO</b>	Central a barragem auxiliar
<b>TIPO</b>	Creager
<b>DESCRIÇÃO ENTRADA</b>	-
<b>DESCRIÇÃO CANAL</b>	-
<b>COMPRIMENTO DO VERTEDOIRO PELA SOLEIRA</b>	42,0 m
<b>MODALIDADE DE DISSIPACÃO DE ENERGIA</b>	Salto esqui e blocos dissipadores

Quadro 7 - Ficha técnica da Barragem Bitá (Conclusão).

<b>COMPRIMENTO DO CANAL DE DISSIPACÃO</b>	<b>42,0 m</b>
<b>LARGURA DO CANAL DE DISSIPACÃO</b>	42,0 m
<b>DESCARREGADOR DE FUNDO</b>	
<b>TIPO</b>	Circular
<b>LOCALIZAÇÃO</b>	-
<b>DIÂMETRO</b>	600 mm
<b>VAZÃO (SOB O NMN)</b>	-
<b>COTA DA SOLEIRA À ENTRADA</b>	21 m
<b>TOMADA D'ÁGUA</b>	
<b>TIPO</b>	Circular
<b>DIÂMETRO</b>	1.200 mm
<b>VAZÃO (SOB O NMN)</b>	-

Fonte: Companhia Pernambucano de Saneamento (COMPESA)

Tabela 1 - Cota X Área X Volume

<b>Cota, (m)</b>	<b>Área, (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Volume, (m<sup>3</sup>)</b>
<b>20,7</b>	0	0
<b>21</b>	200	0
<b>22</b>	400	300
<b>23</b>	23.980	12.490
<b>24</b>	37.160	43.060
<b>25</b>	54.780	89.030
<b>26</b>	85.160	159.000
<b>27</b>	134.060	268.650
<b>28</b>	196.940	434.110
<b>29</b>	249.200	657.180
<b>30</b>	295.420	929.490
<b>31</b>	332.120	1.243.260
<b>32</b>	376.760	1.597.700
<b>33</b>	418.320	1.995.240
<b>34</b>	460.040	2.434.420
<b>34,7</b>	506.800	2.779.849
<b>35</b>	526.900	2.927.890
<b>36</b>	574.700	3.478.690
<b>36,5</b>	598.900	3.778.160
<b>37</b>	623.180	4.077.630
<b>38</b>	673.940	4.726.190
<b>39</b>	724.600	5.425.460
<b>40</b>	778.720	6.177.120
<b>41</b>	823.440	6.982.700

Fonte: Companhia Pernambucano de Saneamento (COMPESA)

### 3.2.2 Material construtivo da barragem

O material utilizado na construção de uma barragem não apenas determina sua estabilidade e durabilidade, mas também influencia diretamente sua capacidade de armazenamento de água e seu impacto ambiental. A escolha criteriosa desses materiais é fundamental para garantir a segurança e a eficiência dessa estrutura. Com base em dados fornecidos pela COMPESA, foi possível obter uma compreensão mais aprofundada do material construtivo empregado na Barragem de Bitá, conforme apresentado no Quadro 8.

Quadro 8 - Resumo das características do material.

Jazida	Furo	% #200	LL	IP	Classif. SUCS
I	F-1	72	55	23	MH
	F-2	73	56	24	MH
	F-3	72	57	26	MH
	F-4	72	53	22	MH
	F-5	72	59	20	MH
	F-6	74	59	21	MH
II	F-1	74	53	21	MH
	F-2	74	56	21	MH
	F-3	74	54	20	MH
	F-4	73	52	22	MH
	F-5	72	55	26	MH
	F-6	72	53	19	MH

Fonte: Companhia Pernambucano de Saneamento (COMPESA)

Com base nos dados fornecidos, pode-se concluir que o tipo de solo predominante no maciço da barragem é o silte. Isso é evidenciado pelos valores consistentemente altos de Limite de Liquidez (LL) e Índice de Plasticidade (IP), indicando uma composição de solo altamente plástica.

O silte, devido às suas características de granulometria e permeabilidade, pode ser mais suscetível a processos de erosão interna, aumentando o risco de falha por piping, o que destaca ainda mais a necessidade de monitoramento e manutenção rigorosos.

### 3.2.3 Características hidrológicas

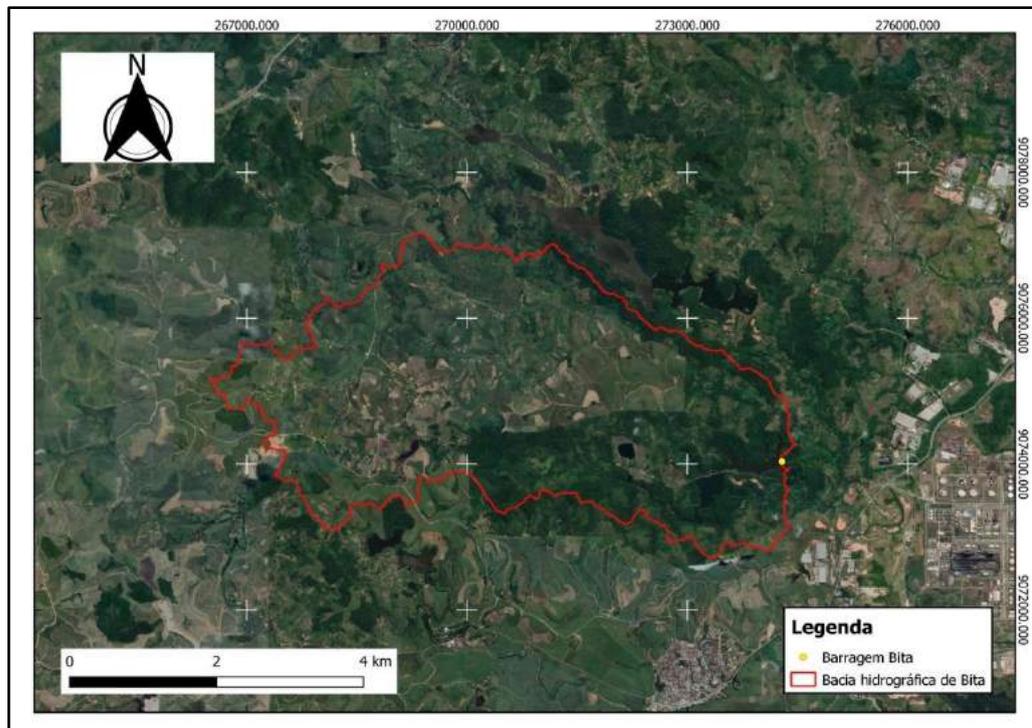
Para a elaboração dos estudos hidrológicos conforme o Plano de Segurança da Barragem Bitá, de acordo com a Lei 14.066 de 30 de setembro de 2020, utilizou-se a base cartográfica proveniente do PE3D disponibilizado pela Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC). De acordo com Cirilo et al. (2014), o objetivo do programa é fornecer uma base maior de apoio às ações de gestão territorial. Foram gerados modelos digitais de elevação (MDE), modelos digitais de terreno (MDT) e ortofotos na escala de 1:5000 além de ortofotos na escala 1:1.000 em 26 sedes municipais, complementando o trabalho da Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), que contratou mapeamento em escala semelhante para 15 municípios, incluindo Goiana e todos os municípios da Região Metropolitana.

Os serviços contratados pelo Pernambuco Tridimensional para estes municípios, considerou critérios como população, localização geográfica e a necessidade de base cartográfica para projetos de abastecimento de água e esgotamento sanitário. Todos os produtos estão referenciados no Sistema de Coordenadas Projetadas UTM SIRGAS 2000, fusos 24S ou 25S.

#### 3.2.3.1 Área de drenagem

A área de drenagem da Barragem Bitá, também referida como área de contribuição ou bacia hidrográfica, como demonstrado na Figura 13, abrange aproximadamente 19,8 quilômetros quadrados, com um perímetro de 31,9 quilômetros. Esses valores foram calculados com base em informações geoespaciais obtidas por meio do programa de geoprocessamento QGIS e da base cartográfica oriunda do Modelo Digital de Terreno em três dimensões (PE3D).

Figura 13 - Bacia Hidrográfica da barragem Bitá.



Fonte: Imagem extraída do Software Google Earth, 18/02/2024.

### 3.2.3.2 Coeficiente de Compacidade

A forma da bacia hidrográfica desempenha um papel significativo na maneira como ocorre o escoamento superficial. Para quantificar essa influência da forma no comportamento da bacia em resposta às chuvas, será utilizado coeficientes segundo Tucci (2001) que correlacionam características fisiografias específicas.

Um desses coeficientes é o Coeficiente de Compacidade ( $K_c$ ), que é um índice de forma. Ele estabelece uma relação entre o perímetro da bacia e a circunferência de um círculo com a mesma área. O  $K_c$  é adimensional e varia de acordo com a forma da bacia, não considerando seu tamanho. Quanto mais irregular for a bacia, maior será o valor do coeficiente de compacidade, indicando uma forma menos regular e mais complexa da bacia.

$$K_c = 0.208 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Onde:

$K_c$  – Coeficiente de Compacidade, adimensional

P – Perímetro da bacia hidrográfica

A – Área da bacia hidrográfica

O Coeficiente de Compacidade ( $K_c$ ) é um indicador que descreve a forma da bacia hidrográfica. Quanto mais próximo de 1 ( $K_c=1$ ) for esse coeficiente, mais a bacia se assemelha a um círculo, o que significa que ela tem uma capacidade maior de gerar grandes cheias. É possível relacionar os valores do  $K_c$  da seguinte maneira:

- $1,00 < K_c < 1,25$ : Nesse intervalo, a bacia apresenta uma alta propensão a grandes enchentes, indicando que sua forma é menos regular e mais complexa, o que facilita o acúmulo de água durante as chuvas.
- $1,25 < K_c < 1,50$ : Bacias com valores de  $K_c$  nessa faixa têm uma tendência mediana a grandes enchentes, o que significa que sua forma é relativamente regular, mas ainda pode gerar enchentes significativas.
- $K_c > 1,50$ : Quando o  $K_c$  ultrapassa 1,50, a bacia não é suscetível a grandes enchentes, pois sua forma é mais regular e facilita o escoamento adequado da água, reduzindo o risco de inundações.

No caso da bacia da Barragem Bitá, o Coeficiente de Compacidade ( $K_c$ ) encontrado é igual a **1,5**, o que indica que essa bacia tem uma tendência mediana a grandes enchentes.

### 3.2.3.3 Fator de forma

O Fator de Forma ( $K_f$ ) é uma medida que descreve a forma de uma bacia hidrográfica. Ele é calculado como a relação entre a largura média da bacia e o seu comprimento axial.

$$K_f = \frac{\underline{L}}{L}$$

Onde:

$K_f$  – Fator de forma, adimensional

$\underline{L}$  – Largura média da bacia hidrográfica

$L$  – Comprimento do talvegue principal da bacia hidrográfica

Os valores do Fator de Forma ( $K_f$ ) podem ser relacionados da seguinte maneira:

- Quando  $1,00 < K_f$ : A bacia apresenta uma alta propensão a grandes enchentes. Isso significa que a bacia é mais alongada e tem uma forma que favorece o acúmulo de água durante chuvas intensas.
- Quando  $0,75 < K_f < 0,50$ : A bacia tem uma tendência mediana a grandes enchentes.

Sua forma é relativamente regular, mas ainda pode gerar enchentes significativas.

- Quando  $K_f < 0,50$ : A bacia não está sujeita a grandes enchentes. Sua forma é mais compacta ou arredondada, o que facilita o escoamento adequado da água e reduz o risco de inundações.

No caso da bacia da Barragem Bitá, o Fator de Forma ( $K_f$ ) encontrado é igual a **0,28**, indicando que essa bacia não está sujeita a grandes enchentes devido à sua forma mais compacta e adequada para o escoamento de água.

#### 3.2.3.4 Índice de conformação

O Índice de Conformação ( $I_c$ ) é um indicador que resulta da comparação entre a área da bacia hidrográfica e a área de um quadrado cujo lado tem o mesmo comprimento axial da bacia. Esse índice serve para expressar a capacidade da bacia em gerar enchentes. Quanto mais próximo de 1 for o valor do  $I_c$ , maior é a propensão da bacia a enchentes, pois isso indica que a bacia se assemelha cada vez mais a um quadrado em sua forma, o que facilita o acúmulo de água durante eventos de chuva.

$$I_c = \frac{A}{L^2}$$

Onde:

$I_c$  – Fator de forma, adimensional;

A – Área da bacia hidrográfica;

L – Comprimento do talvegue principal da bacia hidrográfica.

Para a bacia da Barragem Bitá, foi calculado um Índice de Conformação ( $I_c$ ) igual a **0,17**. Esse valor indica que a bacia tem uma baixa propensão a enchentes, pois sua forma se afasta significativamente da configuração de um quadrado. Em outras palavras, a bacia possui uma geometria que favorece o escoamento adequado da água durante eventos de chuva, reduzindo o risco de inundações.

#### 3.2.3.5 Tempo de Concentração

O tempo de concentração de uma bacia hidrográfica é o período de tempo que se passa desde o início de uma chuva até que toda a água da chuva que se transforma em escoamento

superficial e provém de toda a área da bacia alcance o ponto de saída, ou seja, o exutório.

Para o presente estudo, foi empregada uma equação proposta pelo *United States Army Corps of Engineers* (USACE, 2014), que é adequada para bacias com áreas de até 12.000 km<sup>2</sup>.

$$T_c = 0,191 \frac{L^{0,76}}{I^{0,19}}$$

Onde:

T<sub>c</sub> – Tempo de concentração da bacia, em h;

L – Comprimento do talvegue, em km;

I – Declividade longitudinal, em m/m.

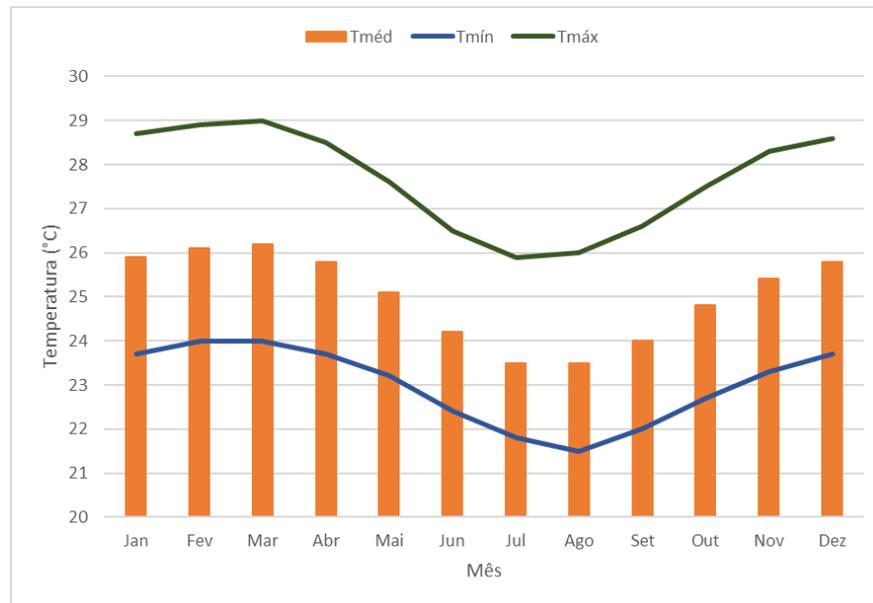
No caso do talvegue com extensão de 10,7 quilômetros e uma inclinação de 0,59%, o tempo de concentração da bacia hidrográfica da Barragem Bitá foi calculado em 3,1 horas. Isso significa que, a partir do início de uma precipitação, leva cerca de 3,1 horas para que a água da chuva, proveniente de toda a área da bacia, alcance o ponto de saída da mesma. Esse valor é um indicador importante para entender o comportamento do escoamento na bacia durante eventos de chuva.

### 3.2.4 Dados Hidrometeorológicos

#### 3.2.4.1 Temperatura

As temperaturas médias mensais, bem como as mínimas e máximas, foram coletadas a partir de informações climáticas globais fornecidas pelo programa *Climate Data*. Esses dados abrangem informações climáticas globais para diversas cidades. No contexto da representação da bacia hidrográfica em estudo, foram utilizadas as temperaturas registradas no município de Ipojuca, localizado em Pernambuco, conforme detalhado na Figura 14.

Figura 14 - Temperaturas normais para o município de Ipojuca -PE, em °C.

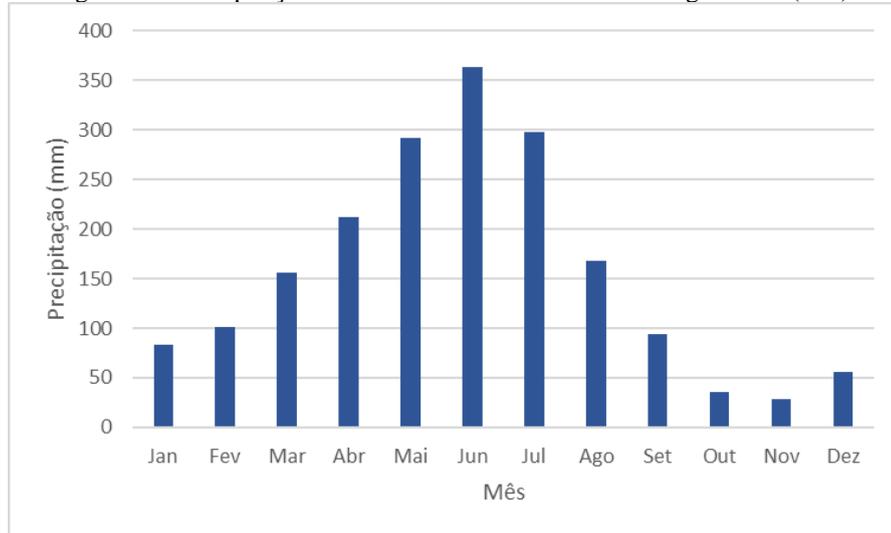


Fonte: Climate Data, 2023.

#### 3.2.4.2 Precipitação

A precipitação média na bacia foi determinada através da análise das isoietas de Precipitação Média Mensal, abrangendo o período de 1977 a 2006. Essas isoietas foram disponibilizadas pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) no Atlas Pluviométrico do Brasil (CPRM, 2011). Para adaptar esses dados à área de estudo da bacia hidrográfica, as linhas de isoietas foram interpoladas, o que possibilitou a quantificação dos valores médios mensais por meio do uso de ferramentas de geoprocessamento. A Figura 15 apresenta o gráfico com as precipitações médias encontradas.

Figura 15 - Precipitações médias mensais na bacia da barragem Bita (mm).

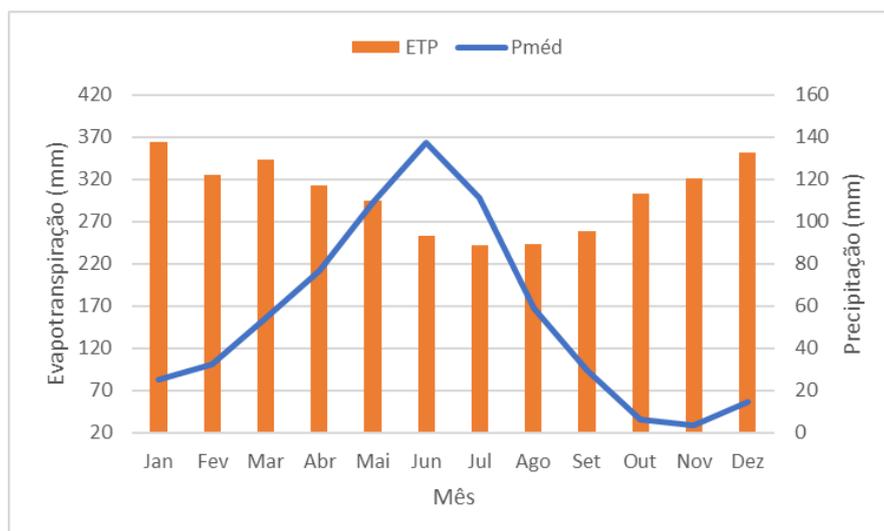


Fonte: Autor.

### 3.2.4.3 Evapotranspiração

A evapotranspiração média mensal para a região da bacia foi estimada utilizando o método de Thornthwaite e Matter (1955). Esse método revelou valores de evapotranspiração potencial mínima mensal de 88,5 mm durante o mês de julho, e um valor máximo de 137,9 mm em janeiro. A Figura 16 apresenta o gráfico com a evaporação referente a cada mês, bem como a precipitação correspondente para efeito comparativo.

Figura 16 - Evapotranspiração mensal para bacia da barragem de Bita (mm).



Fonte: Autor.

### 3.2.5 Curva Intensidade-Duração-Frequência

As estimativas das vazões máximas foram obtidas por meio das equações de intensidade-duração-frequência (IDF) aplicáveis às regiões geograficamente próximas à barragem. Os coeficientes foram obtidos por Ramos (2010) para o município de Recife/PE. A forma geral da curva IDF utilizada é a seguinte:

$$i = \frac{a Tr^b}{(t + c)^d}$$

Onde:

i – Intensidade de precipitação, em mm/h

Tr – Tempo de retorno ou recorrência, em anos

t – Duração do evento de precipitação, em min

a, b, c, d – Parâmetros adimensionais relativos à localidade

$$i = \frac{1423,97 Tr^{0,1124}}{(t + 21)^{0,7721}}$$

Onde:

i – Intensidade de precipitação, em mm/h

Tr – Tempo de retorno ou recorrência, em anos

t – Duração do evento de precipitação, em min

No Quadro 9 estão as intensidades para diferentes tempo de recorrência obtidas a partir da equação de intensidade de precipitação

Quadro 9 - Intensidades para diferentes tempos de recorrência e durações a partir da equação IDF Recife.

<b>Duração, (min)</b>	<b>60</b>	<b>120</b>	<b>240</b>	<b>480</b>	<b>720</b>	<b>1440</b>
<b>Tr, (anos)</b>	i, (mm/h)	i, (mm/h)	i, (mm/h)	i, (mm/h)	i, (mm/h)	i, (mm/h)
<b>10</b>	55,2	33,6	18,8	10,0	6,8	3,5
<b>50</b>	66,7	40,6	22,8	12,1	8,3	4,2
<b>100</b>	72,4	44,0	24,7	13,2	9,0	4,6
<b>1000</b>	95,0	57,8	32,4	17,3	11,8	6,0
<b>10000</b>	124,7	75,8	42,5	22,6	15,4	7,9

Fonte: Autor

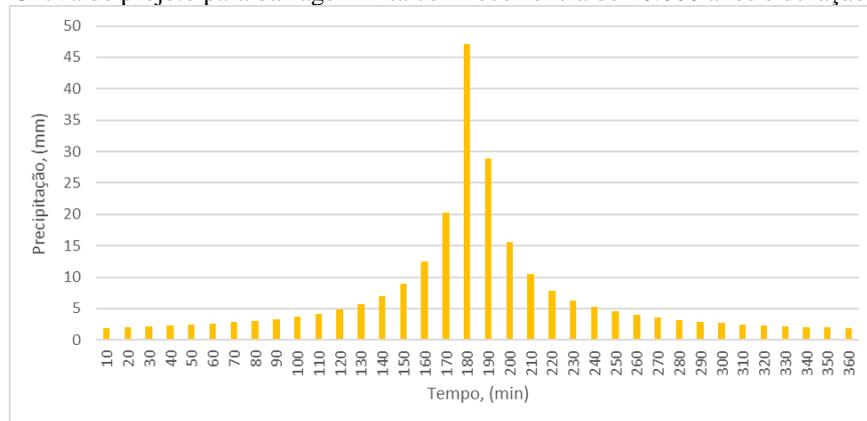
#### 3.2.5.1 Chuva de Projeto – Método dos Blocos Alternados

Conforme é prática comum no dimensionamento de vertedouros, seguindo as diretrizes do Manual de Drenagem Urbana do Plano Diretor da Prefeitura Municipal de Porto Alegre (PMPA, 2005), a chuva de projeto foi determinada usando o método dos Blocos Alternados.

Neste método, a duração da chuva de projeto é aproximadamente o dobro do tempo de concentração. No caso específico deste estudo, a chuva de projeto foi calculada para uma duração de 360 minutos e para três diferentes tempos de recorrência: 100, 1.000 e 10.000 anos.

Esses cálculos resultaram em precipitações acumuladas de 145,8 mm, 188,9 mm e 244,6 mm, respectivamente. A Figura 17 apresenta o hietograma correspondente ao evento de 10.000 anos.

Figura 17 - Chuva de projeto para barragem Bita com recorrência de 10.000 anos e duração de 360 min.

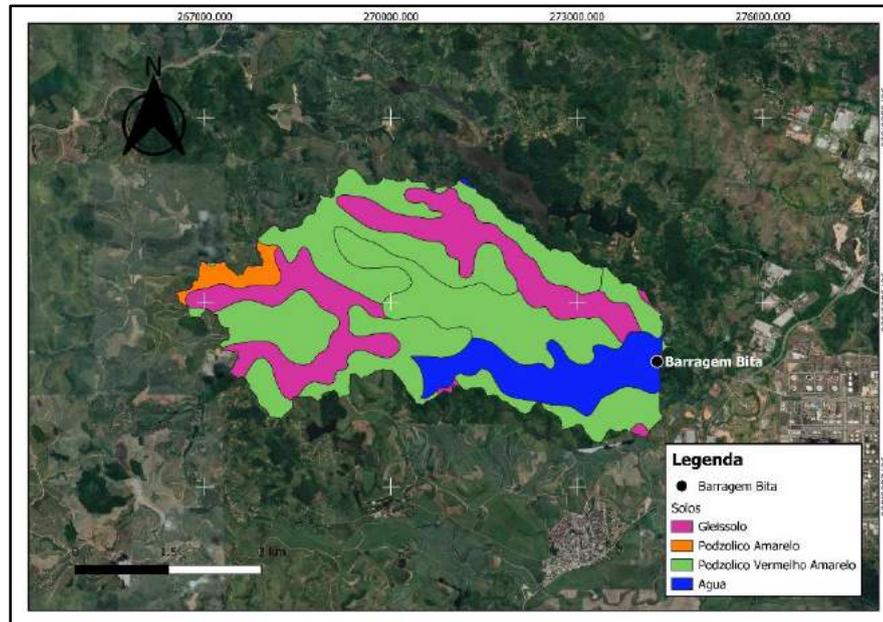


Fonte: Autor.

### 3.2.6 Classificação Hidrológica dos Solos

Para determinar o escoamento superficial relacionado à precipitação de 360 minutos, empregou-se o Método do *Soil Service Conservation* (SCS). Nesse contexto, a classificação hidrológica dos solos desempenha um papel crucial na obtenção do coeficiente *Curve Number* (CN). O CN é um parâmetro empírico cujo valor varia de 0 a 100, onde 0 representa total permeabilidade da água no solo, e 100 total impermeabilidade (Sartori et al., 2005). A identificação do tipo de solo baseou-se na classificação da Embrapa, em escala 1:100.000, abaixo é possível observar a Figura 18, com a os tipos de solo da bacia hidrográfica da barragem de Bita.

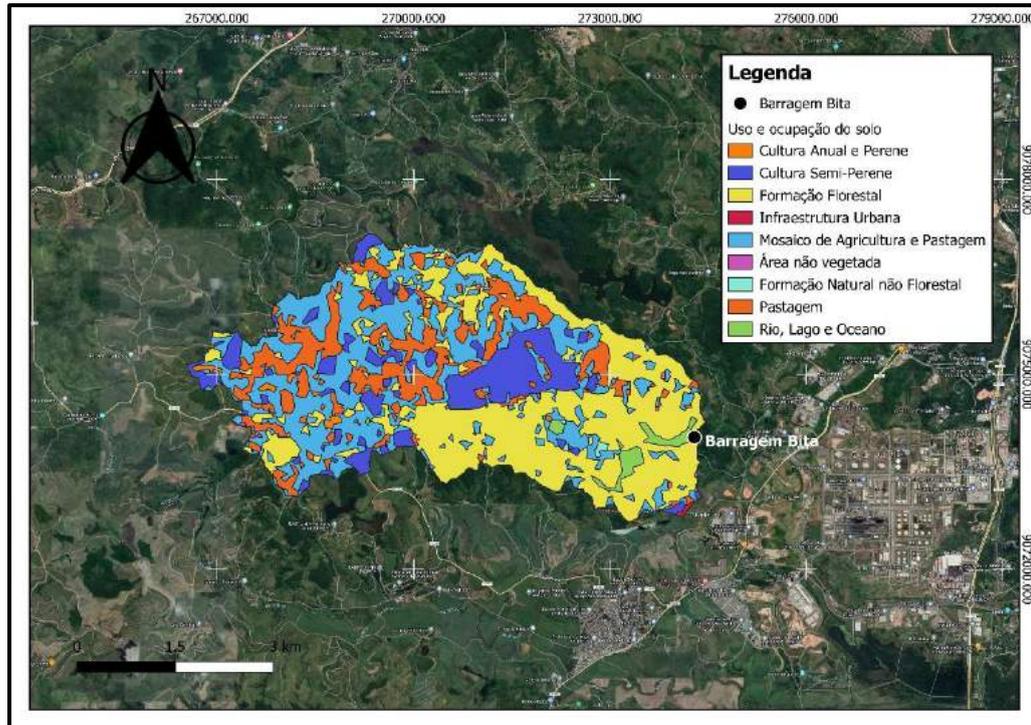
Figura 18 - Tipos de solo da bacia hidrográfica da barragem de Bitá.



Fonte: Autor

Para esse recorte da bacia com a classificação da Embrapa, adotou-se a Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o Método SCS, conforme proposto por Sartori et al. (2005). Conforme destacado D'asaro; Grillone (2012) os valores de CN foram tabelados pelo SCS e variam de acordo com o tipo de solo, classificado em quatro grupos (A, B, C ou D onde o grupo A representa solos com maior permeabilidade e menor escoamento superficial e a classe D o extremo oposto), condições de umidade do solo e uso e cobertura do solo. Na Figura 19 é possível observar o uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica da barragem Bitá.

Figura 19 - Uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica da barragem Bitá.



Fonte: Autor.

Com base nos dados de solo e uso e ocupação do solo, foi possível identificar os valores dos números CN (Curve Numbers) da curva de runoff, conforme apresentado no Quadro 10. A partir desses dados, foi realizado o cálculo do valor do CN da bacia hidrográfica de Bitá.

Quadro 10 - Valores dos números CN da curva de runoff para bacias rurais.

Uso do solo	Superfície do solo	Grupo do Solo			
		A	B	C	D
Solo lavrado	Com sulcos retilíneos	77	86	91	94
	Em fileiras retas	70	80	87	90
Plantações regulares	Em curvas de nível	67	77	83	87
	Terraceado em nível	64	76	84	88
	Em fileiras retas	64	76	84	88
Plantações de cereais	Em curvas de nível	62	74	82	85
	Terraceado em nível	60	71	79	82
	Em fileiras retas	62	75	83	87

Quadro 10 - Valores dos números CN da curva de runoff para bacias rurais (Conclusão)

Plantações de legumes ou cultivados	Em curvas de nível	60	72	81	84
	Terraceado em nível	57	70	78	89
	Pobres	68	79	86	89
	Normais	49	69	79	94
	Boas	39	61	74	80
Pastagens	Pobres, em curvas de nível	47	67	81	88
	Normais, em curvas de nível	25	59	75	83
	Boas, em curva de nível	6	35	70	79
Campos permanentes	Normais	30	58	71	78
	Esparsas, de baixa transpiração	45	66	77	83
	Normais	36	60	73	79
	Densas, de alta transpiração	25	55	70	77
Chácaras Estradas de terra	Normais	56	75	86	91
	Más	72	82	87	89
	De superfície dura	74	84	90	92
Florestas	Muito esparsas, baixa transpiração	56	75	86	91
	Esparsas	49	68	78	84
	Densas, alta transpiração	26	52	62	69
	Normais	36	60	70	76

Fonte: Tucci, (2001)

Esse método orienta a definição dos grupos hidrológicos com base no tipo de solo e é complementado por análises visuais, com o auxílio de imagens do Google Earth ou do Programa Pernambuco Tridimensional – PE3D (SDEC, 2016). No Quadro 11 está o resumo da classificação hidrológica dos solos da bacia e seus respectivos CN.

Quadro 11 - Classificação hidrológica dos solos da bacia da barragem Bitá

Área (km <sup>2</sup> )	Solo	Grupo	Cobertura	Curve Number
8.15	Podzólico Vermelho Amarelo	C	Pastagens Normais	75
5.83	Podzólico Vermelho Amarelo	C	Florestas Esparsas	78
4.78	Gleissolo	D	Pastagens Normais	83
0.54	Podzólico Amarelo	C	Pastagens Normais	75
0.52	Gleissolo	D	Florestas Esparsas	84

Fonte: Autor.

Após realizar a ponderação considerando a área da bacia, obteve-se um valor de CN igual a 78.

### 3.2.7 Hidrogramas de Projeto – Método SCS

Após a determinação do Coeficiente de *Curve Number* (CN), empregam-se as equações do método SCS para calcular a precipitação efetiva, como ilustrado a seguir:

$$Q = \frac{(P - Ia)^2}{(P - Ia + S)}$$

$$Ia = 0,2S$$

$$S = \frac{25\,400}{CN} - 254$$

Onde:

Q – *runoff* ou chuva excedente, em mm

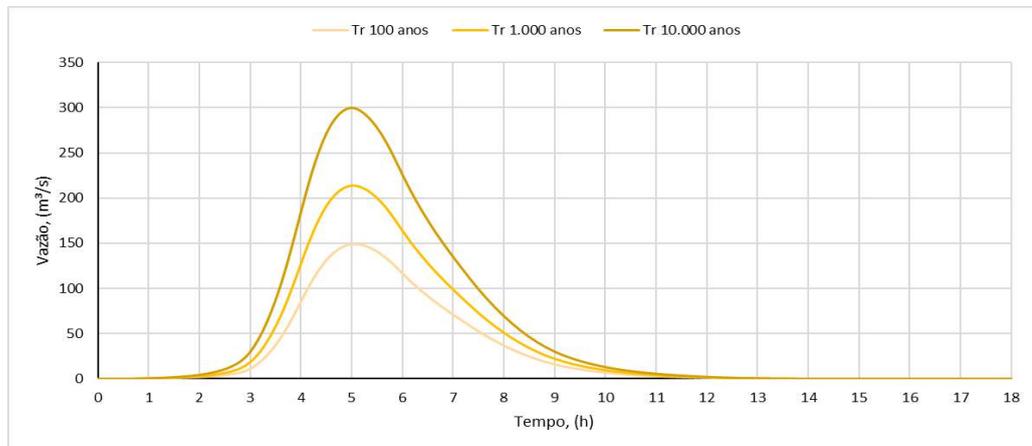
P – Precipitação, em mm

S – Capacidade de armazenamento do solo, em mm

Ia – Abstração inicial, em mm

Após calcular a precipitação efetiva, o próximo passo envolve a determinação do hidrograma unitário da bacia e, posteriormente, a soma dos hidrogramas para obter o hidrograma de projeto para os tempos de recorrência de 100, 1.000 e 10.000 anos. Esse processo foi realizado utilizando o programa HEC-HMS 4.3, desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Exército dos Estados Unidos. O HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) é uma ferramenta amplamente utilizada para modelagem hidrológica, destinada a simular os processos de chuva-deflúvio em bacias hidrográficas. Segundo Leitão et al. (2017), "o HEC-HMS é uma ferramenta robusta e eficaz para modelar o ciclo hidrológico em bacias hidrográficas, incluindo a entrada de precipitação, o escoamento superficial e a infiltração". A Figura 20 apresenta os resultados dos hidrogramas para cada tipo de recorrência.

Figura 20 - Hidrogramas de projeto para barragem Bita com tempos de recorrência de 100, 1.000 e 10.000 anos.



Fonte: Autor.

### 3.3 MODELAGEM DE RUPTURA

Este trabalho se concentrará na realização da análise e na geração de mapas de inundação, abordando aspectos relevantes até a elaboração dos Planos de Contingência correspondentes. Para tanto, uma das etapas cruciais será a delimitação das zonas de autossalvamento, zonas secundárias de salvamento e a identificação de possíveis rotas de fuga. Estas delimitações desempenham um papel fundamental na segurança da população em caso de emergência, permitindo uma evacuação eficaz e minimizando riscos.

Conforme o Boletim 111 do Comitê Internacional de Grandes Barragens (ICOLD, 1998), a análise de ruptura de barragem pode ser descrita em quatro passos, como ilustrado na Figura 21

Figura 21 - Etapas a serem seguidas para a análise de ruptura de barragem



Fonte: Adaptado ICOLD (1998)

Na análise de inundação por ruptura da Barragem de Bita, foi empregada a equação de Froehlich (1995), utilizando ferramentas numéricas disponibilizadas pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Exército dos Estados Unidos, por meio do programa Hec-Ras 6.4.1 (2021). O processo de definição da área inundada foi conduzido seguindo uma metodologia composta por cinco etapas essenciais:

- Definição dos cenários hidráulicos.

- Realização de análises, simplificações e ajustes na representação topográfica do leito do rio.
- Estabelecimento da malha de modelagem, parâmetros hidráulicos e condições de contorno.
- Verificação e otimização dos parâmetros para assegurar a convergência dos métodos numéricos.
- Mapeamento das áreas sujeitas à inundação.
- Este processo permitiu uma análise detalhada e precisa da possível extensão das áreas afetadas em caso de ruptura da barragem.

Para a Barragem de Bita, foram definidos três cenários hidráulicos distintos:

- Cenário mais provável - De acordo com os critérios estabelecidos em função da causa mais provável de ruptura, pode-se admitir uma ruptura por mecanismos estruturais ou por percolação (devido, por exemplo, à ocorrência de erosão interna da barragem) que origina o denominado cenário de ruptura em dia de sol (sem influência da precipitação) (ANA, 2016).
- Cenário extremo - No que diz respeito a este tipo de cenário extremo (que pressupõe a ocorrência de rupturas rápidas e totais), o propósito a seguir para a sua simulação deverá ser o de agravar não só os valores de todos os parâmetros da brecha, de forma a calcular a “pior” cheia induzida possível, mas também o de maximizar as afluências ao reservatório, fazendo com que esta registre os níveis mais elevados, por ocasião do início da hipotética ruptura (ANA, 2016).
- Operação hidráulica extrema - Um cenário típico de acidente é o cenário de operação extrema, que, no caso de uma barragem com vertedouro de cheias dotado de comportas, pode resultar da abertura rápida e simultânea de todas as comportas. No caso de uma barragem com vertedouro de cheias sem comportas, o cenário de operação hidráulica extrema a considerar pode corresponder ao evento da cheia de projeto (ANA, 2016).

Nos dois primeiros cenários, o formato do reservatório desempenha um papel significativo na formação do hidrograma resultante da brecha de ruptura. No terceiro cenário, a influência predominante provém do vertedouro, já que a formação da brecha de ruptura não é simulada, focando apenas na vazão efluente.

A fim de calcular a vazão gerada durante a formação da brecha de ruptura, utilizou-se o

programa Hec-Ras versão 6.4.1. Os parâmetros necessários incluíram o tempo de formação e as características geométricas da brecha, conforme especificado nas orientações fornecidas no manual da ANA (2016).

### 3.4 PREPARAÇÃO PARA OS DADOS DE ENTRADA

Para o desenvolvimento de Planos de Ação de Emergência (PAEs) para barragens, é essencial utilizar dados topográficos de alta qualidade, especialmente para estimar com precisão a área de inundação em caso de um acidente. Isso requer a realização de levantamentos topobatimétricos detalhados, garantindo que as previsões do modelo estejam alinhadas com a realidade (OLIVEIRA, 2018). Esses dados topográficos são cruciais para a tomada de decisões informadas e a elaboração de estratégias eficazes de resposta a emergências em situações de risco com barragens.

No entanto, a obtenção de dados topográficos altamente precisos por meio de levantamentos topobatimétricos pode ser um processo dispendioso. Para contornar essa questão de custo, neste estudo, foi empregado o Modelo Digital de Elevação (MDE) do PE3D. Este recurso, disponibilizado pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), oferece uma alternativa valiosa para a aquisição de informações topográficas detalhadas.

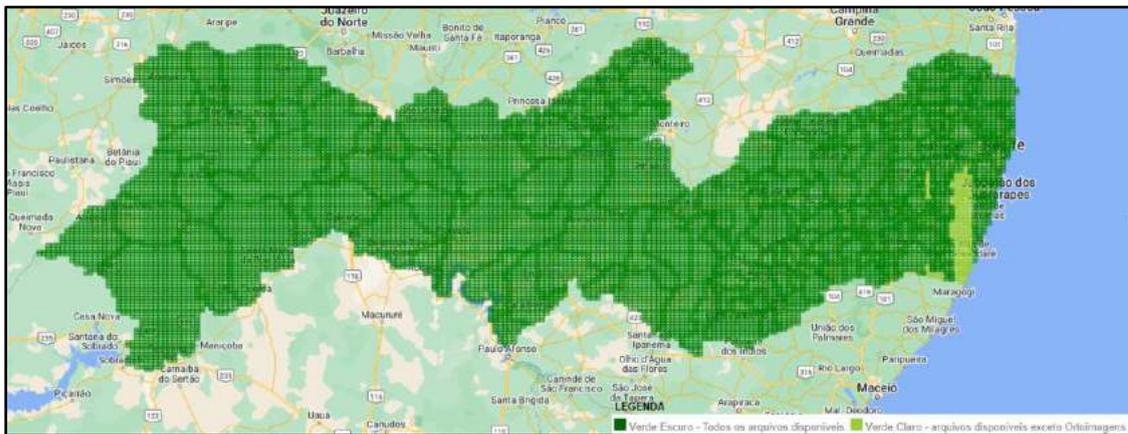
Para garantir a qualidade dos produtos do Pernambuco Tridimensional, são realizadas três etapas de validação: Análise de Completude, Análise de Consistência e Análise Estatística da Precisão Planialtimétrica. A precisão planimétrica das ortofotos e a precisão altimétrica do perfilamento a laser são avaliadas por meio de amostragem. Segundo Cirilo (2014) os produtos altimétricos do perfilamento laser são submetidos a duas condições de análise. Na primeira, são amostrados todos os pontos que retornam após a emissão do feixe de luz, formando o Modelo Digital de Elevação (MDE). Esses pontos representam diversos elementos da superfície, como edifícios, pontes, vegetação e corpos d'água. Após a aplicação de um algoritmo de classificação para filtrar os pontos correspondentes aos alvos da superfície, é fornecido o Modelo Digital de Terreno (MDT), que contém apenas as coordenadas dos pontos que representam efetivamente a superfície do terreno.

O MDE do PE3D apresentou um erro máximo altimétrico inferior a 25 cm e uma resolução de 1m, estabelecida para a escala 1:5.000 (Consórcio de Águas de Pernambuco, 2017).

O PE3D possui um vasto potencial de aplicação em projetos que demandam informações precisas sobre o terreno, tais como estradas, ferrovias, barragens, sistemas de irrigação, redes de água, esgotos, energia, mineração e uma variedade de empreendimentos

públicos e privados de grande porte. Esses dados são referenciados no Sistema de Coordenadas Projetadas UTM SIRGAS 2000, proporcionando uma base confiável para diversas análises e modelagens, incluindo a avaliação de riscos em barragens, como a que está sendo conduzida neste estudo. Na Figura 22 está apresentado os produtos disponíveis pelo programa Pernambuco Tridimensional em março de 2024.

Figura 22 - Distribuição de áreas com produtos disponíveis em março de 2024.



Fonte: Pernambuco tridimensional, 2024.

Nesse contexto, a preparação dos dados topográficos para serem utilizados como entrada no HEC-RAS foi realizada da seguinte maneira:

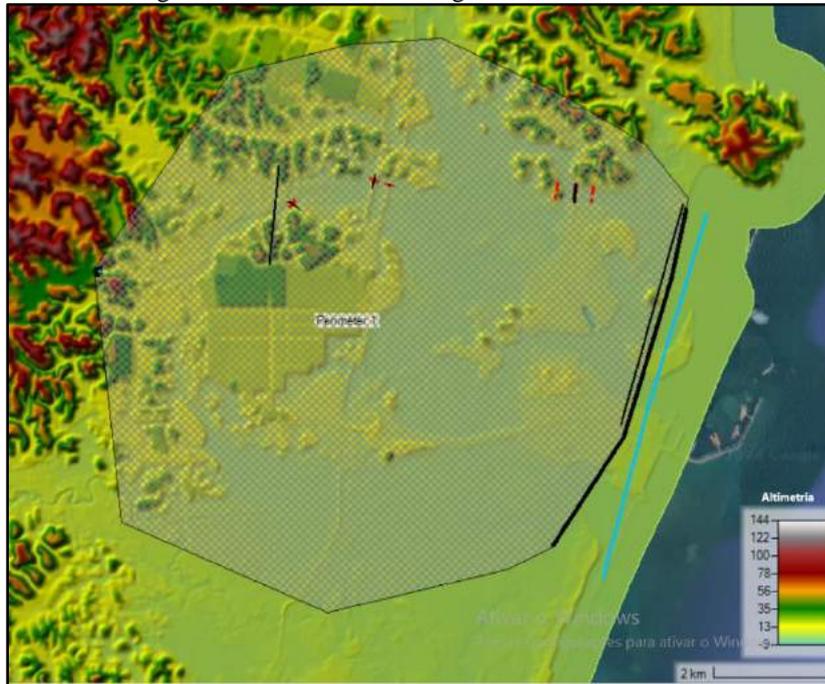
Inicialmente, utilizando o programa livre QGIS, procedeu-se ao recorte da área de interesse no Modelo Digital de Elevação (MDE), delimitando a região correspondente à bacia da barragem e áreas potencialmente afetadas em caso de ruptura.

Em seguida, o MDE foi importado para o programa HEC-RAS, e uma malha geométrica com células de 50 x 50 metros foi desenhada no modelo como é possível observar na Figura 23. A resolução da malha geométrica foi reduzida em comparação com o modelo PE3D, que possui uma resolução de 1 x 1 metro. Essa redução foi feita devido ao tempo de processamento significativamente longo do PE 3D, especialmente em computadores com capacidade limitada de processamento. A resolução mais alta exigiria um tempo de processamento ainda mais longo, tornando o modelo impraticável para o escopo e os recursos disponíveis para este estudo. Portanto, a redução da resolução foi necessária para garantir um tempo de processamento viável e eficiente para o modelo no software HEC-RAS.

O coeficiente de Manning, estabelecido em 0,035, foi utilizado para calcular as perdas de energia devido ao atrito no modelo. As condições de contorno adotadas compreenderam o aquecimento do modelo com uma vazão constante de 15 m<sup>3</sup>/s, a imposição do hidrograma de ruptura gradual linear para estimar a vazão máxima devido à ruptura da barragem, com base em

equações empíricas propostas por Froelich (1995), que consideram características da barragem, como altura do barramento, comprimento da crista, volume do reservatório, entre outros. Além disso, foi aplicado um sumidouro no final da malha, com uma declividade de 0,0063 m/m para a superfície da lâmina d'água.

Figura 23 - MDE com malha geométrica de 50x50 m.



Fonte: Autor

Posteriormente, foram inseridos no programa os dados característicos para cada tipo de cenário, os dados do cenário mais provável estão apresentados na Tabela 2:

- Cenário mais provável - Ruptura por *piping*

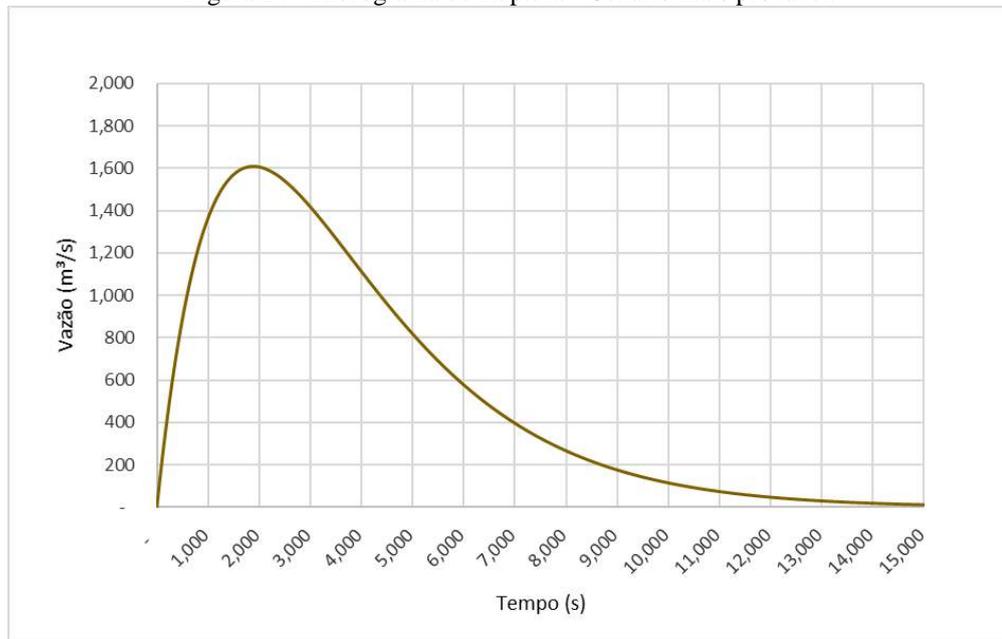
Tabela 2 - Dados característicos

BARRAGEM BITA – CENÁRIO MAIS PROVÁVEL	
<b>Material Construtivo</b>	Terra
<b>Comprimento (L)</b>	345 m
<b>Altura da barragem (H)</b>	16.7 m
<b>Altura de água (H<sub>w</sub>)</b>	16.7 m
<b>Largura da Brecha (B)</b>	50 m
<b>Tempo de Pico (t<sub>p</sub>)</b>	0,5245 h
<b>Vazão de Pico (Q<sub>p</sub>)</b>	1608,54 m <sup>3</sup> /s

Fonte: Autor

A Figura 24 apresenta o hidrograma de ruptura correspondente ao cenário mais provável:

Figura 24 - Hidrograma de Ruptura - Cenário mais provável.



Fonte: Autor

A Tabela 3 apresenta os dados característicos utilizados da simulação do cenário extremo.

- Cenário extremo - Ruptura por galgamento

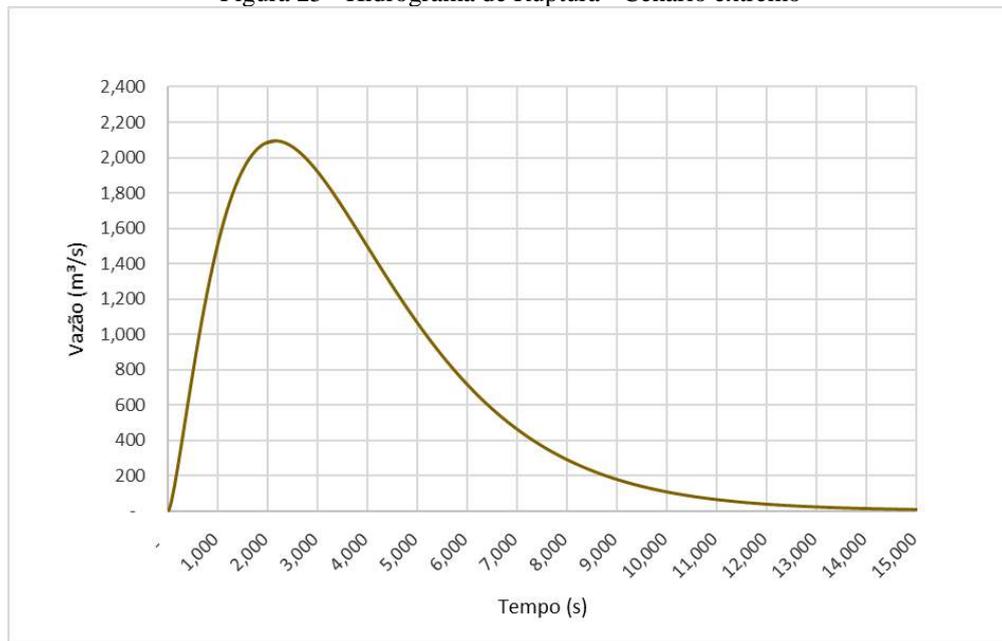
Tabela 3 - Dados característicos

BARRAGEM BITA – CENÁRIO EXTREMO	
<b>Material Construtivo</b>	Terra
<b>Comprimento (L)</b>	345 m
<b>Altura da barragem (H)</b>	19 m
<b>Altura de água (Hw)</b>	19 m
<b>Largura da Brecha (B)</b>	59 m
<b>Tempo de Pico (tP)</b>	0.5958h
<b>Vazão de Pico (Qp)</b>	2096,09 m³/s

Fonte: Autor

A Figura 25 abaixo apresenta o hidrograma de ruptura correspondente ao cenário extremo:

Figura 25 - Hidrograma de Ruptura - Cenário extremo

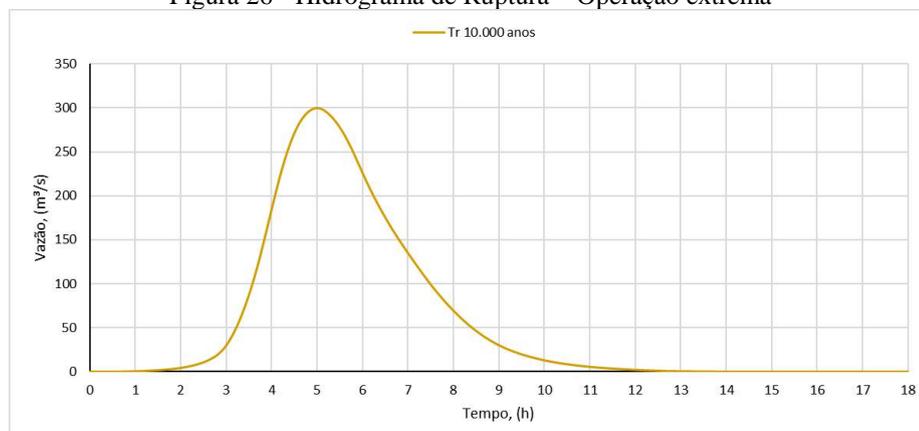


Fonte: Autor

- Operação extrema.

No Cenário de Operação Extrema, a barragem mantém sua integridade física, ou seja, não ocorre a ruptura da estrutura. No entanto, neste cenário, avaliam-se os impactos causados por descargas significativas dos órgãos extravasores devido a chuvas intensas. Para este estudo, utilizou-se o hidrograma de efluente da barragem com um período de retorno de 10.000 anos. Um dos principais resultados dessa simulação é o hidrograma gerado para esse cenário, o qual foi obtido a partir dos dados de efluente calculados no programa HEC-HMS como demonstrado na Figura 26.

Figura 26 - Hidrograma de Ruptura – Operação extrema



Fonte: Autor

### 3.5 GERAÇÃO DOS MAPAS DE INUNDAÇÃO

A partir dos resultados obtidos no HEC-RAS, foi possível criar mapas de inundação. Para uma visualização mais eficaz desses mapas, as áreas inundadas foram exportadas e posteriormente processadas no programa QGIS e no ArcGIS durante o período de teste gratuito de 21 dias do ArcGIS Pro. Nesse processo, as áreas de inundação foram divididas em pranchas, permitindo uma análise mais detalhada e a visualização clara das áreas afetadas em diferentes cenários. Essa abordagem proporcionou uma representação visual precisa das possíveis áreas inundadas em diferentes situações, contribuindo significativamente para a elaboração dos planos de contingência e gestão de riscos associados à barragem. Os critérios adotados por Viseu (2006), em Portugal, para graduação do risco em função da profundidade e da velocidade estão no Quadro 12.

Quadro 12 - Critérios para graduação do nível de perigo da inundação dinâmica.

Nível	Classe	Inundação Dinâmica (HxV)
Reduzido	<b>Verde</b>	$HxV < 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$
Médio	<b>Amarela</b>	$0,5 \text{ m}^2/\text{s} < HxV < 1,0 \text{ m}^2/\text{s}$
Importante	<b>Laranja</b>	$1,0 \text{ m}^2/\text{s} < HxV < 5,0 \text{ m}^2/\text{s}$
Muito importante	<b>Vermelha</b>	$HxV > 5,0 \text{ m}^2/\text{s}$

Fonte: Viseu, 2006.

Para uma representação mais eficaz nos mapas de inundação, as cores das faixas e a nomeação dos níveis de perigo utilizados neste trabalho estão indicadas no Quadro 13.

Quadro 13 - Critérios para graduação do nível de perigo da inundação dinâmica.

Nível de Perigo	Classe	Inundação Dinâmica (HxV)
Reduzido	<b>Azul</b>	$HxV < 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$
Alto para pessoas	<b>Verde</b>	$0,5 \text{ m}^2/\text{s} < HxV < 1,0 \text{ m}^2/\text{s}$
Alto para pessoas / Médio para edificações	<b>Amarelo</b>	$1,0 \text{ m}^2/\text{s} < HxV < 5,0 \text{ m}^2/\text{s}$
Alto para pessoas / Alto para edificações	<b>Vermelho</b>	$HxV > 5,0 \text{ m}^2/\text{s}$

Fonte: Adaptado de Viseu (2006).

### 3.6 ZONA DE AUTOSSALVAMENTO E ZONA DE SEGURANÇA SECUNDÁRIA

A Zona de Autossalvamento (ZAS) desempenha um papel crucial dentro do PAE. Esta área delimitada é essencial para garantir a segurança dos indivíduos em situações de emergência, oferecendo um local pré-determinado onde as pessoas podem se refugiar com maior probabilidade de sobrevivência. De acordo com Fema (2015) é importante mapear as áreas que podem ser inundadas identificando os locais em risco caso uma estrutura se rompa. Esses mapas são úteis para várias coisas, como planejamento, redução de danos, situações de emergência e entender as consequências.

A ZAS é a região do vale a jusante da barragem em que se considera que os avisos de alerta à população são da responsabilidade do empreendedor, por não haver tempo suficiente para uma intervenção das autoridades competentes em situações de emergência, deve-se adotar, no mínimo, a menor das seguintes distâncias para a sua delimitação: a distância que corresponda a um tempo de chegada da onda de inundação igual a trinta minutos ou 10 km." (ANA, 2017).

Nessa simulação, é considerado tanto o regime de escoamento uniforme quanto o transiente. Inicialmente, é induzido um escoamento até que todo o trecho esteja sob um fluxo uniforme. Em seguida, é simulado o rompimento da barragem, que representa o escoamento transiente, e é avaliada a propagação da inundação, levando em conta tanto o tempo quanto a distância percorrida pela onda de inundação

O empreendedor tem a responsabilidade de comunicar a Zona de Auto Salvamento (ZAS), que é a área imediatamente abaixo da barragem, de forma eficaz. Isso pode ser feito por meio de diferentes métodos, como sirenes, rádio, internet, telefonemas, megafones ou cartazes. É essencial que o método escolhido funcione mesmo em situações extremas de emergência, incluindo falta de energia elétrica, e que esteja localizado fora da área sujeita a inundação, mas próximo da área abaixo da barragem (ANPC; INAG, 2009).

A Zona de Salvamento Secundário (ZSS) é uma área localizada dentro da Área de Inundação que não é abrangida pela Zona de Autossalvamento (ZAS). Basicamente, implica que a ZSS está sujeita a ser afetada em caso de rompimento, porém, devido à sua distância em relação à barragem, oferece condições relativamente seguras para evacuação em caso de colapso (Governo de Minas Gerais, 2021).

#### Seções de controle

.Nos modelos unidimensionais, é muito comum que a topografia do rio seja representada através de seções transversais compostas, para incluir a representação das planícies inundáveis.(xxx,xx)

### 3.7 ROTA DE FUGA

De acordo com o artigo do *International Journal of Recent Technology and Engineering* (IJRTE, 2019) uma rota de fuga é essencial para guiar a população em risco de uma área perigosa para um local seguro. A identificação das rotas de evacuação é baseada em diversos fatores.

No caso de um rompimento de barragem, as rotas de evacuação são determinadas com base na área que será afetada pela barragem, levando em consideração o abrigo de evacuação disponível, o tempo estimado para a chegada da inundação, o curso provável da inundação, a profundidade e a velocidade da água.

Durante uma situação de emergência, como uma inundação causada pelo rompimento de uma barragem, o tempo de resposta é de extrema importância, pois pode influenciar diretamente na segurança e sobrevivência das pessoas envolvidas.

O tempo disponível para os agentes de defesa civil atuarem é escasso, o que ressalta a importância de estratégias eficientes de alerta à população em casos de emergência. Enquanto a implementação dos meios de alerta pode ser uma responsabilidade do Empreendedor, que pode optar pela automatização total do sistema de alerta, como sirenes ou o sistema de alerta pessoal por mensagens de texto, é fundamental reconhecer que a defesa civil desempenha um papel crucial na orientação, treinamento e sinalização das rotas de fuga em campo (ANA,2016). É tarefa da defesa civil garantir que essas sirenes sejam instaladas em locais estratégicos e que seu funcionamento seja adequadamente testado e mantido.

Os eventos de inundação representam uma ameaça em diversas regiões do mundo, e implementar um sistema de previsão e alerta em áreas suscetíveis a desastres pode auxiliar significativamente na redução dos danos e prejuízos (KOBİYAMA et al., 2006). Com o uso de modelos de simulação, como modelos hidráulicos computacionais, torna-se ainda mais fácil prever com precisão o comportamento da inundação. Esses modelos consideram uma variedade de variáveis e condições para simular o movimento da água, o que, por sua vez, facilita a identificação das rotas de evacuação mais seguras e eficazes.

### 3.8 SEÇÕES DE CONTROLE

Na modelagem unidimensional, é comum representar a topografia do rio por meio de seções transversais compostas, o que permite incluir as planícies inundáveis. As seções transversais são segmentos perpendiculares ao alinhamento do canal, essenciais para caracterizar tanto a capacidade de escoamento quanto as planícies de inundação (Chargel,

2018). Para garantir uma representação precisa da realidade, é fundamental que as seções transversais capturem a diversidade de geometrias presentes em um rio natural e que as distâncias entre elas sejam quantificadas de forma precisa.

Baseado nesse princípio, foram definidas quatro seções de controle que correspondem às pontes afetadas pela mancha de inundação. A escolha dessas pontes como locais de controle foi porque o escoamento pode ser significativamente afetado durante eventos de inundação. Além disso, as pontes servem como pontos de referência importantes para a comunidade local e para as autoridades responsáveis pela gestão de desastres, tornando-as escolhas estratégicas para monitoramento e avaliação durante eventos extremos.

#### **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

O resultado da análise de rompimento de barragem, expresso nos mapas de inundação disponíveis no Apêndice A, não se resume apenas ao desenho da mancha, mas também compreende outros parâmetros essenciais para embasar decisões críticas, como a evacuação de áreas afetadas e a avaliação do risco ambiental. Além disso, serão conduzidas análises comparativas entre três cenários distintos: o cenário 1, relacionado ao rompimento por *piping*; o cenário 2, associado ao galgamento; e o cenário de operação extrema.

Essas análises visam proporcionar uma compreensão abrangente dos impactos e riscos envolvidos, considerando variáveis como o risco hidrodinâmico (produto da profundidade da cheia pela sua velocidade -  $HxV$ ) e o tempo de chegada da onda, crucial para determinar o período disponível para alertas e a gestão eficaz da situação emergencial. A inclusão do cenário de operação extrema permite explorar cenários mais desafiadores, contribuindo para um entendimento abrangente dos possíveis desdobramentos e aprimorando as estratégias de resposta diante de situações críticas. Em síntese, a abordagem não se restringe à representação visual da área inundada, mas incorpora uma análise comparativa aprofundada entre diferentes cenários, fornecendo subsídios fundamentais para a tomada de decisões informadas em contextos adversos.

É importante ressaltar que algumas análises serão feitas exclusivamente para o cenário extremo, incluindo a elaboração da rota de fuga, a zona de autossalvamento, a zona secundária de salvamento e as seções de controle. Essas medidas são essenciais para a preparação e resposta eficaz diante de potenciais eventos críticos, permitindo uma gestão adequada dos riscos associados à barragem e a proteção das vidas e propriedades das comunidades afetadas.

#### 4.1 AÇÕES ESPERADAS

Como parte do conteúdo mínimo dos relatórios sobre inspeções de segurança regulares, as barragens devem ser classificadas em função de seu nível de perigo (ANA, 2011). A classificação do nível de resposta deve ser dividida em quatro níveis, conforme a descrição das características gerais de cada situação de emergência potencial da barragem. Ambas as classificações estão apresentadas no Quadro 14.

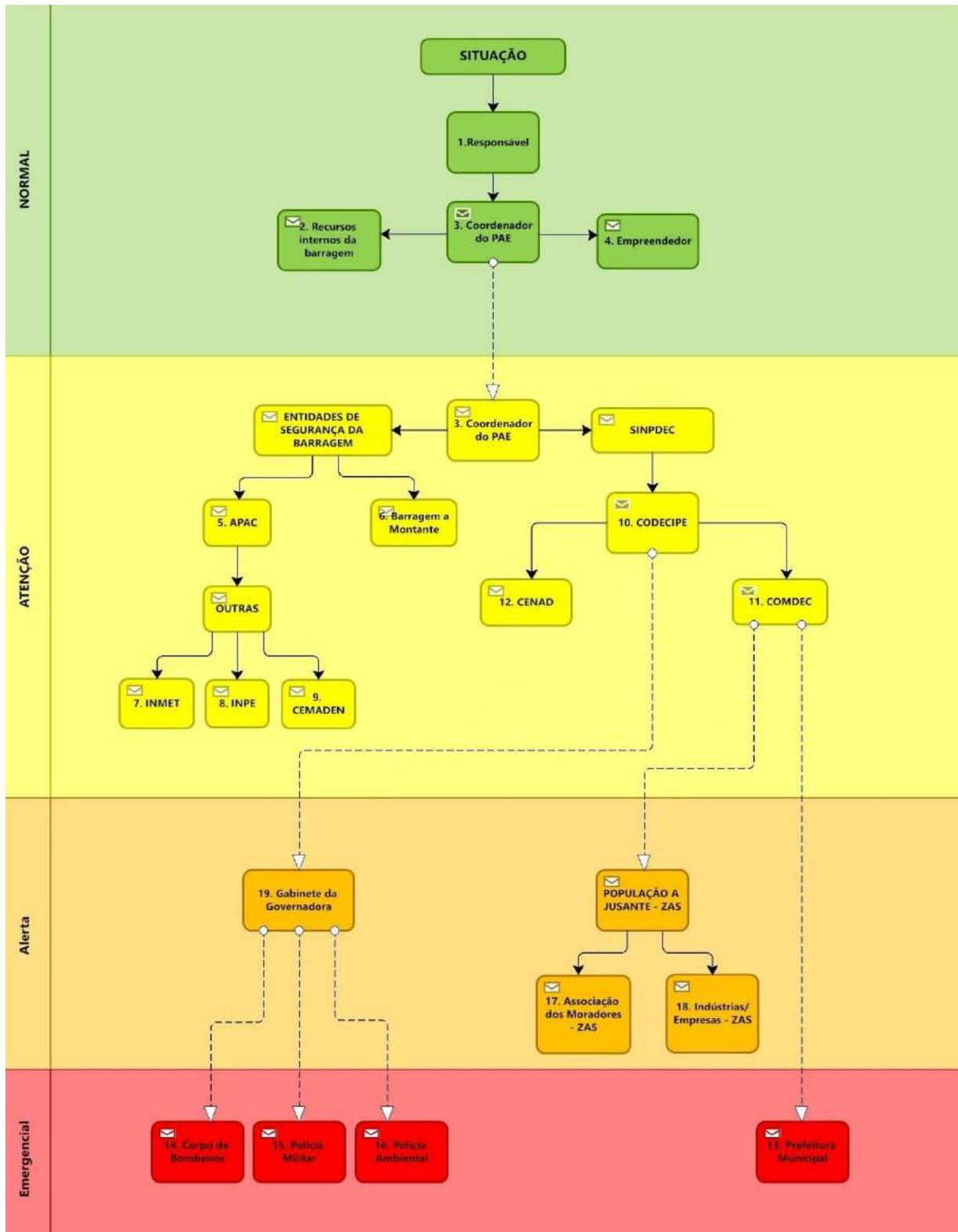
Quadro 14 - Classificação do nível de resposta

<b>NORMAL</b>	Quando as anomalias encontradas ou a ação de eventos externos a barragem não comprometa a segurança da barragem, mas devam ser controladas e monitoradas ao longo do tempo;
<b>ATENÇÃO</b>	Quando as anomalias encontradas ou a ação de eventos externos a barragem não comprometa a segurança da barragem no curto prazo, mas devam ser controladas, monitoradas ou reparadas;
<b>ALERTA</b>	Quando as anomalias encontradas ou a ação de eventos externos a barragem represente risco a segurança da barragem, no curto prazo, devendo ser tomadas providencias para a eliminação do problema;
<b>EMERGÊNCIA</b>	Quando as anomalias encontradas ou a ação de eventos externos a barragem represente risco de ruptura iminente, devendo ser tomadas medidas para prevenção e redução dos danos materiais e humanos decorrentes do colapso da Barragem.

Fonte: ANA, 2011.

A Figura 27 representa o processo de notificação para diferentes níveis de perigo encontrados na barragem. Quando o operador da barragem detectar qualquer anomalia, ele deve notificar imediatamente o seu superior para uma verificação. O superior verificará se a anomalia é de fácil reparo ou se requer apoio da equipe de manutenção da empresa.

Figura 27 - Fluxograma de notificações.



Fonte: Companhia Pernambucano de Saneamento (COMPESA)

Se houver uma ameaça de ruptura da barragem devido ao fenômeno de piping ou à ocorrência de chuvas intensas que possam resultar em galgamento, é crucial emitir o estado de **alerta**. Isso serve para notificar prontamente as autoridades competentes e a população local a

jusante da barragem, visando garantir a segurança e a pronta resposta diante da potencial emergência.

#### 4.2 CENÁRIO MAIS PROVÁVEL – RUPTURA POR PIPING

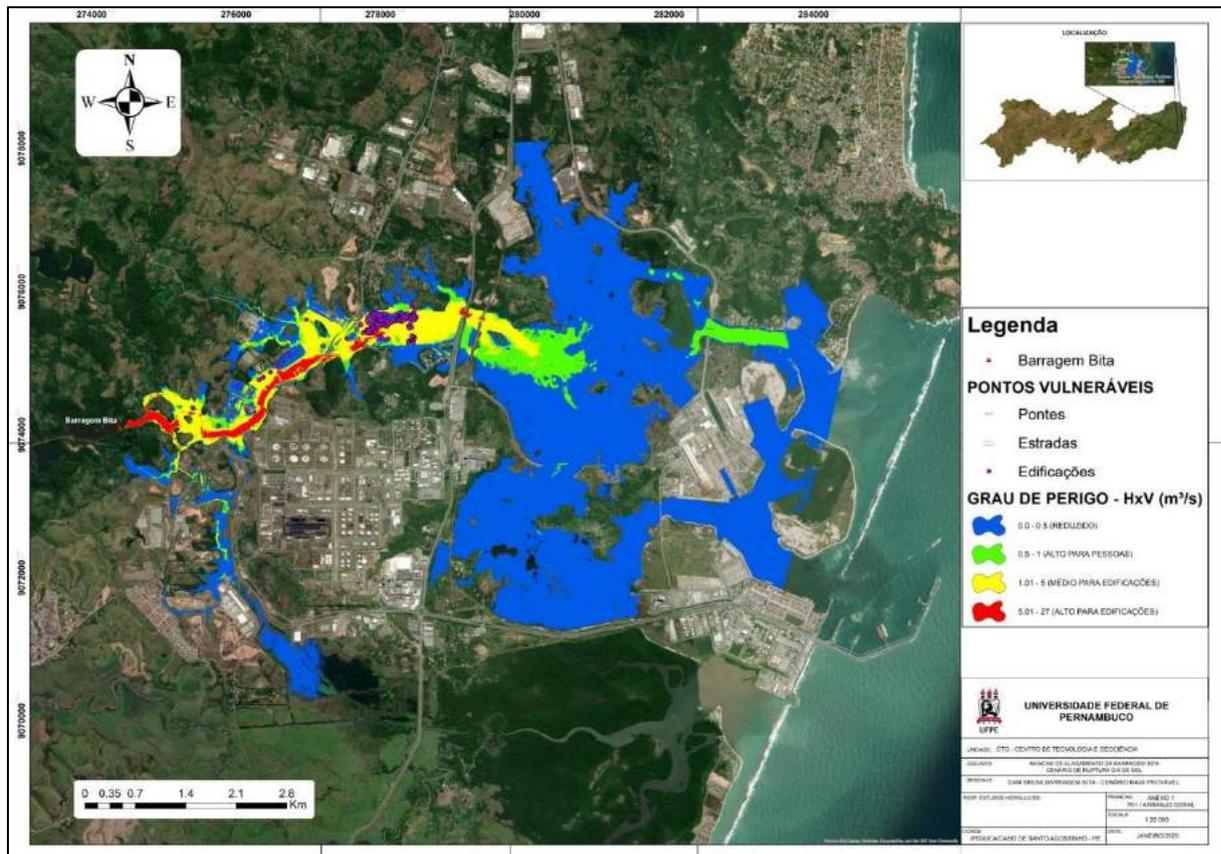
No Cenário 1, caracterizado pela ruptura por *piping*, a mancha de inundação exerce impacto expressivo em infraestruturas locais após 1 hora e 17 minutos da sua ruptura, abrangendo edificações, pontes e estradas. Este cenário evidencia a magnitude de uma possível ruptura.

A análise destaca que as regiões adjacentes à barragem apresentam o maior risco, evidenciado pela coloração vermelha que denota um grau elevado de perigo. À medida que se afasta da barragem, a coloração predominante passa a ser amarelo e verde. Mesmo em áreas com aproximadamente 3,5 km de distância, desprovidas de uma classificação vermelha, torna-se imperativo estabelecer rotas de fuga, dado que o amarelo e o verde ainda indicam perigo para a população.

Apesar da extensão atingir áreas sensíveis, como edificações, pontes e estradas, é notável na Figura 28 que o porto de SUAPE tenha sido poupado, pois a inundação circundou essa importante instalação, evitando danos diretos.

Detalhes específicos sobre os pontos vulneráveis podem ser consultados de forma mais abrangente no Apêndice A.

Figura 28 - Mancha de inundação do cenário mais provável



Fonte: Autor

#### 4.3 CENÁRIO EXTREMO – RUPTURA POR GALGAMENTO

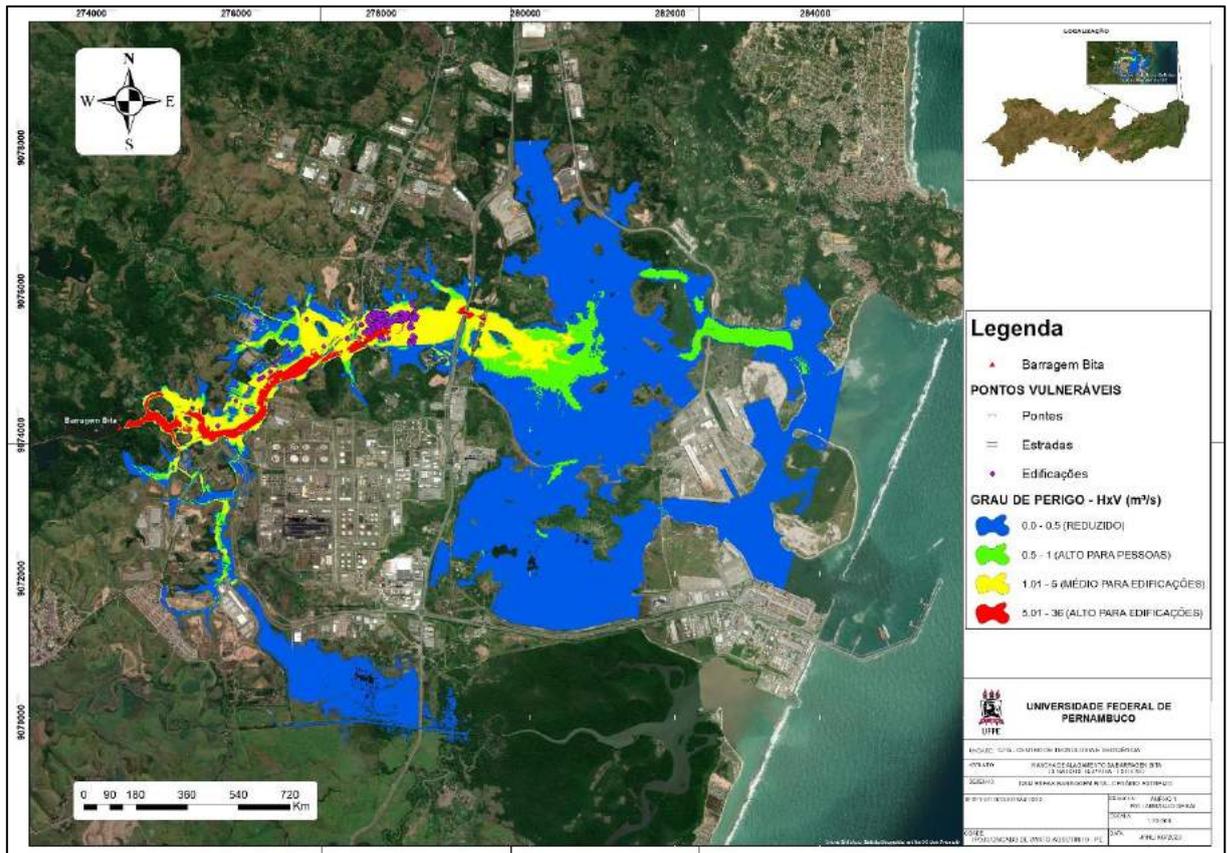
No Cenário 2, caracterizado pela ruptura por galgamento, a mancha de inundação exerce um impacto expressivo em infraestruturas locais após 1 hora e 34 minutos, abrangendo edificações, pontes e estradas, números semelhantes aos do Cenário 1.

A análise ressalta que as regiões próximas à barragem apresentam o maior risco, evidenciado pela coloração vermelha que indica um grau elevado de perigo. À medida que se afasta da barragem, a coloração predominante transita para amarelo e verde. Apesar das semelhanças com o Cenário 1, Figura 29 é possível observar diferenças notáveis no tamanho da mancha e no volume de água. Mesmo em áreas um pouco mais distantes, desprovidas de uma classificação vermelha, torna-se imperativo estabelecer rotas de fuga, uma vez que o amarelo e o verde ainda indicam perigo para a população.

Como no cenário 1, o cenário 2 também mostra que, apesar da extensão atingir áreas sensíveis, como edificações, pontes e estradas, é notável que o porto de SUAPE tenha sido poupado, pois a inundação circundou essa importante instalação, evitando danos diretos.

Detalhes específicos sobre os pontos vulneráveis e características distintivas entre os cenários podem ser consultados de forma mais abrangente no Apêndice A.

Figura 29 - Mancha de inundação do cenário extremo



Fonte: Autor

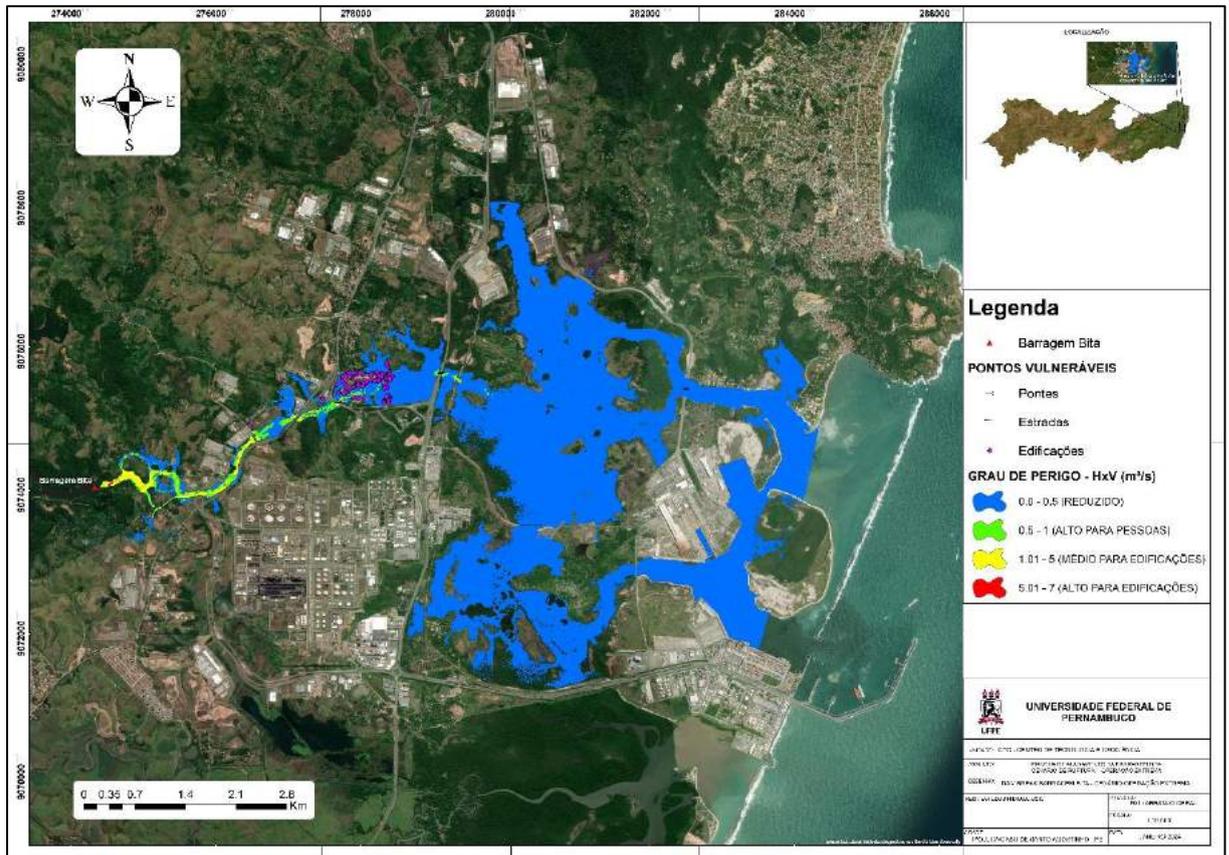
#### 4.4 CENÁRIO DE RUPTURA DURANTE A OPERAÇÃO HIDRÁULICA EXTREMA

No Cenário 3, caracterizado pela ruptura por operação hidráulica extrema, a mancha de inundação atingiu as infraestruturas locais após 1 hora e 8 minutos. Comparado aos cenários anteriores, a extensão da inundação é significativamente menor e as áreas afetadas também são reduzidas em relação aos eventos anteriores.

Assim como nos cenários 1 e 2, no cenário 3 apesar da extensão atingir áreas sensíveis, como edificações, pontes e estradas, é possível observar na Figura 30 que o porto de SUAPE também foi poupado, pois a inundação circundou essa importante instalação, evitando danos diretos.

Detalhes específicos sobre os pontos vulneráveis e características distintivas entre os cenários podem ser consultados de forma mais abrangente no Apêndice A.

Figura 30 - Mancha de inundação do cenário extremo

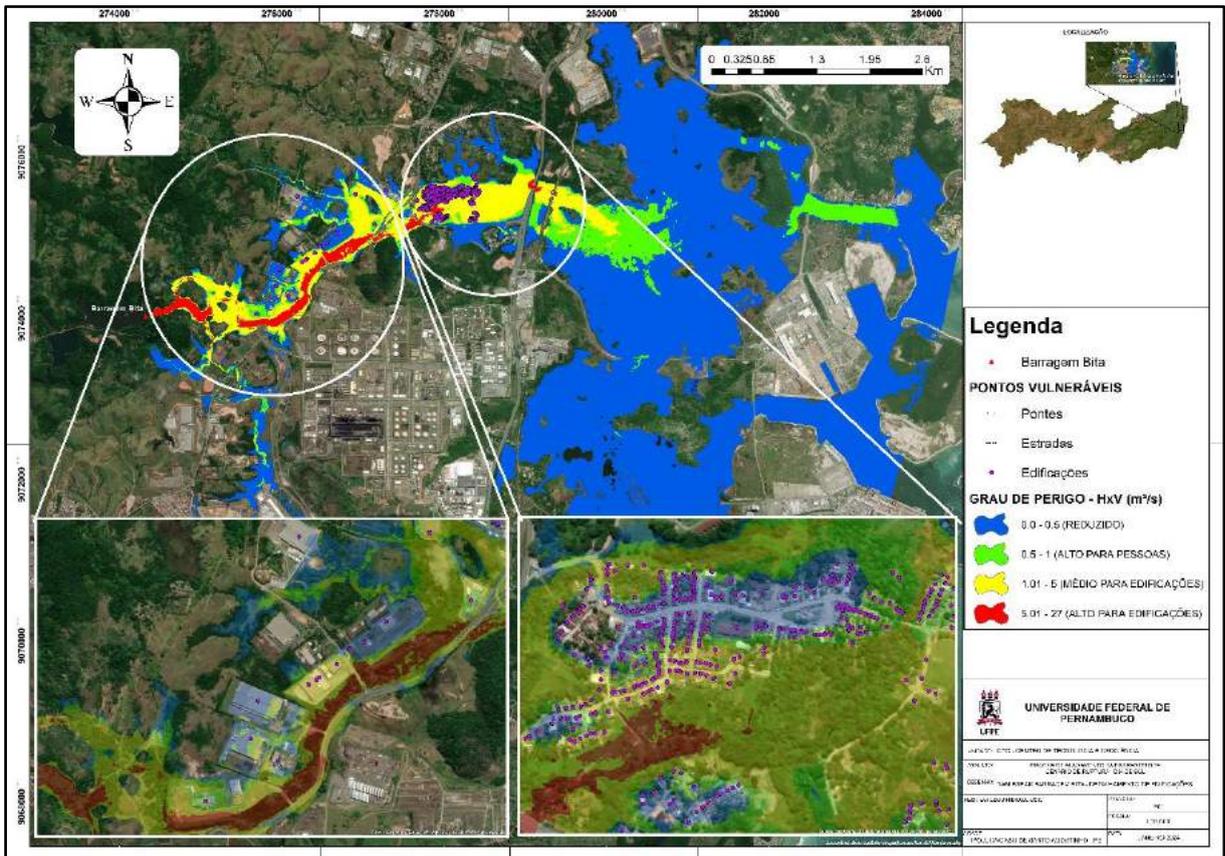


Fonte: Autor

#### 4.5 IDENTIFICAÇÃO DE PONTOS VULNERÁVEIS

Nesta seção, destacam-se os pontos vulneráveis fundamentais identificados nos três tipos de cenários analisados. Conforme evidenciado na Figura 31, constatou-se que um total de 358 edificações foram afetadas no cenário 1.

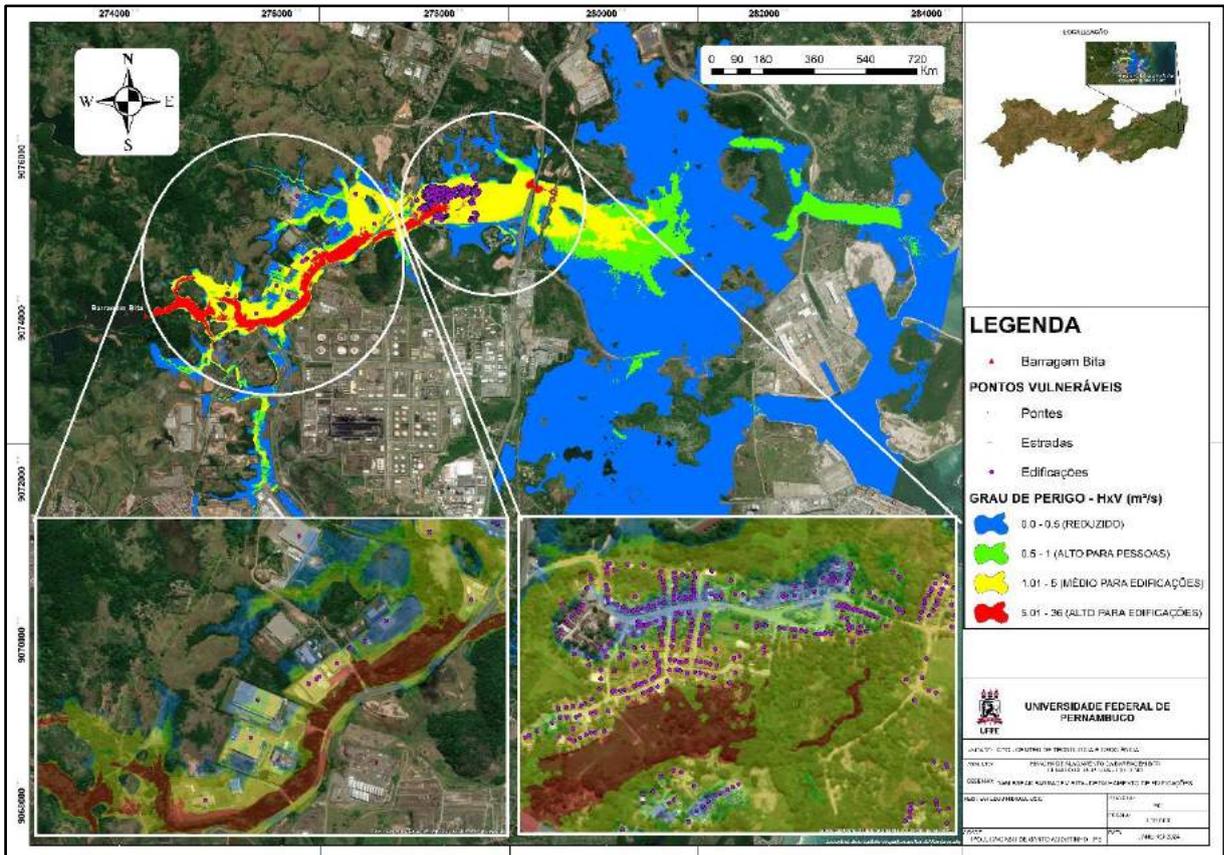
Figura 31 - Detalhamento dos pontos vulneráveis no cenário 1.



Fonte: Autor

No cenário 2, destaca-se uma situação análoga, com um número considerável e igual de construções afetadas em relação ao cenário 1, o que se justifica por ser uma simulação com dados de chuva intensa, conforme evidenciado na mesma Figura 32.

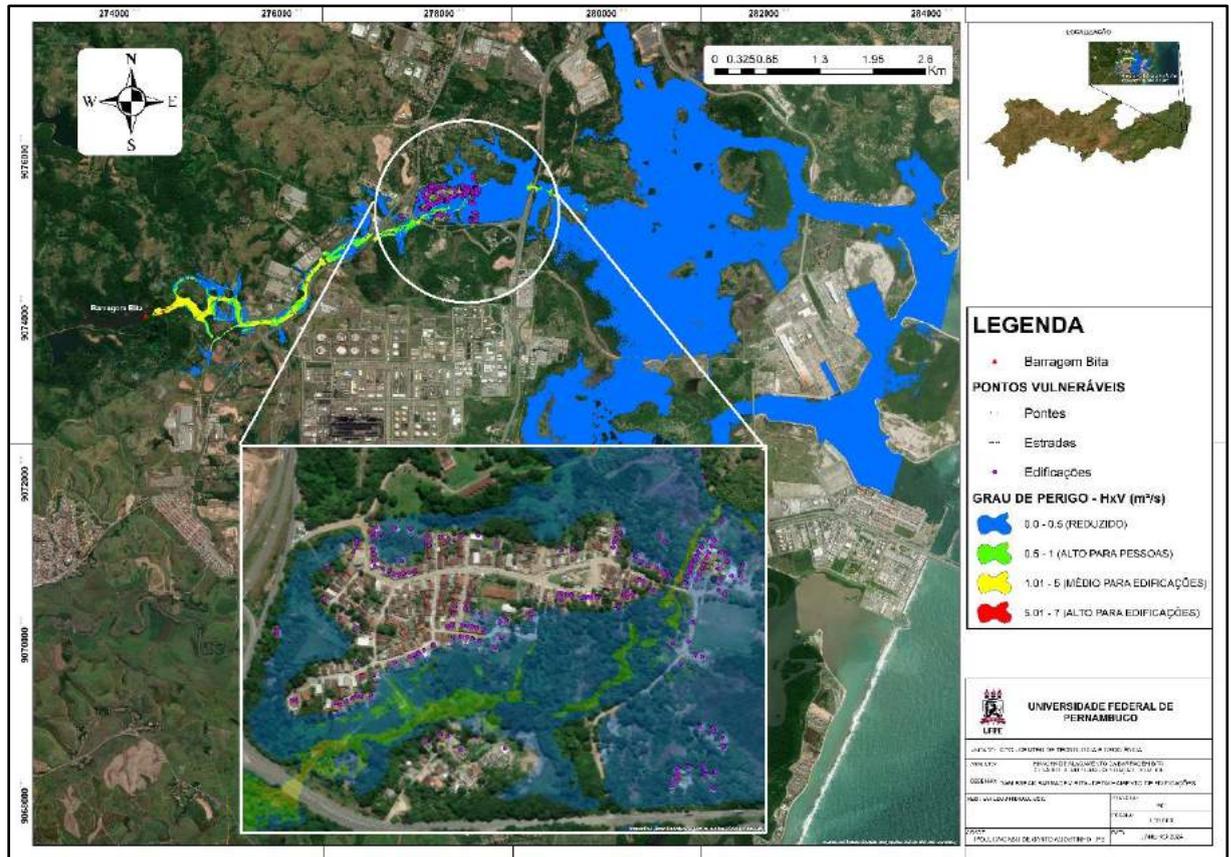
Figura 32 - Detalhamento dos pontos vulneráveis no cenário 2.



Fonte: Autor

Por fim, no cenário 3, que representa uma operação extrema, observou-se 248 edificações atingidas, conforme ilustrado na mesma Figura 33. Essa quantidade é significativamente menor em comparação com os números observados nos outros cenários.

Figura 33 - Detalhamento dos pontos vulneráveis no cenário 3.

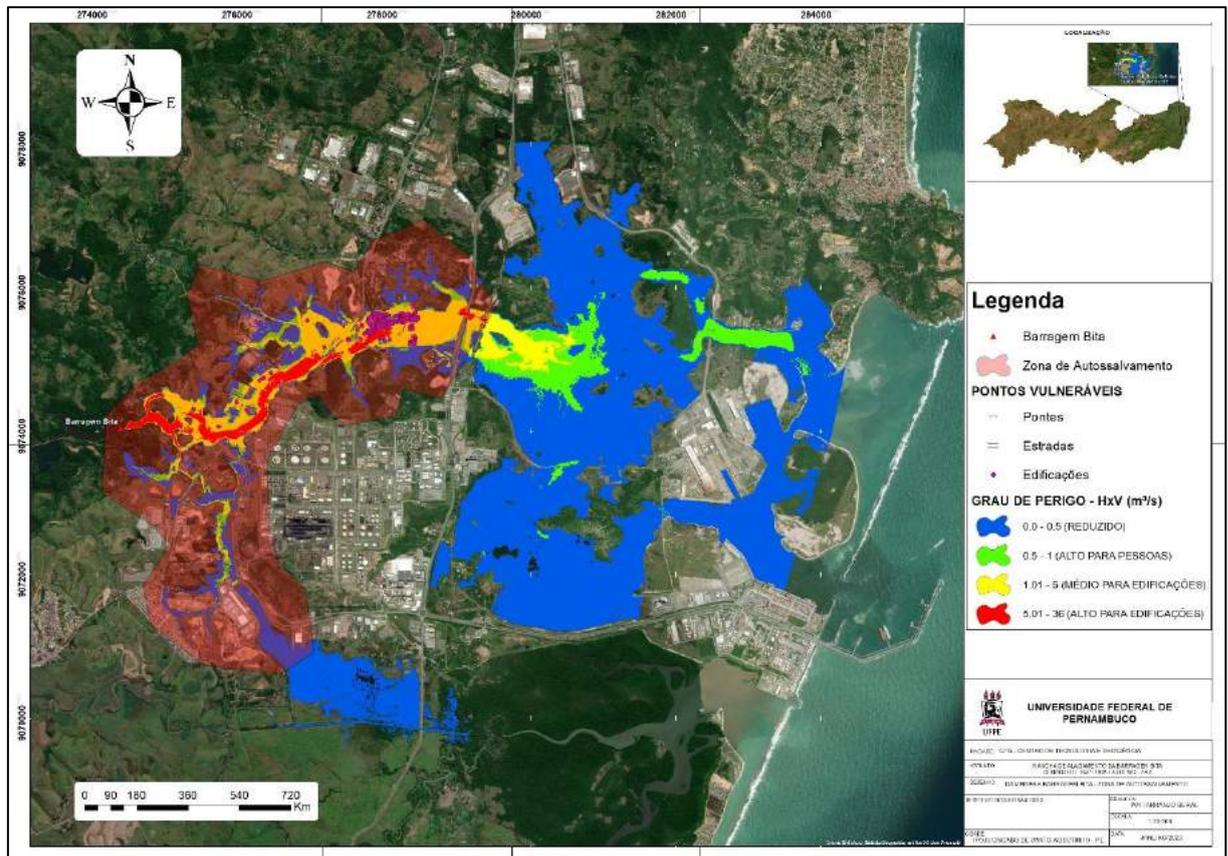


Fonte: Autor

#### 4.6 Delimitação da Zona de Autossalvamento

A região a jusante da barragem de BITA, designada como Zona de Autossalvamento – ZAS, abrange o trecho situado entre o barramento e a extensão alcançada pela onda de inundação em um intervalo de 30 minutos, conforme representado na Figura 34. Dentro da Zona de Autossalvamento, foram identificados 358 pontos vulneráveis, incluindo uma população aproximada de 1066,84 habitantes.

Figura 34 - Delimitação da Zona de Autossalvamento – ZAS.



Fonte: Autor

#### 4.7 Delimitação da Zona de Segurança Secundária

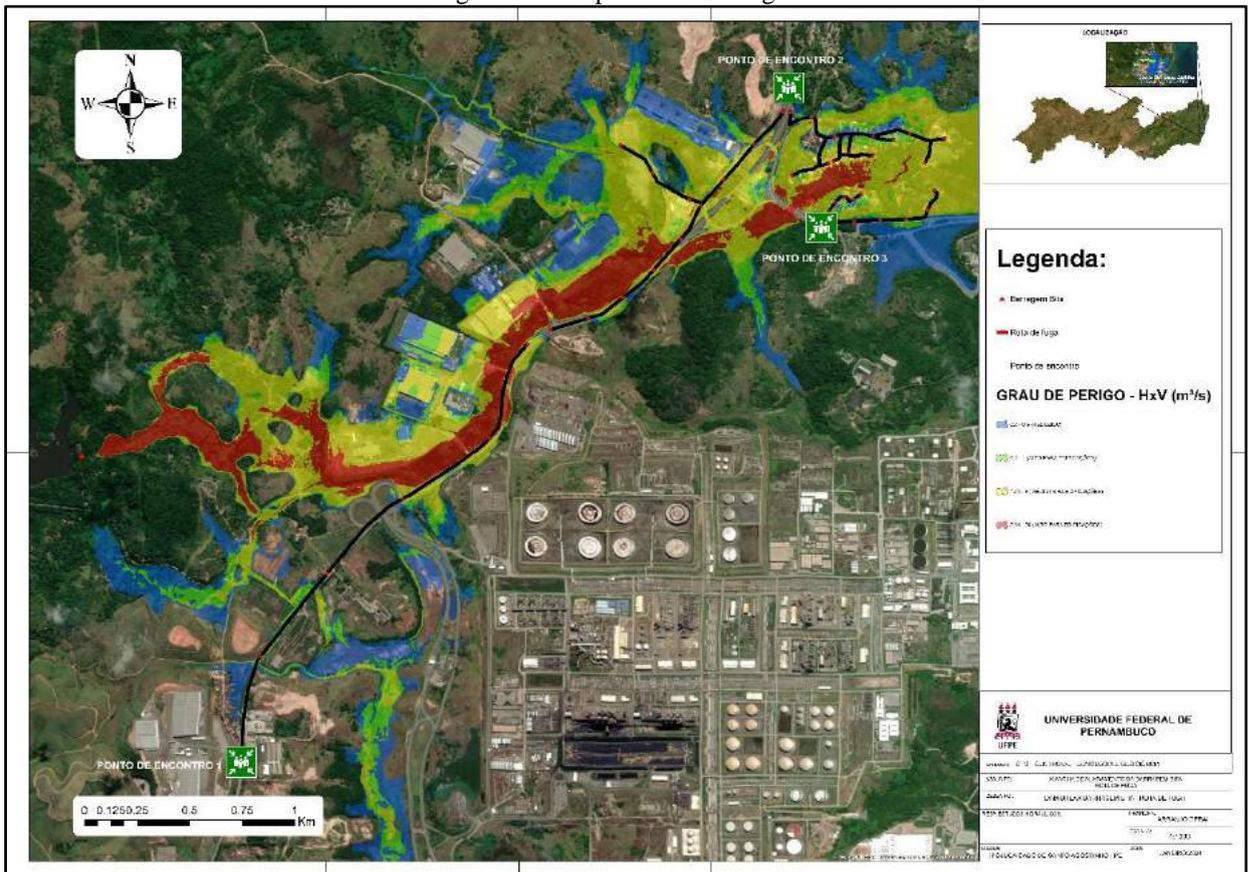
A Zona de Segurança Secundária (ZSS) refere-se à área afetada pela ruptura da barragem, situada além da Zona de Autossalvamento (ZAS) como demonstrado na Figura 35. Enquanto a ZAS está centrada na evacuação imediata da população, a ZSS abrange uma extensão mais ampla, incluindo locais suscetíveis a impactos secundários resultantes da inundação, erosão e deslocamento de sedimentos.



Priorizar o deslocamento a pé para os pontos de encontro, visando evitar obstruções viárias causadas por veículos.

A seguir, na Figura 36, é apresentado o mapa de rota de fuga, proporcionando uma visão geral das estratégias de evacuação em situações de emergência.

Figura 36 - Mapa de rota de fuga



Fonte: autor

Na rota de fuga feita a partir do mapa de inundação, foram estabelecidos 3 pontos de encontro estrategicamente posicionados para garantir a eficácia do plano de evacuação. É importante destacar que em cada trecho da Rota de Fuga deverá ser sinalizada por meio de placas dotadas de indicação da direção a seguir, até o Ponto de Encontro. O deslocamento deve ser realizado preferencialmente a pé, com exceção dos detentores de mobilidade reduzida e/ou com algum tipo de deficiência que possa comprometer sua auto evacuação. Quando a população alcançar os Pontos de Encontro, deverá permanecer no local até que possa ser resgatada pelas equipes de emergência. No apêndice A estão as pranchas do mapa de rota de fuga, com uma escala de 1:2000, oferecendo uma visualização clara da mancha de inundação

e das edificações comprometidas. Essa escala detalhada possibilita uma análise minuciosa das rotas de evacuação.

Na Tabela 4, é fornecido um resumo dos caminhos críticos, incluindo a estimativa da população esperada em cada ponto de encontro. É importante mencionar que essa estimativa foi calculada considerando a média de pessoas por residência, que foi obtida a partir da pesquisa do censo demográfico de 2022. De acordo com essa pesquisa, a média de pessoas por domicílio em Ipojuca foi de 2,98. Foi calculado um tempo de percurso levando em consideração que uma pessoa pode andar aproximadamente 5 km/h.

Tabela 4 - População esperada nos pontos de encontro.

<b>Ponto de encontro</b>	<b>Distância Crítica (m)</b>	<b>Tempo de percurso (min)</b>	<b>População esperada (un)</b>
1	1623.406	19,5	23,84
2	857.666	10,3	774,8
3	625.78	7,5	91,635

Fonte: Autor

#### 4.9 Resultados da simulação nas seções de controle

Para avaliar os resultados, foram definidas quatro seções de controle, correspondendo a pontes, conforme preconizado pelo Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens, Volume IV - Guia de Orientação e Formulários do Plano de Ação de Emergência (PAE). Os principais resultados da simulação hidrodinâmica nessas seções de controle estão detalhados na Tabela 5

Tabela 5 - Resultados da simulação hidrodinâmica nas seções de controle

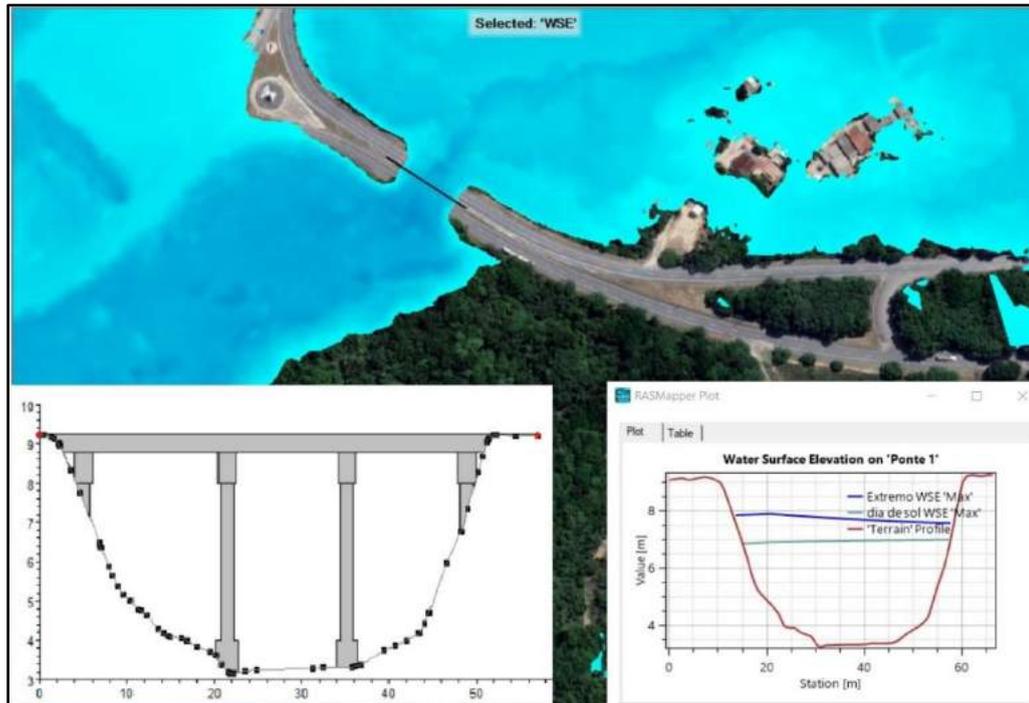
<b>Seção</b>	<b>Distância (km)</b>	<b>Tempo de Pico após DAMBREAK (h)</b>	<b>Cota Inundação (m)</b>	<b>H Máx (m)</b>
Ponte 1	4,10	01:40	7,84	4,59
Ponte 2	5,38	02:36	5,23	3,75
Ponte 3	5,53	02:47	3,18	2,86
Ponte 4	8,60	14:01	1,51	1,16

Fonte: Autor.

Existe uma variação significativa no tempo para atingir o pico de inundação, indo de 1 hora e 40 minutos na Ponte 1 para 14 horas e 1 minuto na Ponte 4. A cota de inundação diminui gradativamente com a distância do ponto de ruptura da barragem, evidenciada pela redução da altura máxima da água de 7,84 metros na Ponte 1 para 1,51 metros na Ponte 4. Esses dados destacam a dinâmica complexa da inundação, fornecendo informações importantes para a

formulação de estratégias de mitigação de riscos e resposta a emergências. Nas Figura 37, Figura 38, Figura 39 e Figura 40 estão apresentadas as imagens com o perfil do terreno e as cotas de inundação.

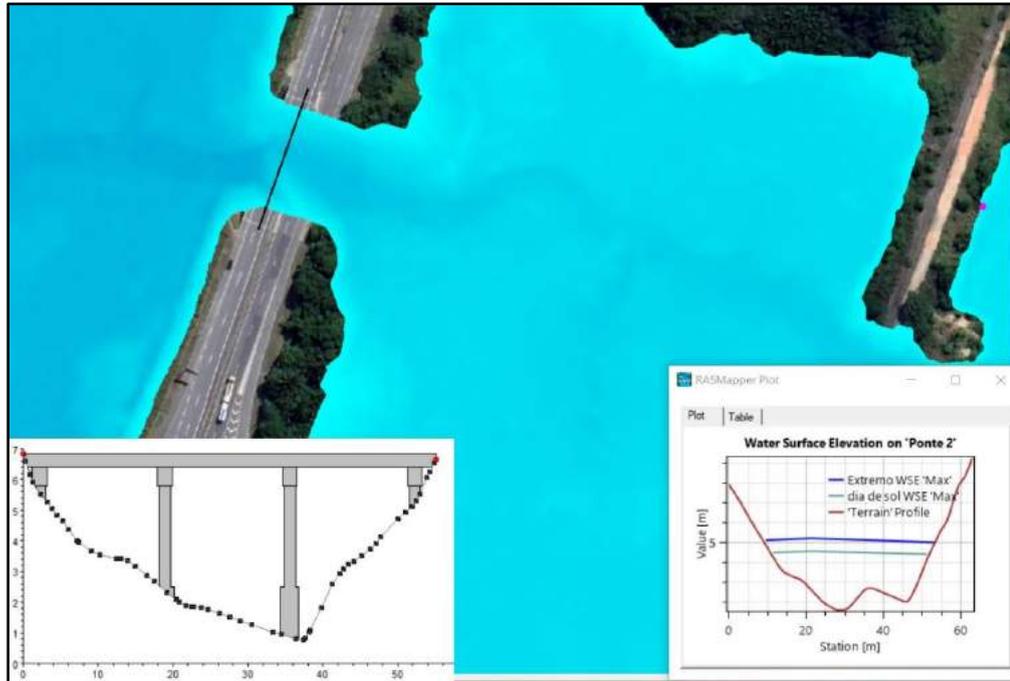
Figura 37 - Perfil do terreno e cota máxima de inundação na seção a aproximadamente 4,10 km da barragem BITA com as seguintes coordenadas:  $8^{\circ}21'39.72''S$  e  $35^{\circ}1'7.51''O$  – Elevações do Nível da água de 7,84 m e 6,93 m do ponto mais baixo do rio.



Fonte: Autor.

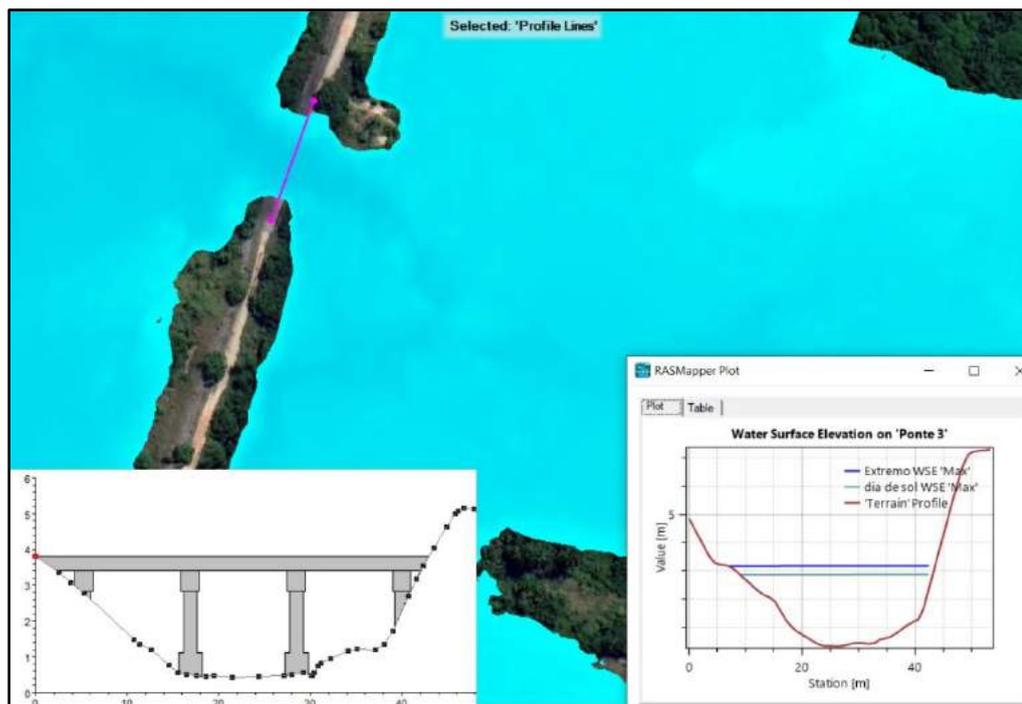
Figura 38 - Perfil do terreno e cota máxima de inundação na seção a aproximadamente 5,38 km da barragem BITA com as seguintes coordenadas:  $8^{\circ}21'26.71''S$  e  $35^{\circ}0'21.39''O$  – Elevações do Nível da água de 5,23 m e

4,54 m do ponto mais baixo do rio.



Fonte: Autor.

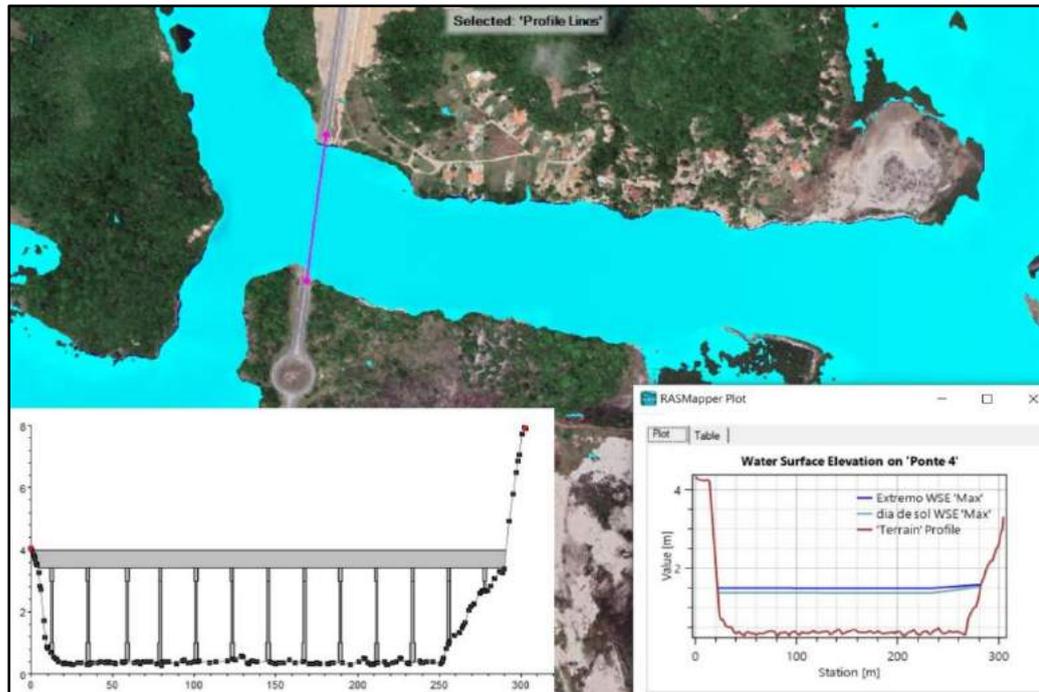
Figura 39 -Perfil do terreno e cota máxima de inundação na seção a aproximadamente 5,53 km da barragem BITA com as seguintes coordenadas:  $8^{\circ}21'29.47''S$  e  $35^{\circ}0'13.46''O$  – Elevações do Nível da água de 3,18 m e 2,87 m do ponto mais baixo do rio.



Fonte: Autor.

Figura 40 - Perfil do terreno e cota máxima de inundação na seção a aproximadamente 8,60 km da barragem BITA com as seguintes coordenadas:  $8^{\circ}21'34.05''S$  e  $34^{\circ}58'30.44''O$  – Elevações do Nível da água de 1,51 m e

1,37 m do ponto mais baixo do rio.



Fonte: Autor.

#### 4.10 Áreas de risco ambiental

A liberação descontrolada de grandes volumes de água pode resultar em inundações, alterando ecossistemas. Este evento aumenta o risco de erosão do solo e perda de biodiversidade, afetando a qualidade ambiental da região. A qualidade da água a jusante também é prejudicada, impactando a fauna e flora aquáticas, enquanto a rápida descarga de água pode alterar a topografia, comprometendo a estabilidade dos ecossistemas terrestres.

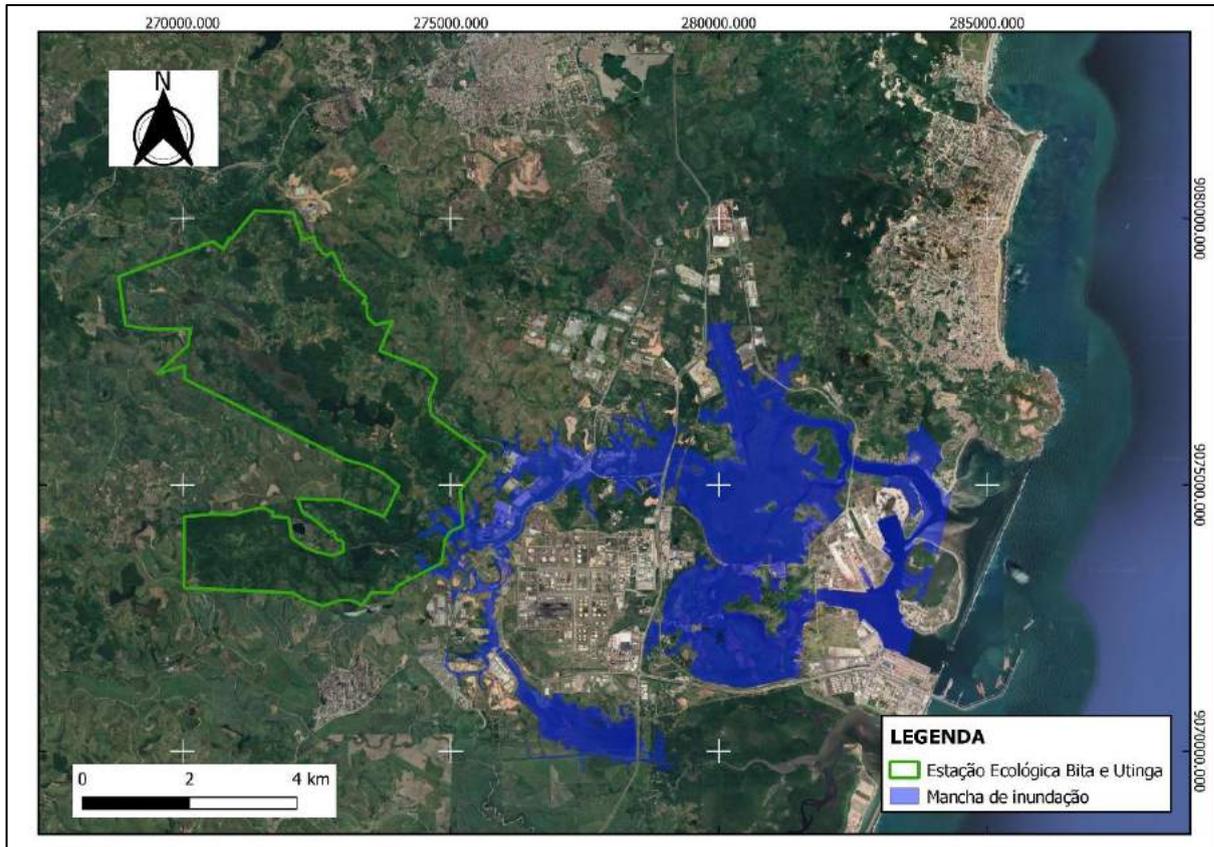
Essa situação ganha relevância ao considerarmos a proximidade da Barragem Bitá com a Unidade de Conservação Estação Ecológica Bitá e Utinga. Localizada nos municípios de Cabo de Santo Agostinho e Ipojuca, na porção noroeste do território do Complexo Industrial Governador Eraldo Gueiros (SUAPE), esta área de preservação, com 2.467,10 hectares, foi estabelecida em 2012, por meio do decreto nº 38.261/12. A Estação Ecológica abriga os vitais mananciais hídricos da região, os rios Bitá e Utinga, e é caracterizada pelo Bioma Mata Atlântica.

Considerando este contexto, torna-se evidente que a segurança da Barragem Bitá não é apenas uma preocupação para a infraestrutura local, mas também uma questão vital para a preservação de ecossistemas sensíveis e essenciais à região. Uma análise ambiental aprofundada se faz necessária para avaliar os impactos potenciais da ruptura da barragem nesses

locais de preservação, identificando medidas preventivas e estratégias de gestão de riscos para mitigar danos ambientais e proteger a biodiversidade local.

Através da simulação realizada, torna-se evidente na Figura 41 que a área da Estação Ecológica Bitá e Utinga seria impactada, mesmo que pouco, no caso de ruptura da Barragem Bitá.

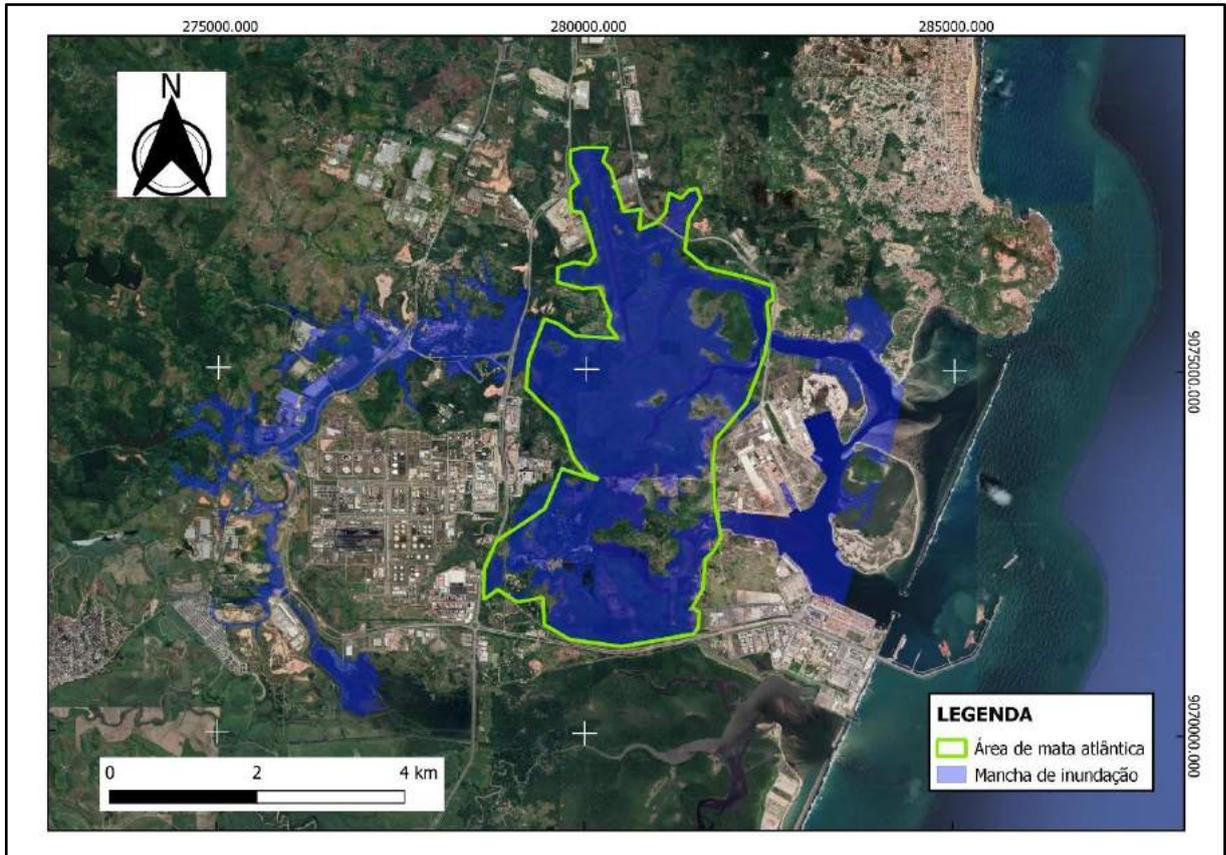
Figura 41 - Reserva ecológica e mancha de inundação



Fonte: autor

Embora parte do ecossistema afetado não esteja oficialmente designado como uma Unidade de Conservação, a presença de vegetação de Mata Atlântica é um componente crucial que não pode ser subestimado. A Mata Atlântica, por si só, é reconhecida pela sua riqueza em biodiversidade e pelo papel vital que desempenha na manutenção dos ciclos hidrológicos e na oferta de habitat para diversas espécies. Como é possível ver na Figura 42, ela também é afetada, sendo aproximadamente 14.524,68 km<sup>2</sup>, em caso de ruptura.

Figura 42 - Área de mata atlântica afetada



Fonte: autor

## 5 CONCLUSÃO

A análise dos dados sobre o rompimento da Barragem de Bitá em Pernambuco revela que os mapas de inundação não só oferecem uma visão das áreas afetadas, mas também fornecem informações cruciais para a tomada de decisões críticas, como evacuação e avaliação do risco ambiental. A comparação entre os três cenários distintos - rompimento por *piping*, rompimento por galgamento e cenário de operação extrema - oferece uma compreensão ampla dos impactos e riscos envolvidos, incluindo variáveis como risco hidrodinâmico e tempo de chegada da onda, fundamentais para determinar o período disponível para alertas e a gestão eficaz da situação emergencial.

É crucial destacar a importância da caracterização da bacia hidrográfica e da análise do regime pluviométrico para uma gestão eficaz dos recursos hídricos e prevenção de desastres. A compreensão das características da bacia, como sua topografia, uso da terra e padrões de precipitação, é fundamental para a estimativa precisa das vazões de projeto. Utilizando as curvas Intensidade, Duração e Frequência (IDF), foi possível obter informações valiosas sobre a distribuição das chuvas, permitindo uma avaliação mais precisa dos riscos de inundação e uma melhor preparação para eventos extremos.

Medidas como a delimitação da Zona de Autossalvamento, Zona de Segurança Secundária e definição de rotas de fuga são essenciais para a preparação e resposta eficaz diante de eventos críticos. Estratégias de evacuação baseadas em critérios temporais e distribuição equitativa da população contribuem para minimizar danos e proteger vidas.

A análise dos pontos vulneráveis e identificação das áreas de risco ambiental, com atenção especial para áreas sensíveis como a Estação Ecológica Bitá e Utinga, são cruciais para compreender o impacto potencial da ruptura da barragem.

Em resumo, essa abordagem não se limita à visualização da área inundada, mas incorpora uma análise comparativa profunda entre diferentes cenários, fornecendo subsídios fundamentais para a tomada de decisões informadas e gestão eficaz de situações de emergência.

Além disso, é importante destacar que as manchas de inundação gerados pelo programa HEC-RAS, a partir da topografia extraída do Modelo Digital de Elevação (MDE) pelo PE3D, desempenham um papel crucial. Esses mapas fornecem uma ideia inicial das áreas inundadas, auxiliando no desenvolvimento de modelagens posteriores exigidas para a elaboração dos Planos de Ação de Emergência das barragens, conforme estabelecido pela Lei nº 14.066/2020.

No entanto, é fundamental reconhecer que, apesar da utilidade dessas simulações preliminares, a obtenção de dados mais precisos através de levantamentos de campo e

monitoramento contínuo é essencial para a precisão das análises. A coleta de dados mais detalhados, como perfis de vazão, características do solo e condições hidrológicas locais, pode aprimorar significativamente a eficácia das simulações e, conseqüentemente, das estratégias de gestão de riscos associadas às barragens.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA. Agência Nacional de Águas. FPTI – Fundação Parque Tecnológico de Itaipu – Brasil. Curso Segurança de Barragem. Módulo III: gestão e desempenho de barragens unidade 2: planos de ações de emergência. Disponível em: [https://capacitacao.ead.unesp.br/dspace/bitstream/ana/110/28/Unidade\\_2-modulo3.pdf](https://capacitacao.ead.unesp.br/dspace/bitstream/ana/110/28/Unidade_2-modulo3.pdf)

ANA. Agência Nacional de Águas. Relatório de segurança de barragens 2021. Brasília, DF: ANA, 2021. 4 p. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem>. Acesso em: 9 set. 2023.

Agência Nacional de Águas (ANA), Ministério do Meio Ambiente, Brasil, Resolução No. 742, 17 de outubro de 2011.

ANA. Agência Nacional de Águas. 2016. Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens. Brasília-DF. Acesso em 27 set 2023. Disponível em: [https://www.snisb.gov.br/Entenda\\_Mais/publicacoes/ManualEmpreendedor](https://www.snisb.gov.br/Entenda_Mais/publicacoes/ManualEmpreendedor)

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. 2016. Guia de orientação e formulários do Plano de Ação de Emergência –PAE: Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens. Brasília. [https://www.snisb.gov.br/Entenda\\_Mais/publicacoes/ManualEmpreendedor](https://www.snisb.gov.br/Entenda_Mais/publicacoes/ManualEmpreendedor)

ANPC; INAG. Guia para orientação para elaboração de Planos de Emergência Internos de Barragens. Carnaxide, Portugal. ANPC, 2009. (Cadernos Técnicos PROCIV #5). Disponível em: <http://www.prociv.pt/cadernos/5.pdf> . Acesso em 13 jan. 2024.

APAC. Bacias Hidrográficas - GL - 2. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/bacias-hidrograficas-gl-2/185-bacias-hidrograficas-gl-2/223-gl-2>. Acesso em: 02 out. 2023.

APAC. Planos Diretores de Recursos Hídricos. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/servicos/13-servicos/298-planoshidrologicos>. Acesso em: 02 out. 2023.

BRASIL, L. S. S. Utilização de modelagens uni e bidimensional para a propagação de onda de cheia proveniente de ruptura hipotética de barragem. Estudo de caso: barragem de rios de Pedras-MG. 2005. 222 (Dissertação de Mestrado). Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG.

BRASIL, LEI Nº 12334/2010 - Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. Brasília, 2010.

BARFIELD, B. J.; WARNER, R. C.; HAAN, C. T. Applied Hydrology and Sedimentology for Disturbed Areas. Oklahoma Technical Press, 1981, pp. 104-108.

CAPUTO, Homero Pinto. 1987. Mecânica dos solos e suas aplicações. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1987. v. 3.

CBN Recife. Barragem em Sairé se rompe após fortes chuvas. Recife, 15 jun. 2020. Disponível em: <https://www.cbnrecife.com/artigo/barragem-em-saire-se-rompe-apos-fortes-chuvas>. Acesso em: 25 set. 2023

CEMADEN. Movimento de Massa. Disponível em: <http://www2.cemaden.gov.br/deslizamentos/#:~:text=Deslizamentos%20ou%20Escorregamentos%20s%C3%A3o%20movimentos,%C3%A9%20classificado%20como%20Deslizamento%20Rotacional>. Acesso em: 10 set. 2023.

Chargel, L. T. (2018). Avaliação do uso de modelos hidrodinâmicos, suas limitações, efeitos de escala e da representação topográfica. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B.; SILVA, B. M.; CAMPOS, P. H. A. L. Pernambuco Tridimensional: Base de dados espaciais para o planejamento e gestão territorial. 2014.

CLIMATE DATA. Dados Climáticos para as cidades mundiais. 2019. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/>. Acesso em: 22 set 2023.

COLLISCHONN, W. 1997. Análise do rompimento hipotético da barragem de Ernestina-RS. Dissertação de Mestrado. IPH-UFRGS. 192 págs.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. A História das Barragens no Brasil nos Séculos XIX, XX e XXI: 50 Anos do Comitê Brasileiro de Barragens. Rio de Janeiro: Sindicato nacional dos editores de livros, 2011. 533p.

COMPLEXO INDUSTRIAL PORTUÁRIO GOVERNADOR ERALDO GUEIROS – SUAPE. Estratégia a Longo Prazo 2024-2030 – Suape. Disponível em: <https://www.suape.pe.gov.br/pt/transparencia/governanca-corporativa/estrategia-a-longo-prazo-2017-2023>. Acesso em: 05 out. 2023.

CONSÓRCIO DE ÁGUAS DE PERNAMBUCO. Relatório Final de Atividades Executadas BLOCO III, 2017.

COSTA, J. E. Floods from Dam Failures. Colorado: U.S. Geological Survey, 1985. Relatório Técnico.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. 2005. Diagnóstico do Município de Ipojuca. Recife: CPRM, 2005. 21 p.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. 2011. Atlas pluviométrico do Brasil: isoietas mensais, isoietas trimestrais, isoietas anuais, meses mais secos, meses mais chuvosos, trimestres mais secos, trimestres mais chuvosos. Brasília: CPRM, 2011. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html>.

D'ASARO, F.; GRILLONE, G. Empirical investigation of curve number method parameters in the Mediterranean area. Journal of Hydrologic Engineering, v. 17, n. 10, 2012. p. 1141-1152.

Ebrahim, Nadeen; Paddisonda, Laura. Barragens velhas e crise climática: Entenda as causas das inundações mortais na Líbia. CNN Brasil, 15 set. 2023. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/internacional/barragens-velhas-e-crise-climatica-entenda-as-causas-das-inundacoes-mortais-na-libia/>. Acesso em: 10 Jan. 2024.

ELETROBRÁS. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. 2003. Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidroelétricas. 279 p.

FARIA, F. L. F; REIS, M. M. AMORIM, J. C. C. Metodologia para obtenção do hidrograma para simulação de barragens. 2019. Academia Militar das Agulhas Negras, Resende – RJ.

FEMA- Federal Emergency Management Agency. Guidelines and Standards for Flood Risk Analysis and Mapping, 25 Agosto 2015. Disponível em: .

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). MANUAL SOBRE PEQUENAS BARRAGENS DE TERRA - GUIA PARA A LOCALIZAÇÃO, PROJETO E CONSTRUÇÃO. Roma, FAO. 123 p., 2011.

FROEHLICH, D.C. (1995). "Embankment dam breach parameters revisited" Water Resources Engineering, New York, pp. 887-891.

FROEHLICH, D.C. (2008). "Embankment dam breach parameters and their uncertainties". Journal of Hydraulic Engineering 134(12), pp. 1708-172

ICOLD - INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. Dam break flood analysis: review and recommendations. Bulletin 111. Paris, 1998, 301 p.

IFRC. What is a disaster? Disponível em: < <http://www.ifrc.org/en/what-we-do/disaster-management/aboutdisasters/what-is-a-disaster/>>. Acesso em: 22 set. 2023.

LAURIANO, A, W. Estudo de Ruptura da Barragem de Funil: comparação entre os modelos FLDWAV e HECRAS. 251f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. Minas Gerais. 2009.

LEITÃO, F. T. P. et al. Comparação de Modelos Hidrológicos Utilizando o HEC-HMS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22., 2017, Florianópolis. Anais... Florianópolis: ABRH, 2017.

MACDONALD, T.C.; LANGRIDGE-MONOPOLIS, J. (1984). "Breaching characteristics of dam failures". Journal of Hydraulic Engineering 110(5), pp. 567-586.

MAMAT, A. F., HUSSAIN, M. R. M., TUKIMAN, I., MUDA, R. S., & RABE, N. S. (2019). Safe Havens and Evacuation Routes due to Dam Disaster. International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE), Volume-8, Issue-1C2, ISSN: 2277-3878.

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. 2001. Geoprocessamento em recursos hídricos– princípios, integração e aplicação. Porto Alegre, RS: ABRH, 534p.

MASCARENHAS, F. C. B. Modelação Matemática de Ondas Provocadas por Ruptura de Barragens. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1990, 291 p.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. Manual de Segurança e Inspeção de Barragens. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2002. 148 p.

OLIVEIRA, Jader Roosevelt de Carvalho. Contribuição para a verificação e controle da segurança de pequenas barragens de terra. 2008. 263 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, 2008.

PERINI, Daniel Sosti. Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra. 2009. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

PERNAMBUCO. Pernambuco Tridimensional: PE3D. Secretaria de Desenvolvimento Econômico – SDEC. (2016). Disponível em: <[www.pe3d.pe.gov.br](http://www.pe3d.pe.gov.br)>. Acesso em: 29 de setembro de 2023.

PERNAMBUCO. Secretaria de Ciência e Tecnologia e Meio Ambiente (SECTMA). Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco – PERH. Recife: 1998. 8v

PMPA. Prefeitura Municipal de Porto Alegre. Plano Diretor de Drenagem Urbana. Manual de Drenagem Urbana, Volume VI. 2005. 167 p.

RAMOS, A. M. Influência das mudanças climáticas devido ao efeito estufa na drenagem urbana de uma grande cidade. 2010. 160 f. Tese (Doutorado em Engenharia civil) - Centro de Tecnologia e Geociências. Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2010.

ROCHA, F.F. (2016). Cenários de Formação e Evolução de Rupturas em Barragens de Rejeito. V Simpósio sobre Segurança de Barragens e Riscos Associados Comitê Brasileiro de Barragens – CBDB. Disponível em: <https://goo.gl/uHdALf>. Acesso em: 07 de outubro de 2023.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955. 104p. (Publications in Climatology, vol. VIII, n.1)

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli (Org.). Hidrologia: ciência e aplicação. 2ª ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2001. 943 p. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 4). ISBN 85-7025-298-6

US Army Corps of Engineers - USACE (2014). Using HEC-HAS for Dam Break Studies. Davis, CA, USA: US Army Corps of Engineers, 74p.

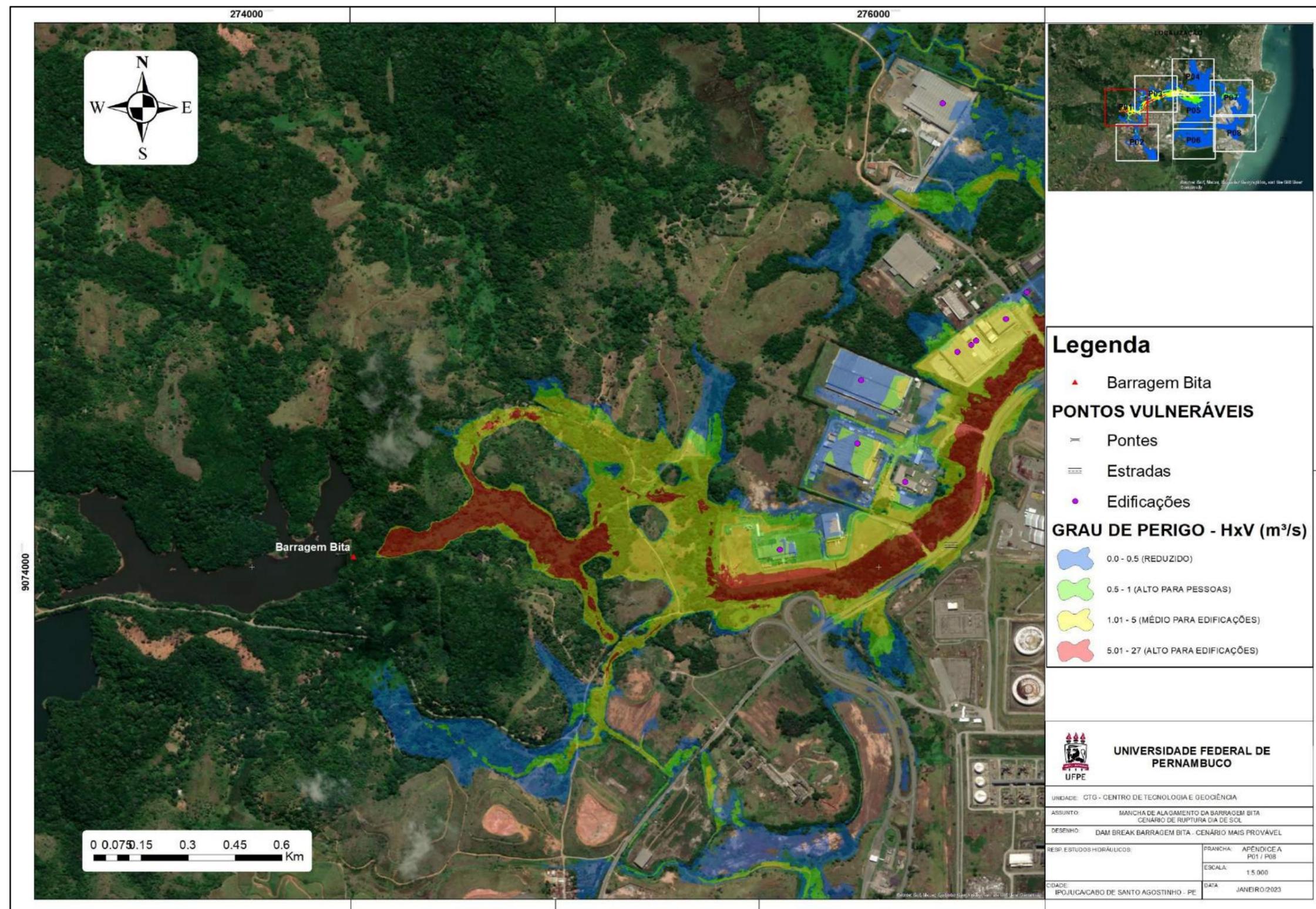
WISEU, T. Segurança dos vales a jusante de barragens – Metodologias de apoio à gestão dos riscos. Tese (Doutorado) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 482 p., 2006.

VON THUN, J.L.; GILLETTE, D.R. (1990). Guidance on breach parameters. Denver, Colorado, U.S. Bureau of Reclamation 17.

XU, Y. ZHANG, L.M., Breaching Parameters for Earth and Rockfill Dams. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135 (12), pp 1957-1970, 2009.

APÊNDICE A – MAPAS DETALHADOS DA MANCHA DE INUNDAÇÃO DO CENÁRIO 1

Figura 43 - CENÁRIO MAIS PROVÁVEL: P01



Fonte: Autor.

Figura 44 - CENÁRIO MAIS PROVÁVEL: P02

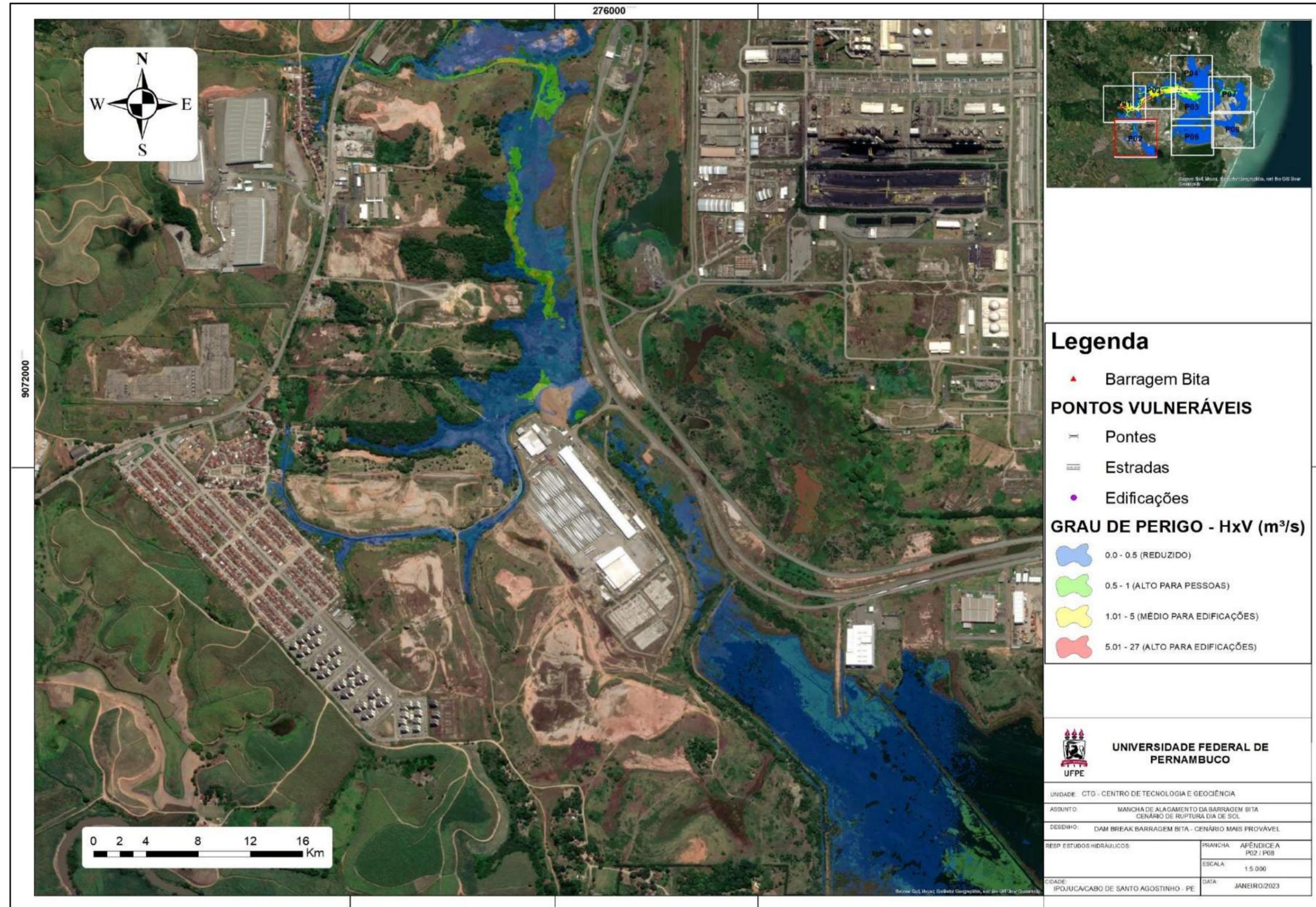
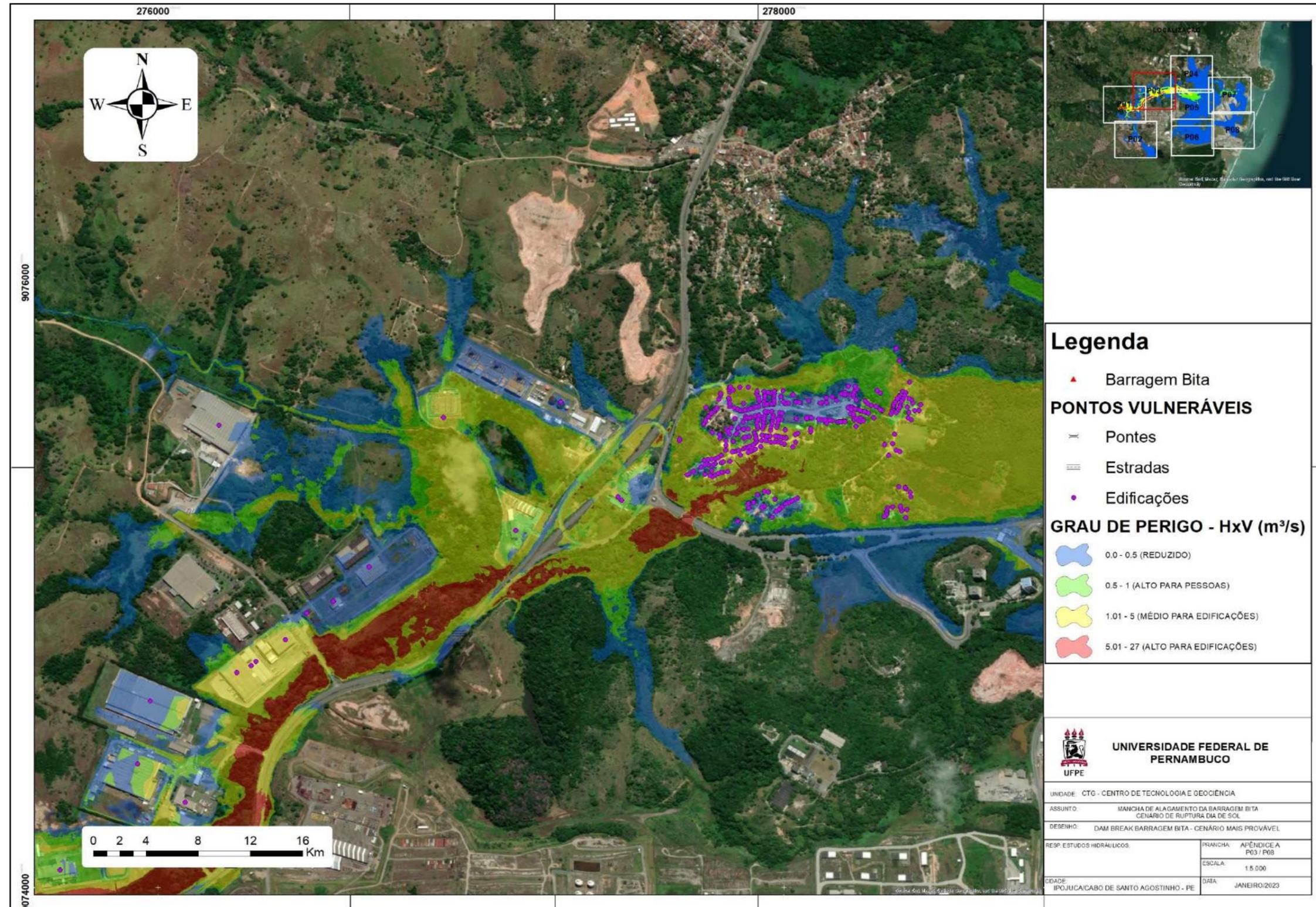
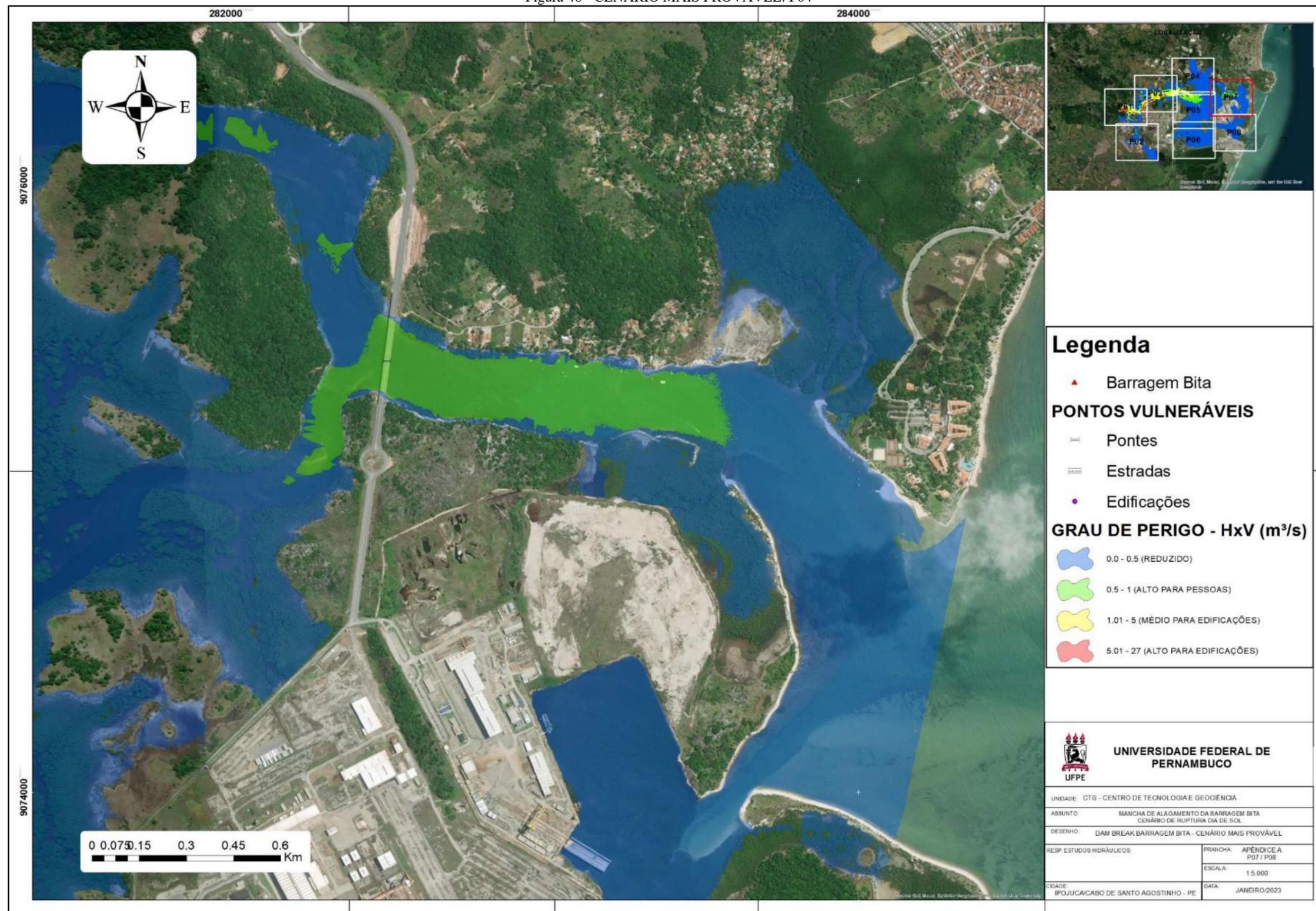


Figura 45 - CENÁRIO MAIS PROVÁVEL: P03



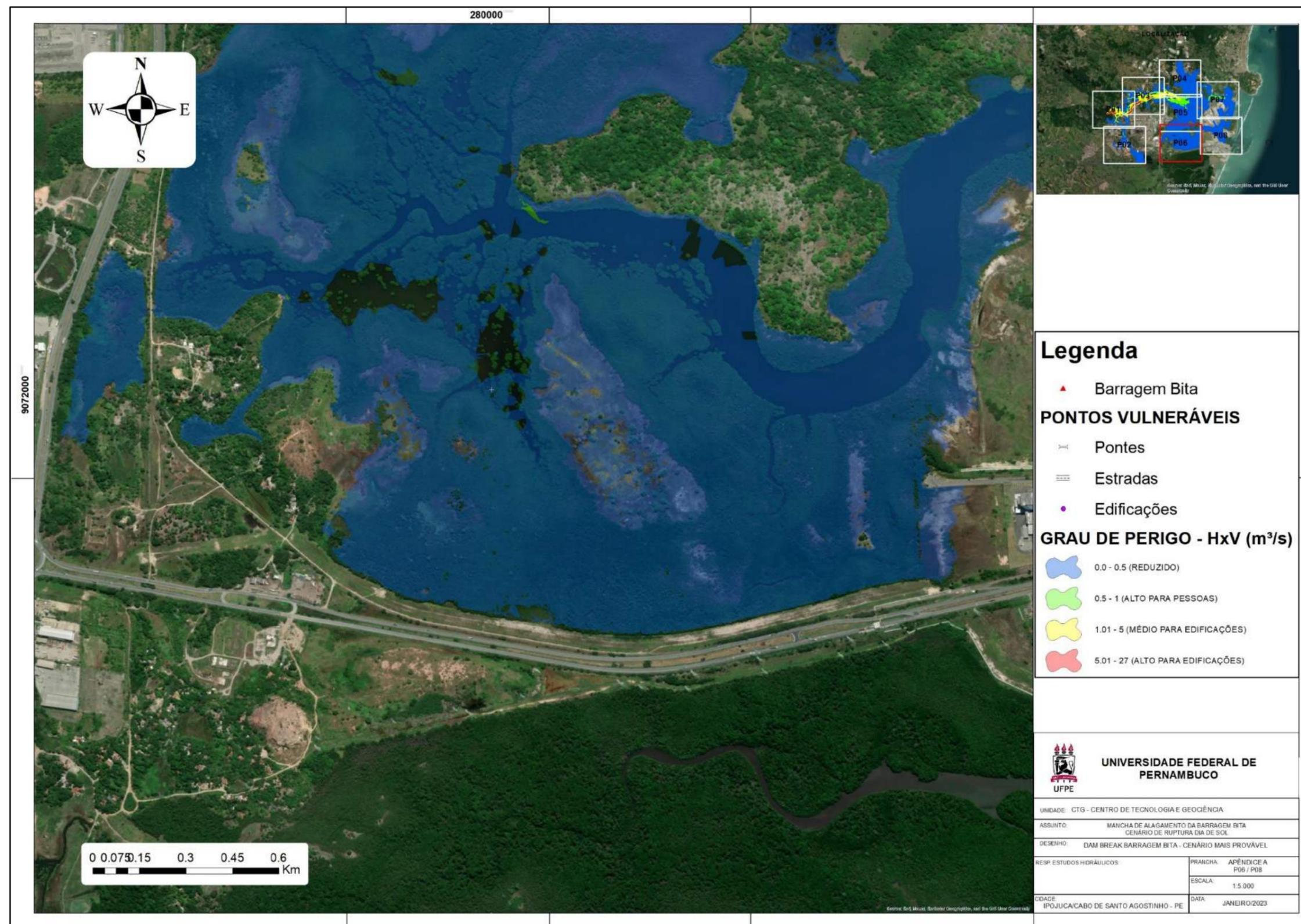
Fonte: Autor.

Figura 46 - CENÁRIO MAIS PROVÁVEL: P04



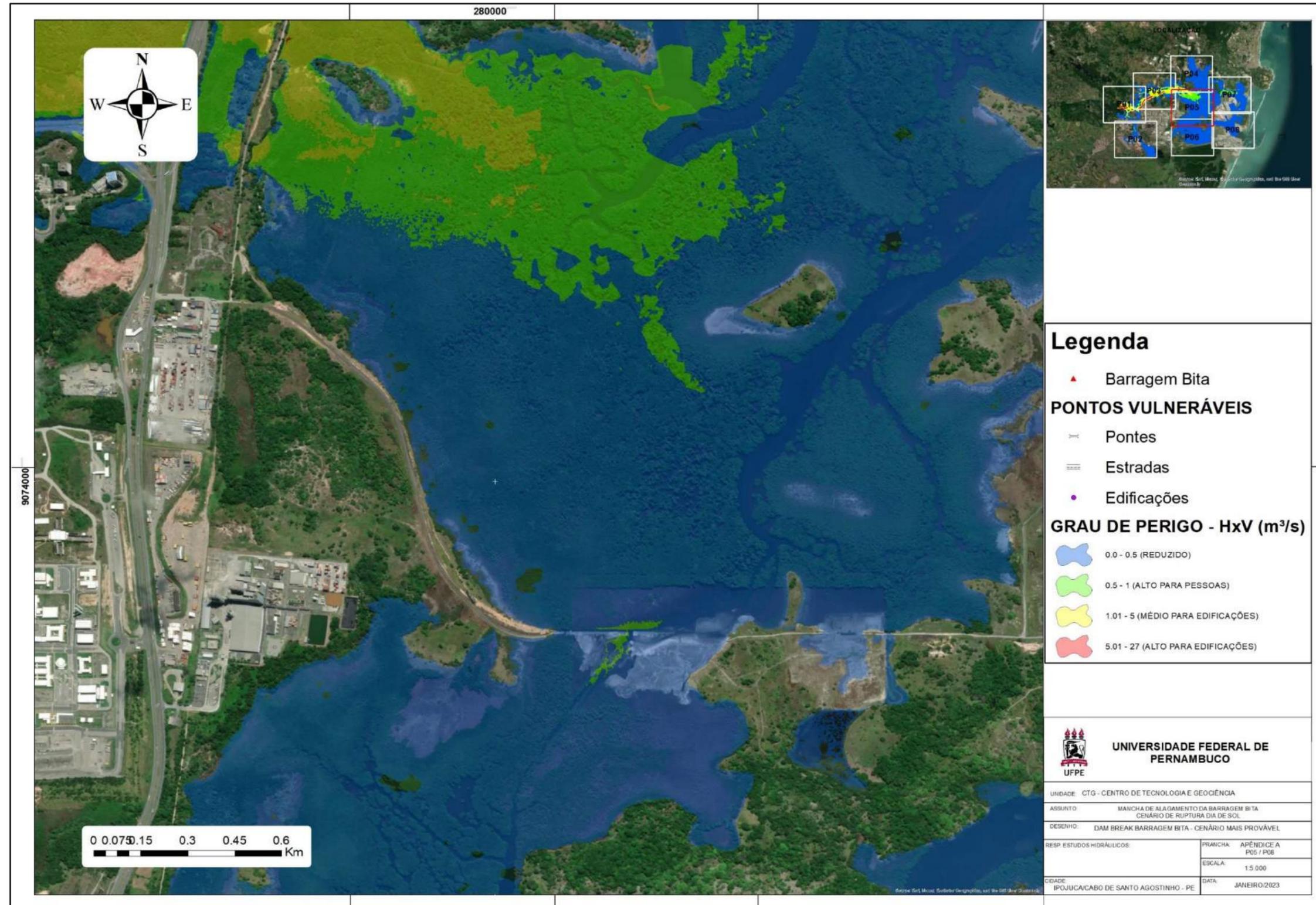
Fonte: Autor.

Figura 47 - CENÁRIO MAIS PROVÁVEL: P05



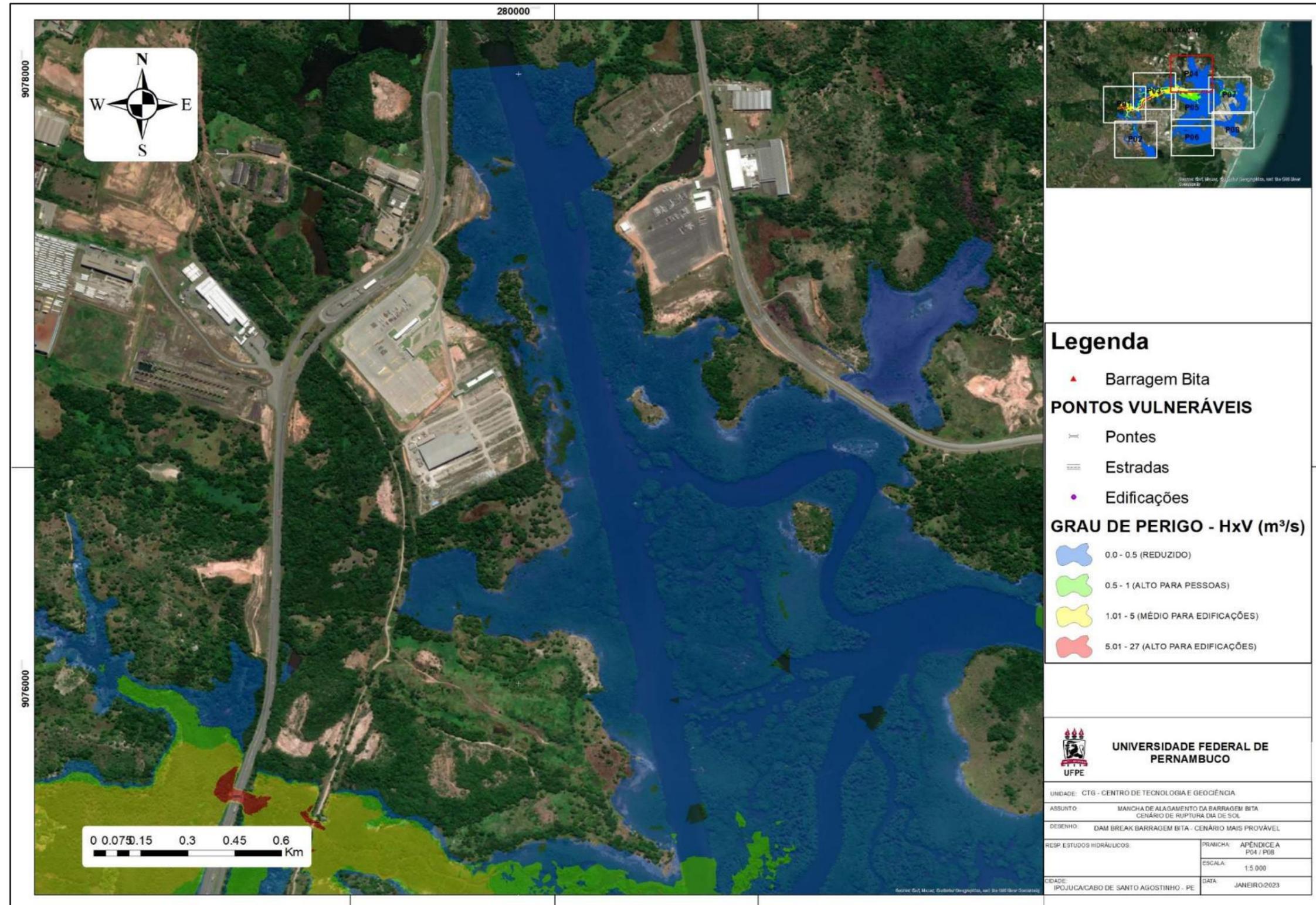
Fonte: Autor.

Figura 48 - CENÁRIO MAIS PROVÁVEL: P06



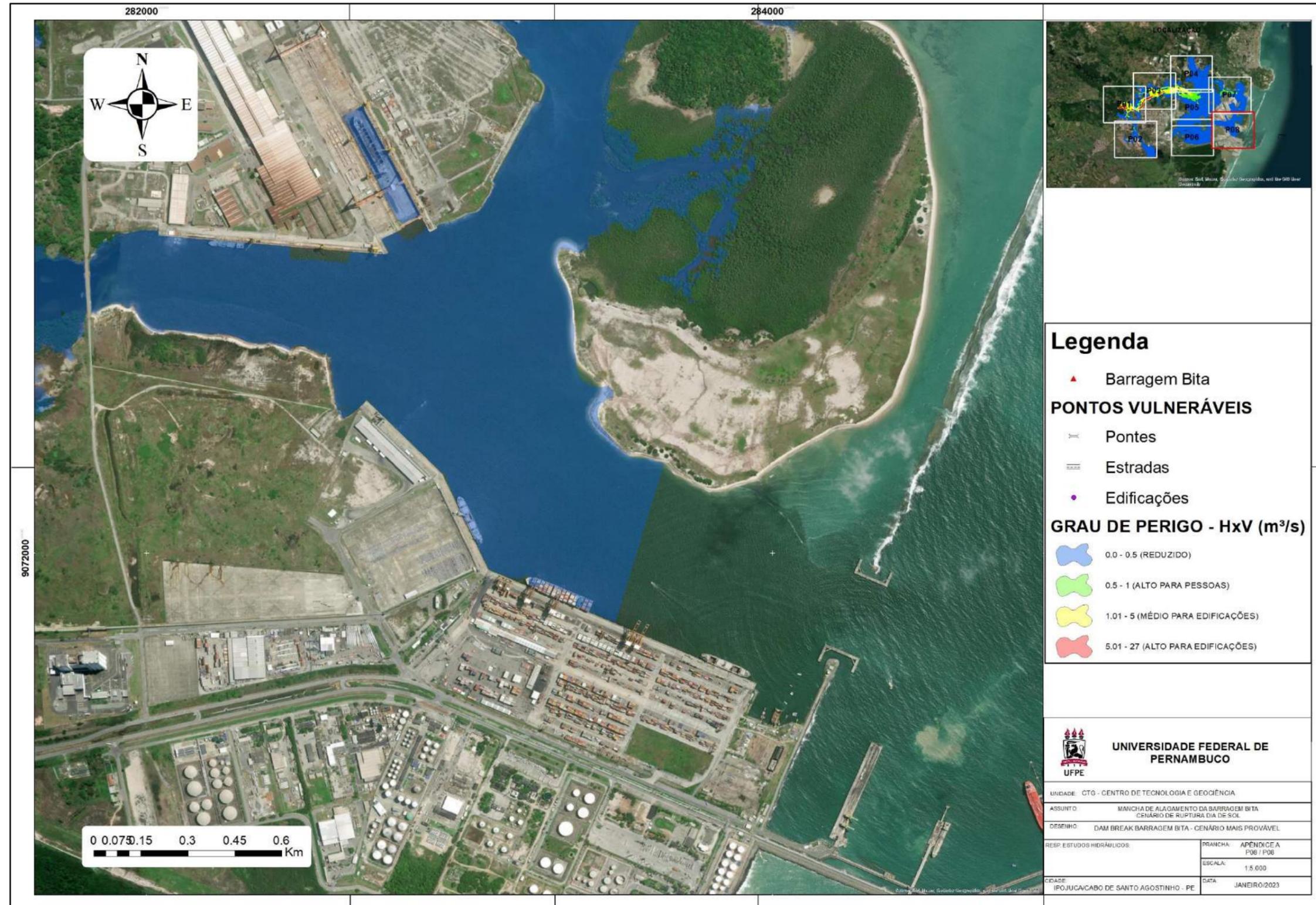
Fonte: Autor.

Figura 49 - CENÁRIO MAIS PROVÁVEL: P07



Fonte: Autor.

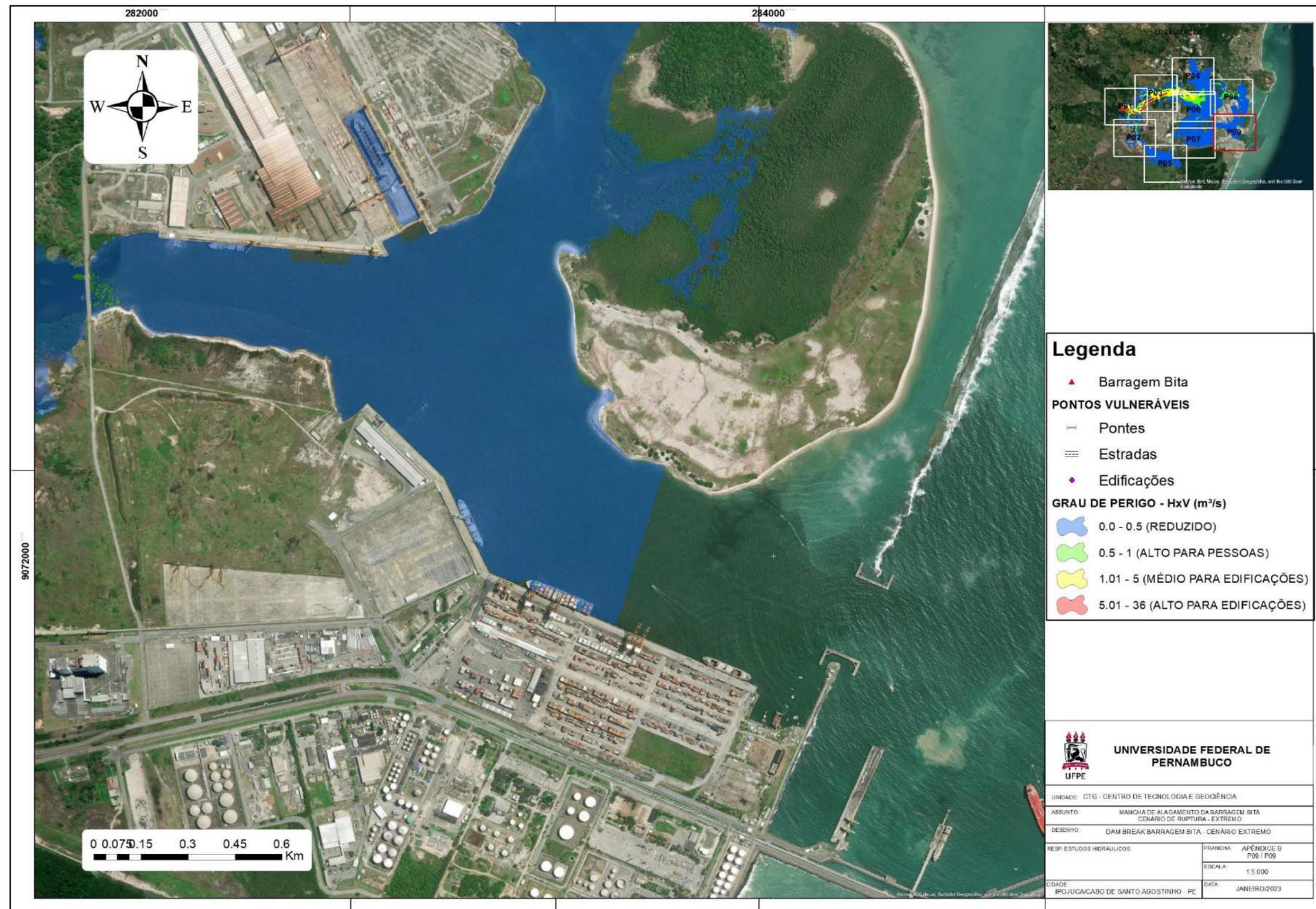
Figura 50 - CENÁRIO MAIS PROVÁVEL: P08



Fonte: Autor.

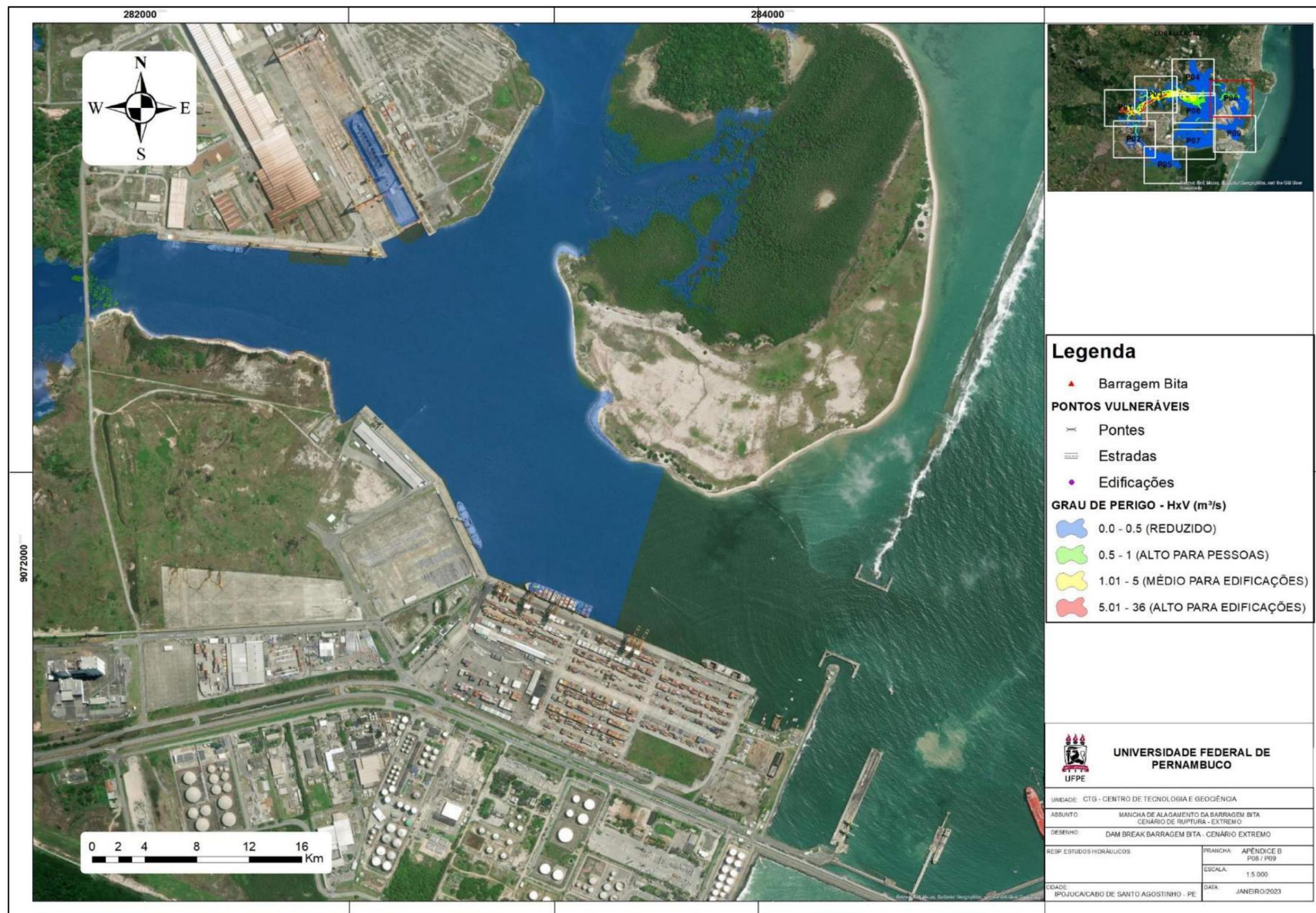
APÊNDICE A – MAPAS DETALHADOS DA MANCHA DE INUNDAÇÃO DO CENÁRIO 2

Figura 51 - CENÁRIO EXTREMO: P01



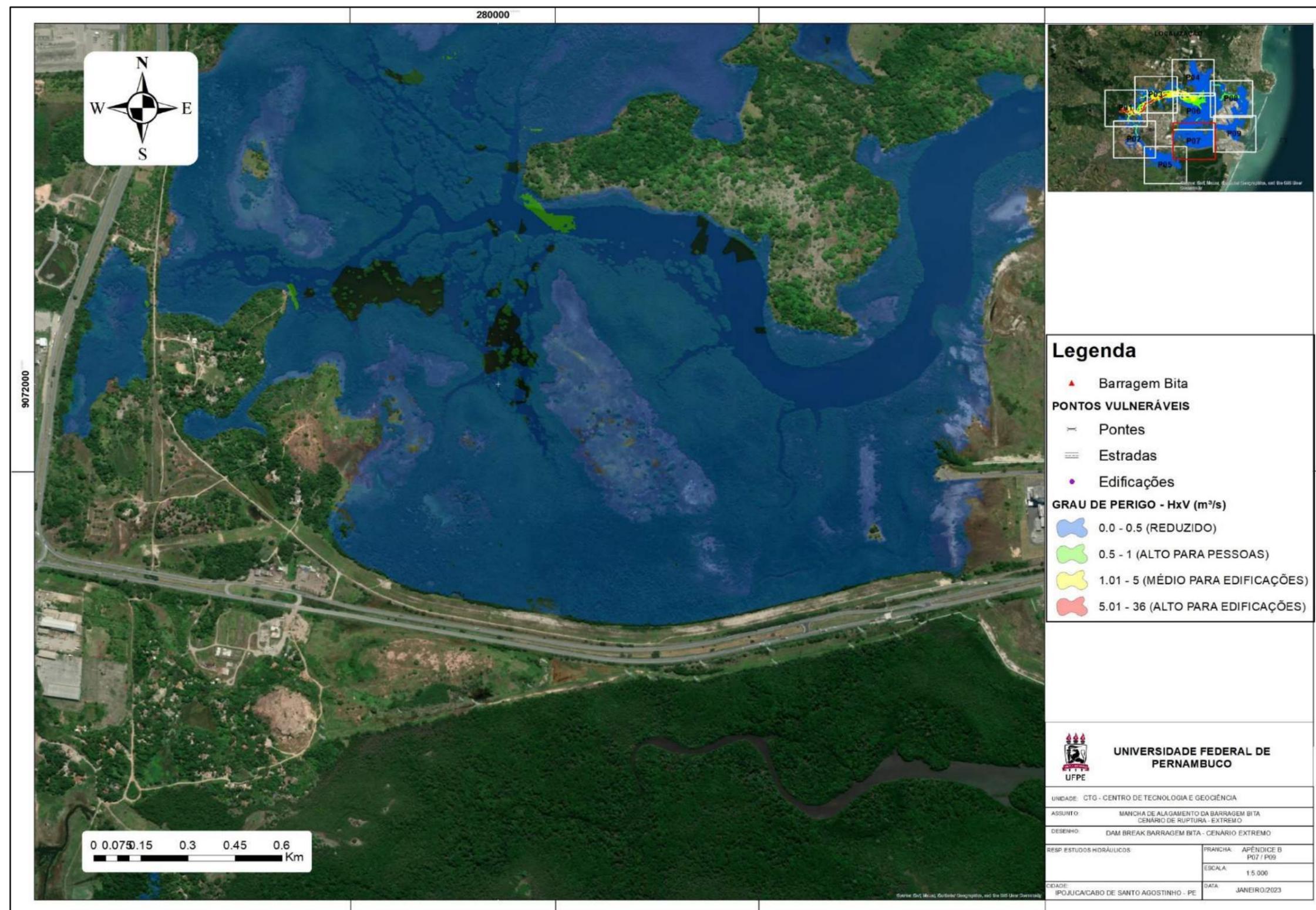
Fonte: Autor.

Figura 52 - CENÁRIO EXTREMO: P02



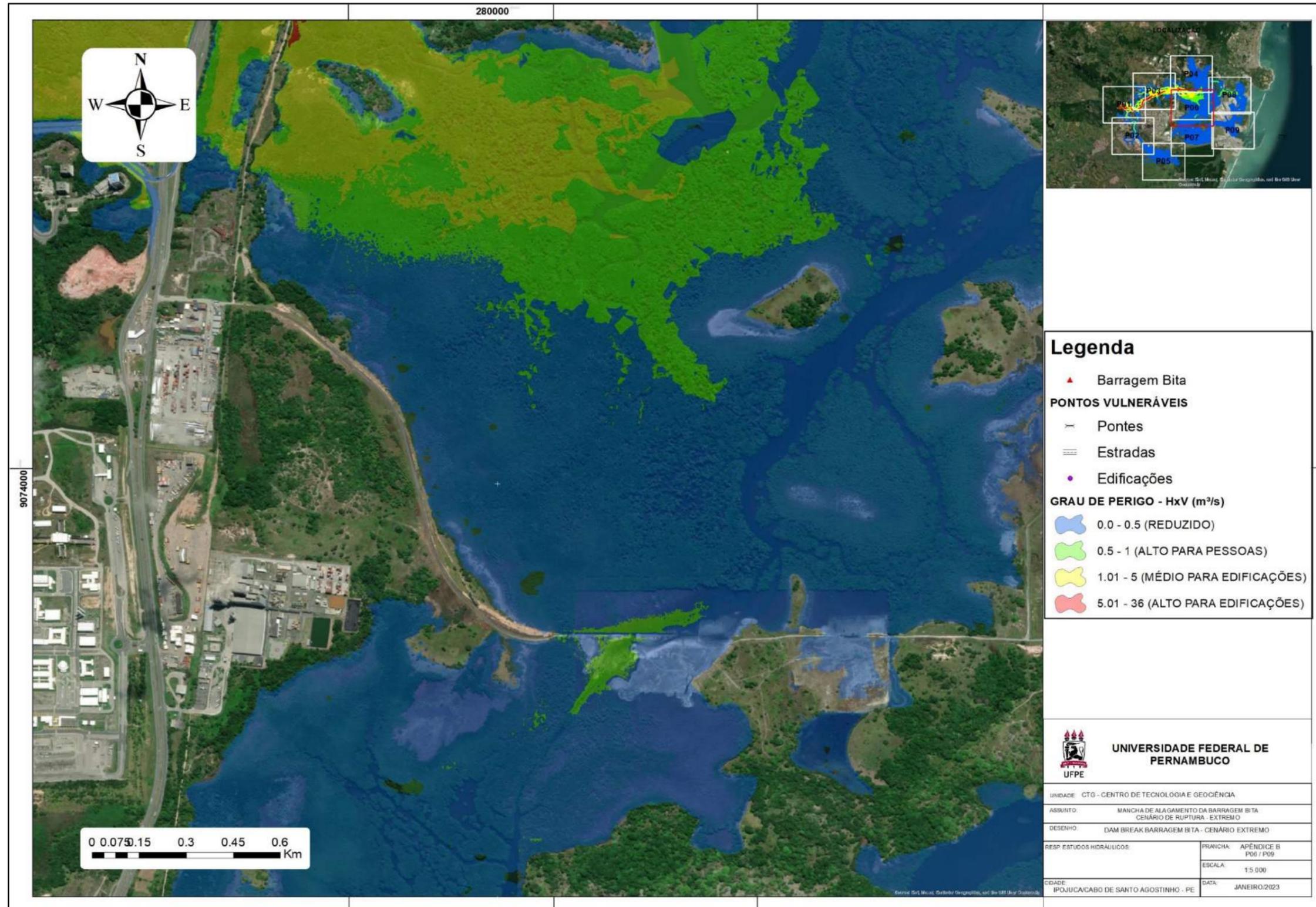
Fonte: Autor.

Figura 53 - CENÁRIO EXTREMO: P03



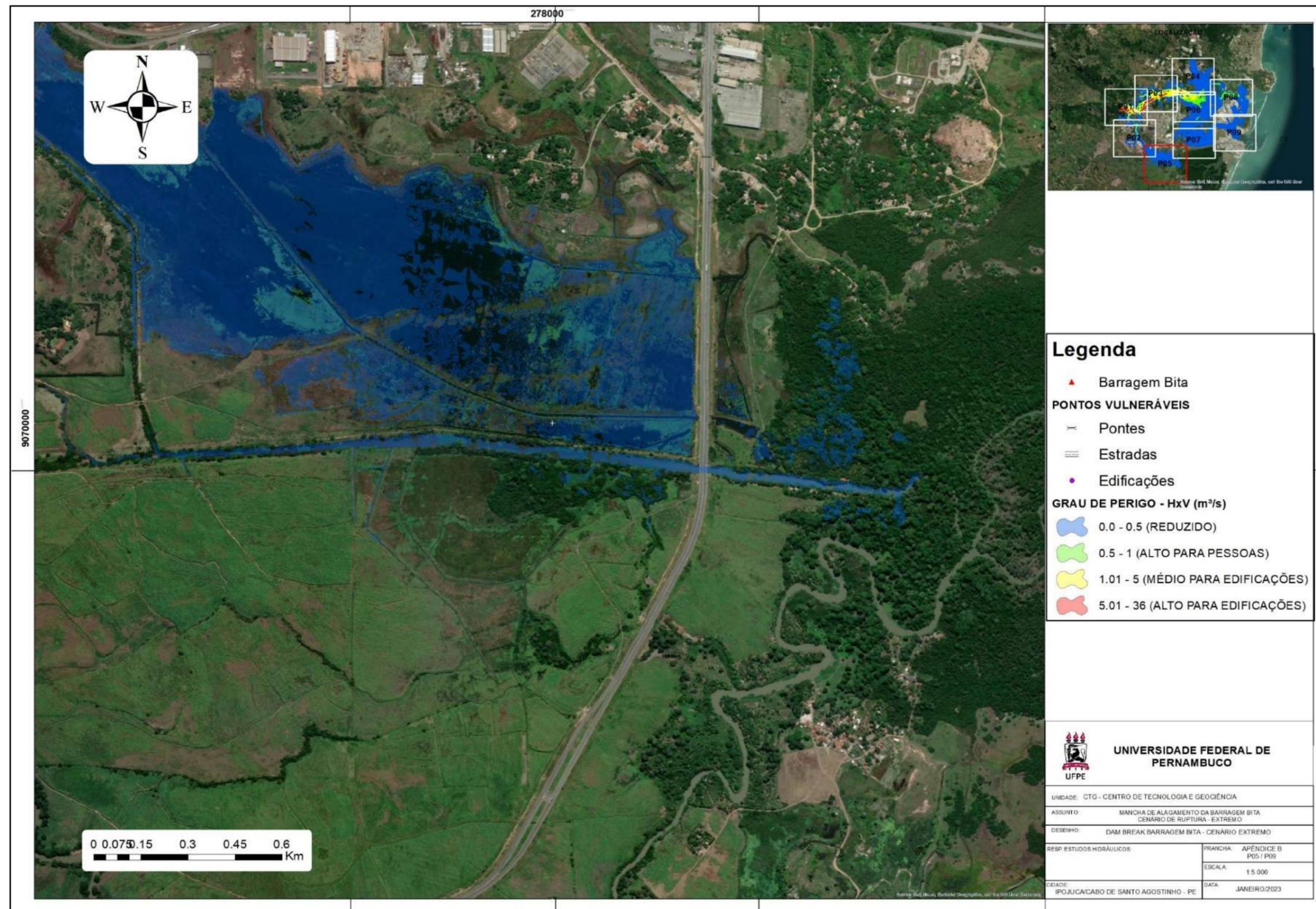
Fonte: Autor.

Figura 54 - CENÁRIO EXTREMO: P04



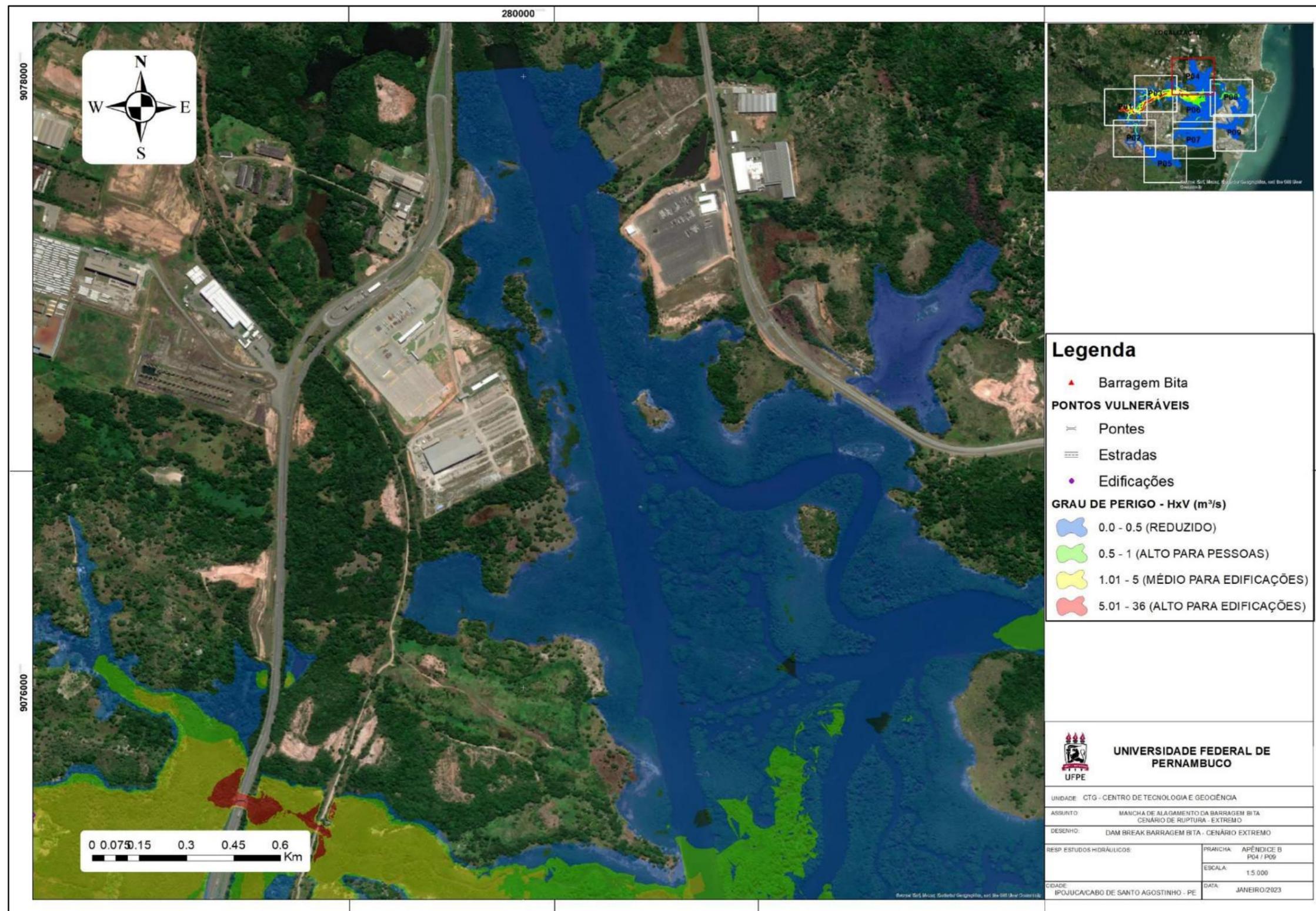
Fonte: Autor.

Figura 55 - CENÁRIO EXTREMO: P05



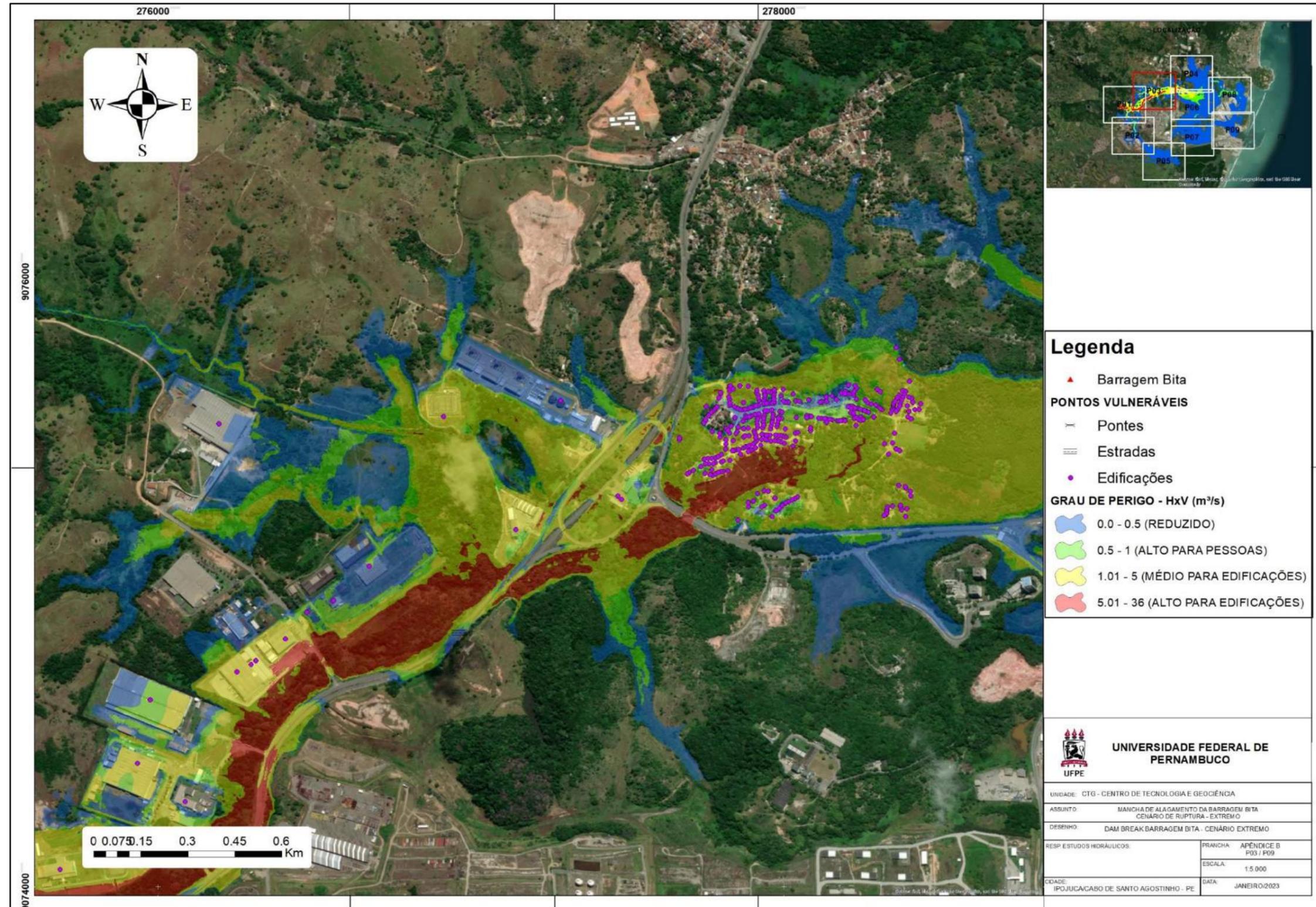
Fonte: Autor.

Figura 56 -CENÁRIO EXTREMO: P09



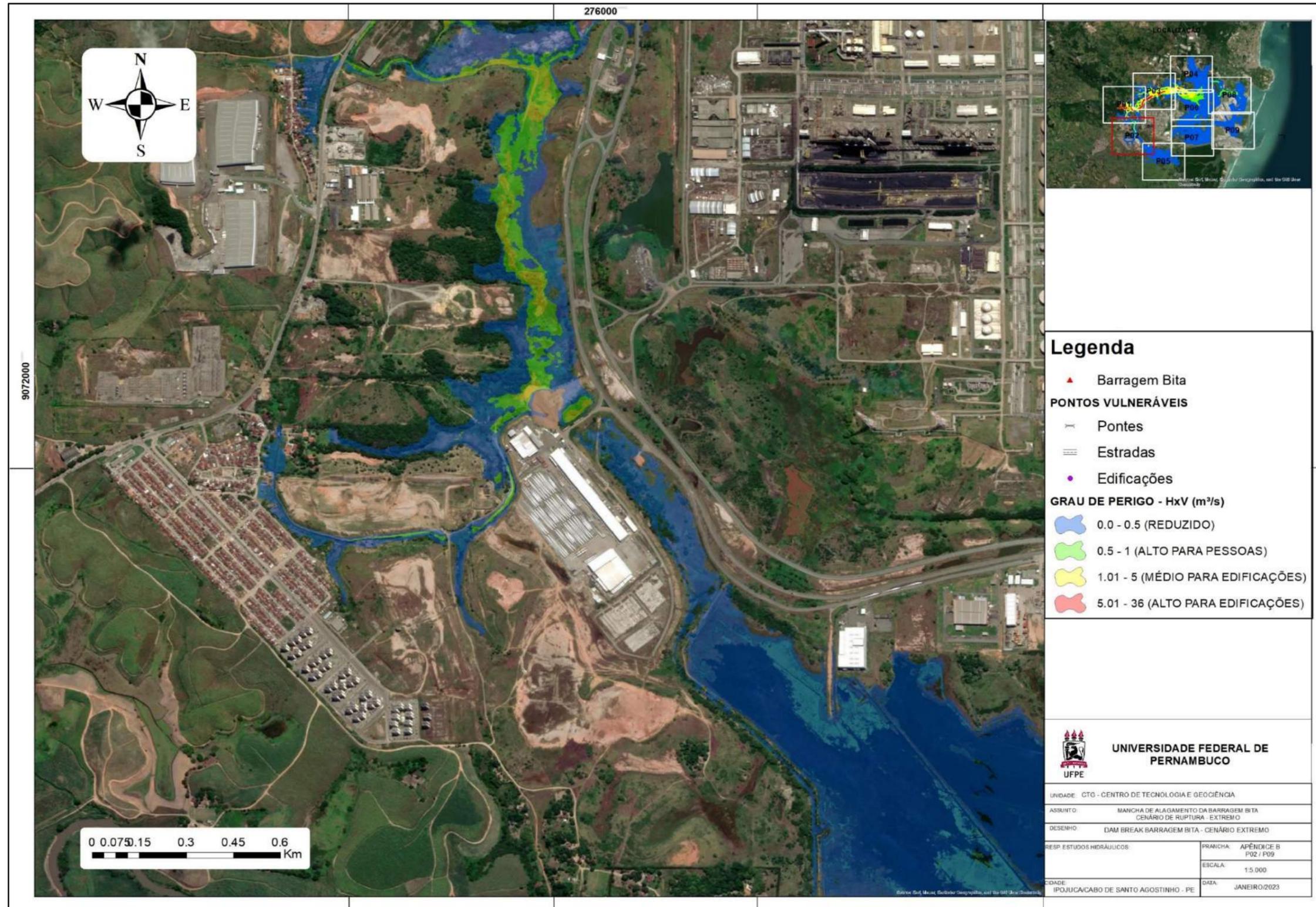
Fonte: Autor.

Figura 57- CENÁRIO EXTREMO: P07



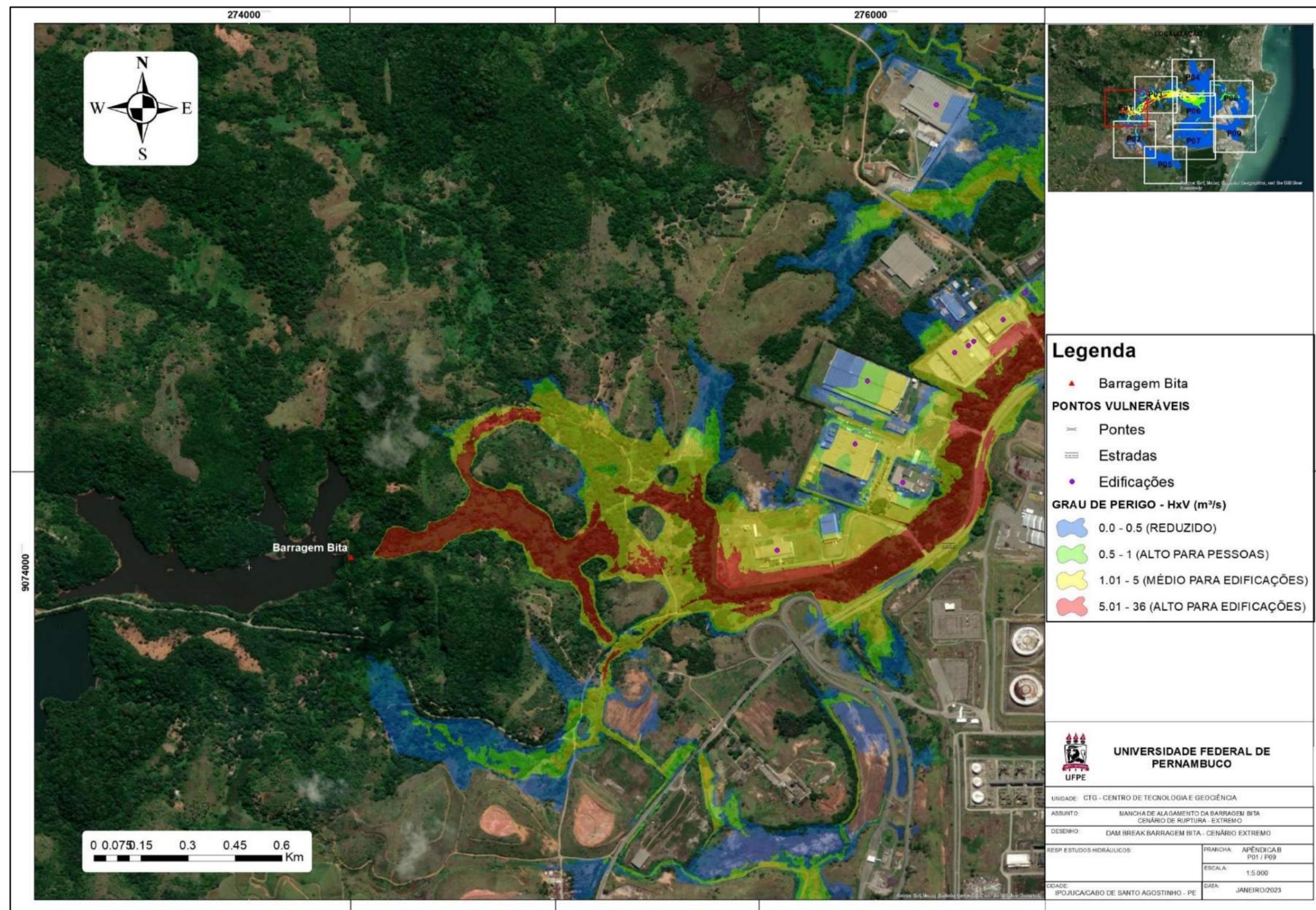
Fonte: Autor.

Figura 58 - CENÁRIO EXTREMO: P08



Fonte: Autor.

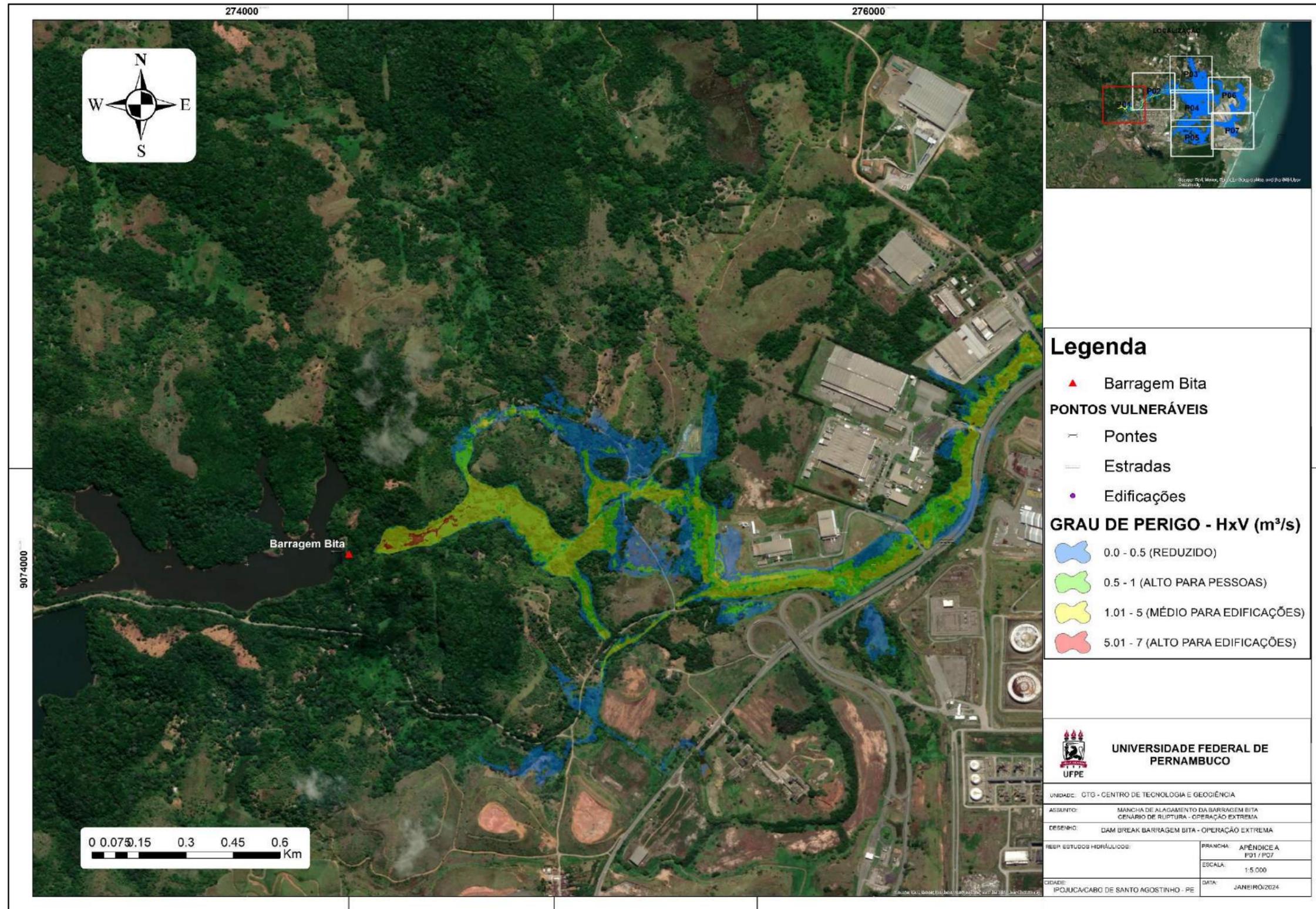
Figura 59 - CENÁRIO EXTREMO: P09



Fonte: Autor.

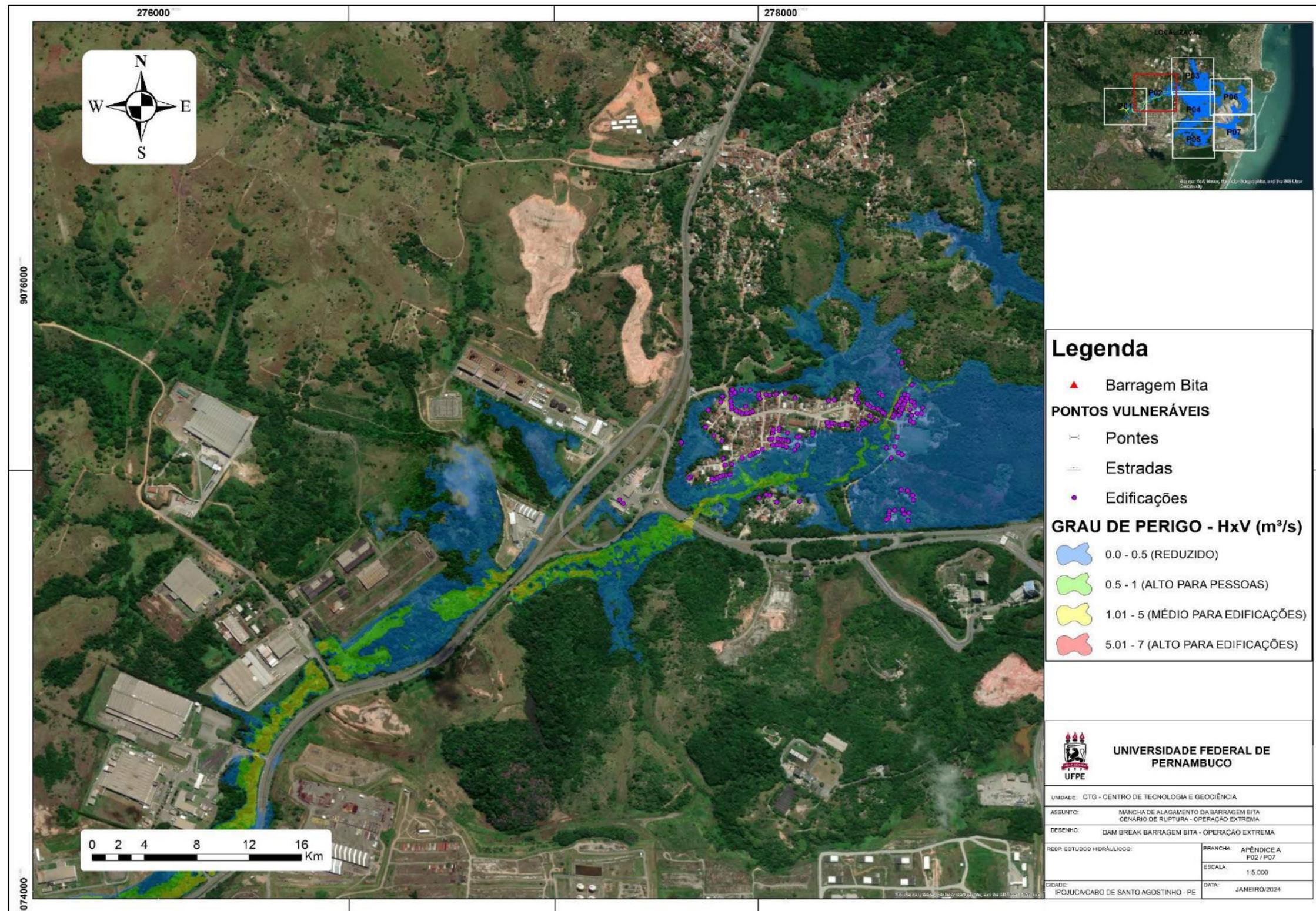
APÊNDICE A – MAPAS DETALHADOS DA MANCHA DE INUNDAÇÃO DO CENÁRIO 3

Figura 60 - CENÁRIO - OPERAÇÃO EXTREMA: P01



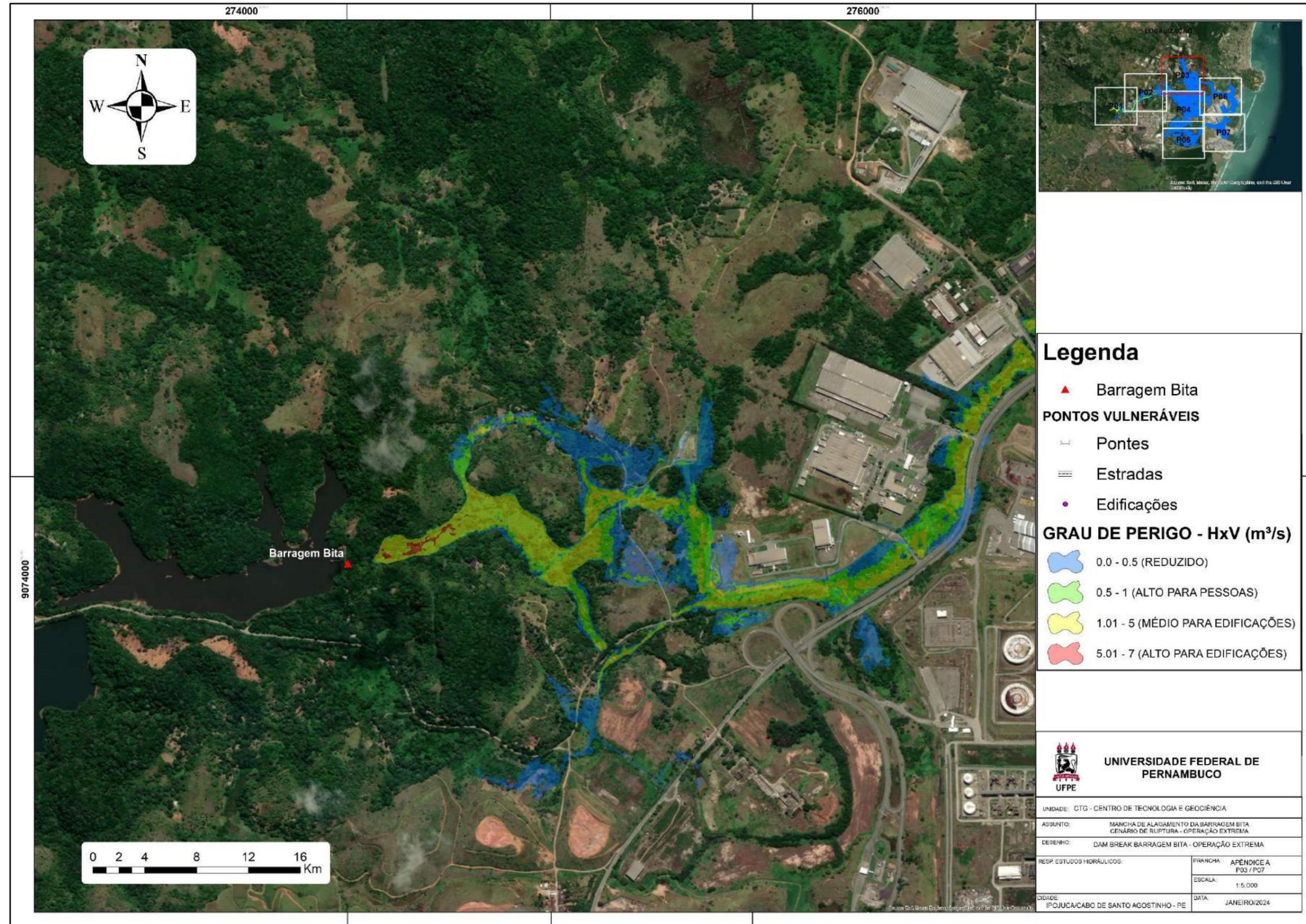
Fonte: Autor.

Figura 61 - CENÁRIO DE OPERAÇÃO EXTREMA: P02



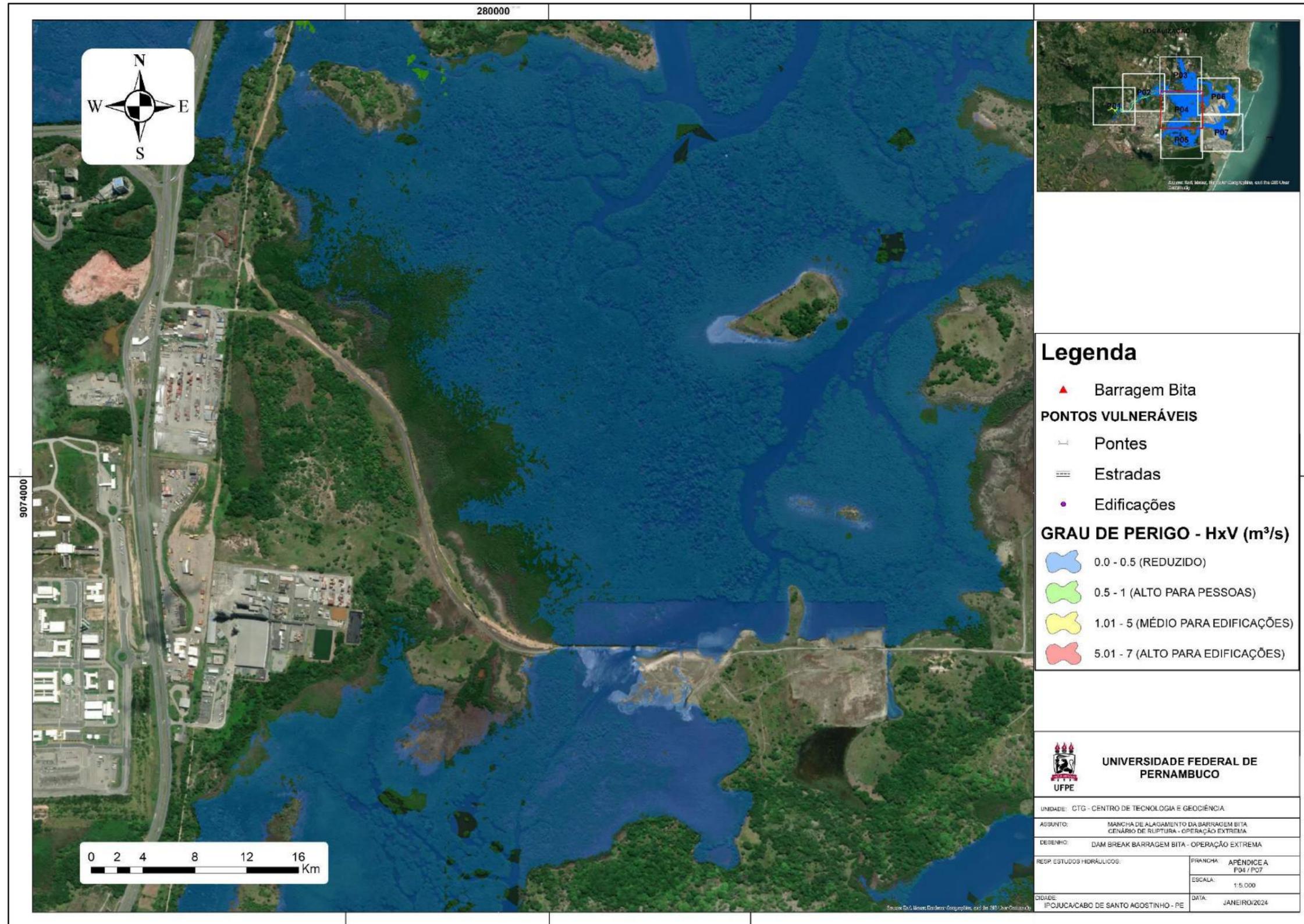
Fonte: Autor.

Figura 62 - CENÁRIO DE OPERAÇÃO EXTREMA: P03



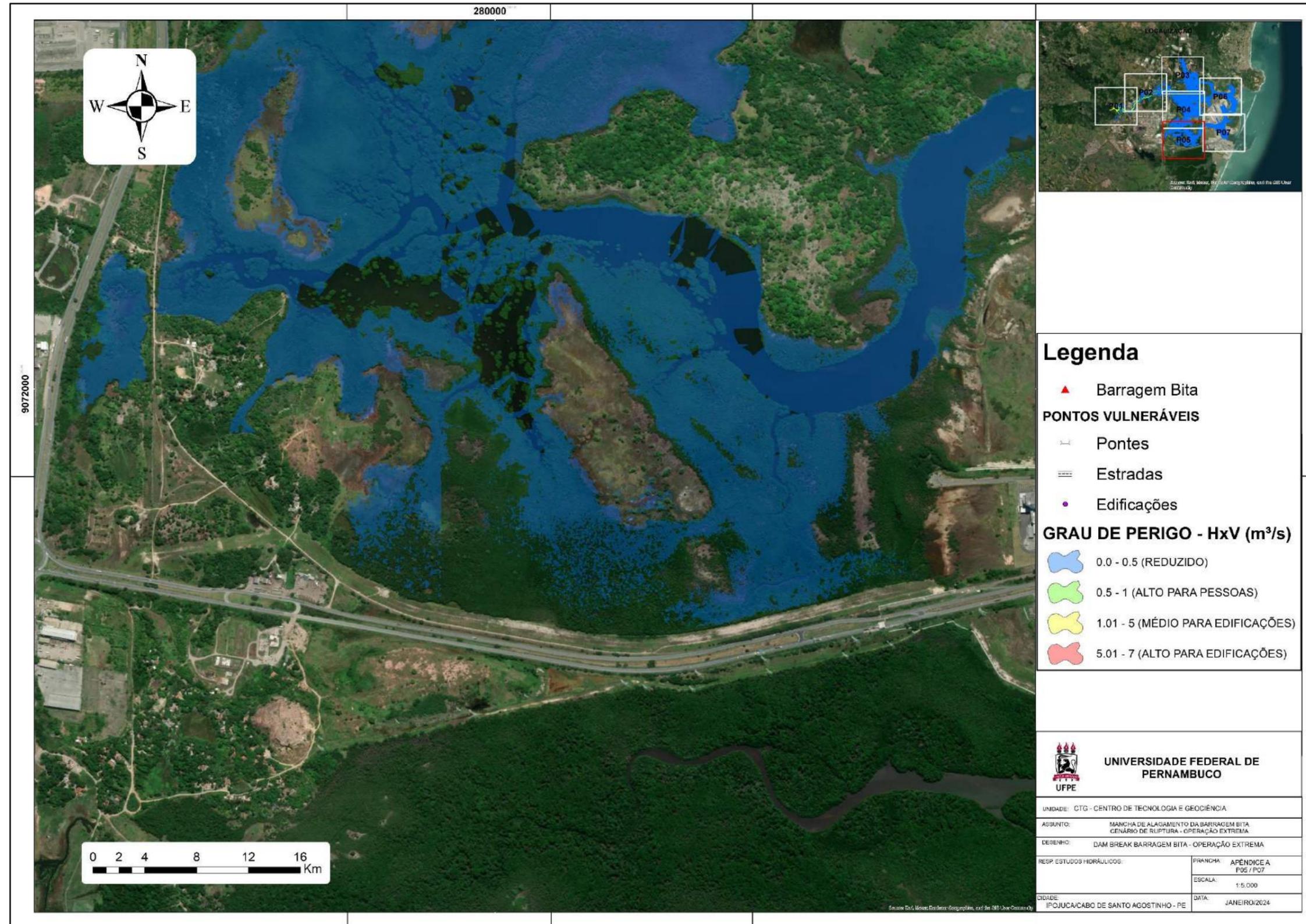
Fonte: Autor.

Figura 63 - CENÁRIO DE OPERAÇÃO EXTREMA: P04



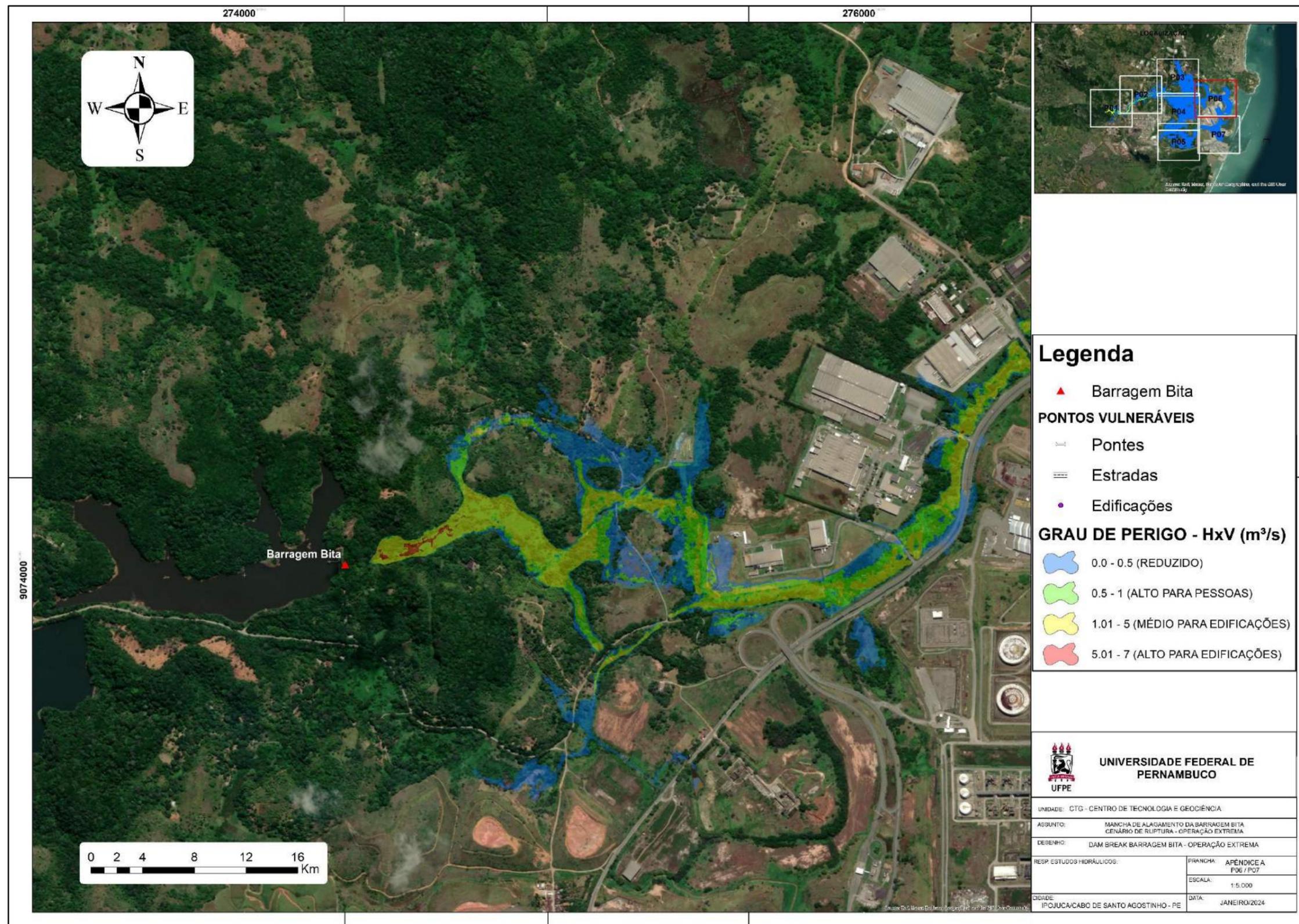
Fonte: Autor.

Figura 64 - CENÁRIO DE OPERAÇÃO EXTREMA: P06



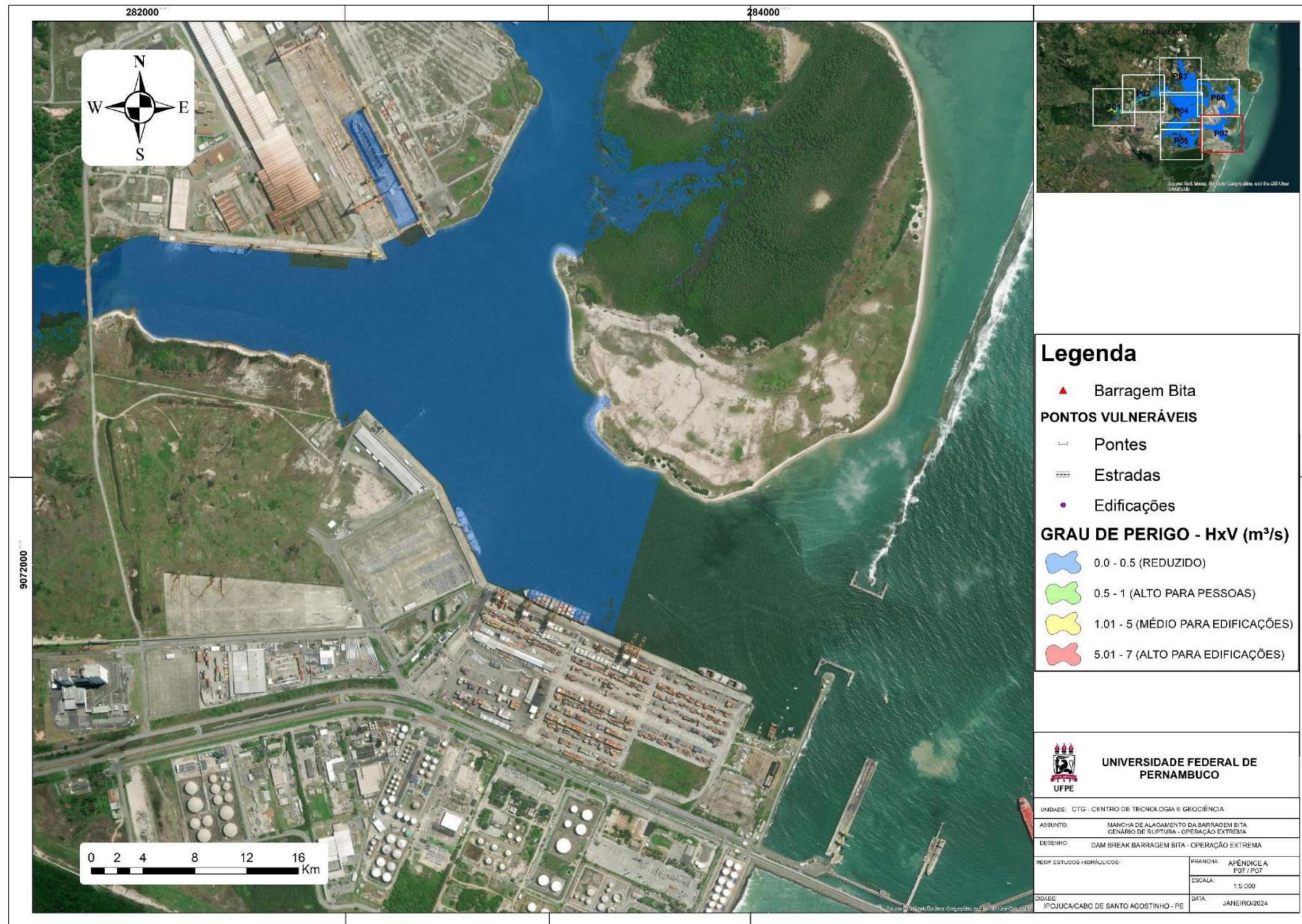
Fonte: Autor.

Figura 65 - CENÁRIO DE OPERAÇÃO EXTREMA: P06



Fonte: Autor.

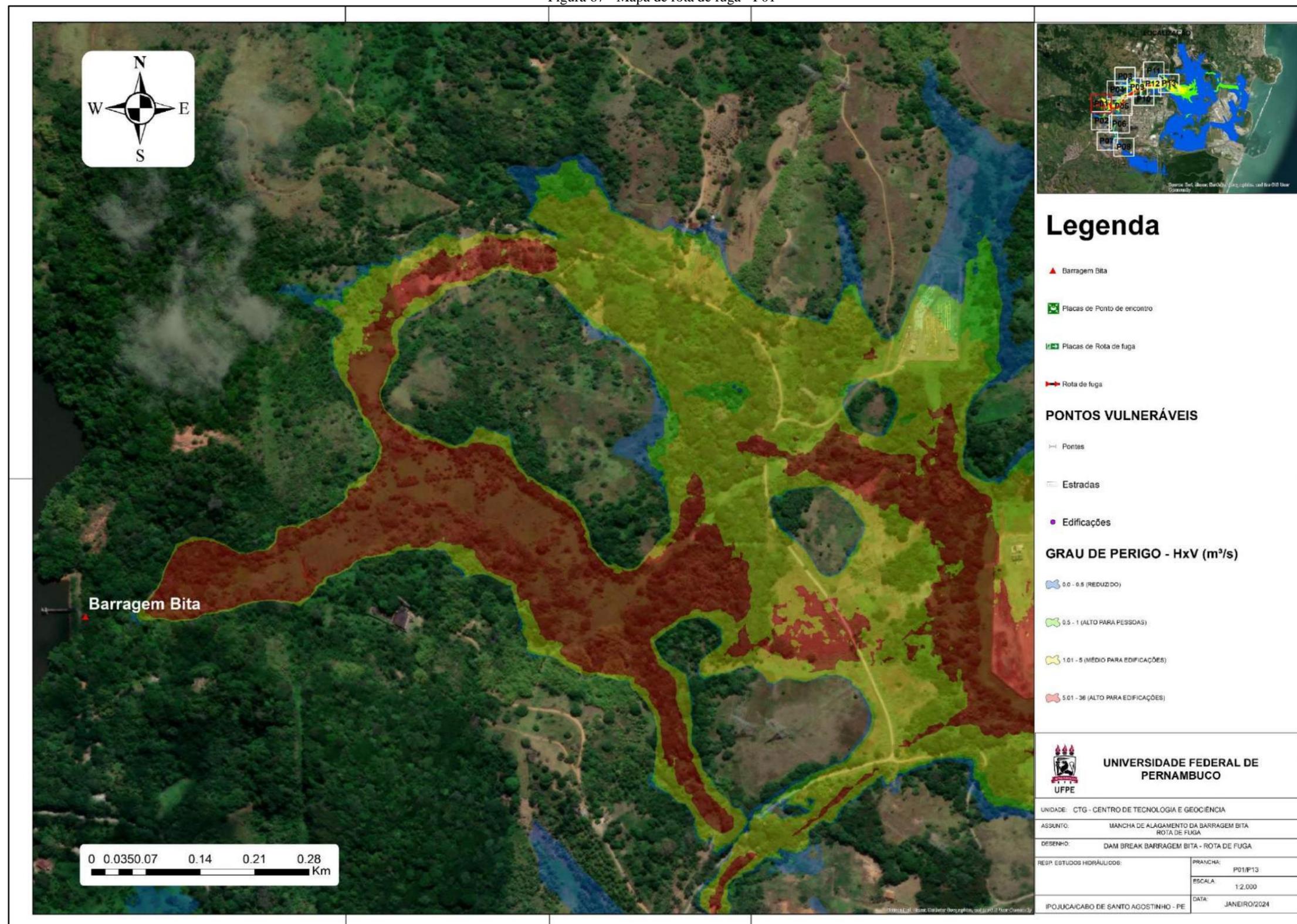
Figura 66 - CENÁRIO DE OPERAÇÃO EXTREMA: P07



Fonte: Autor.

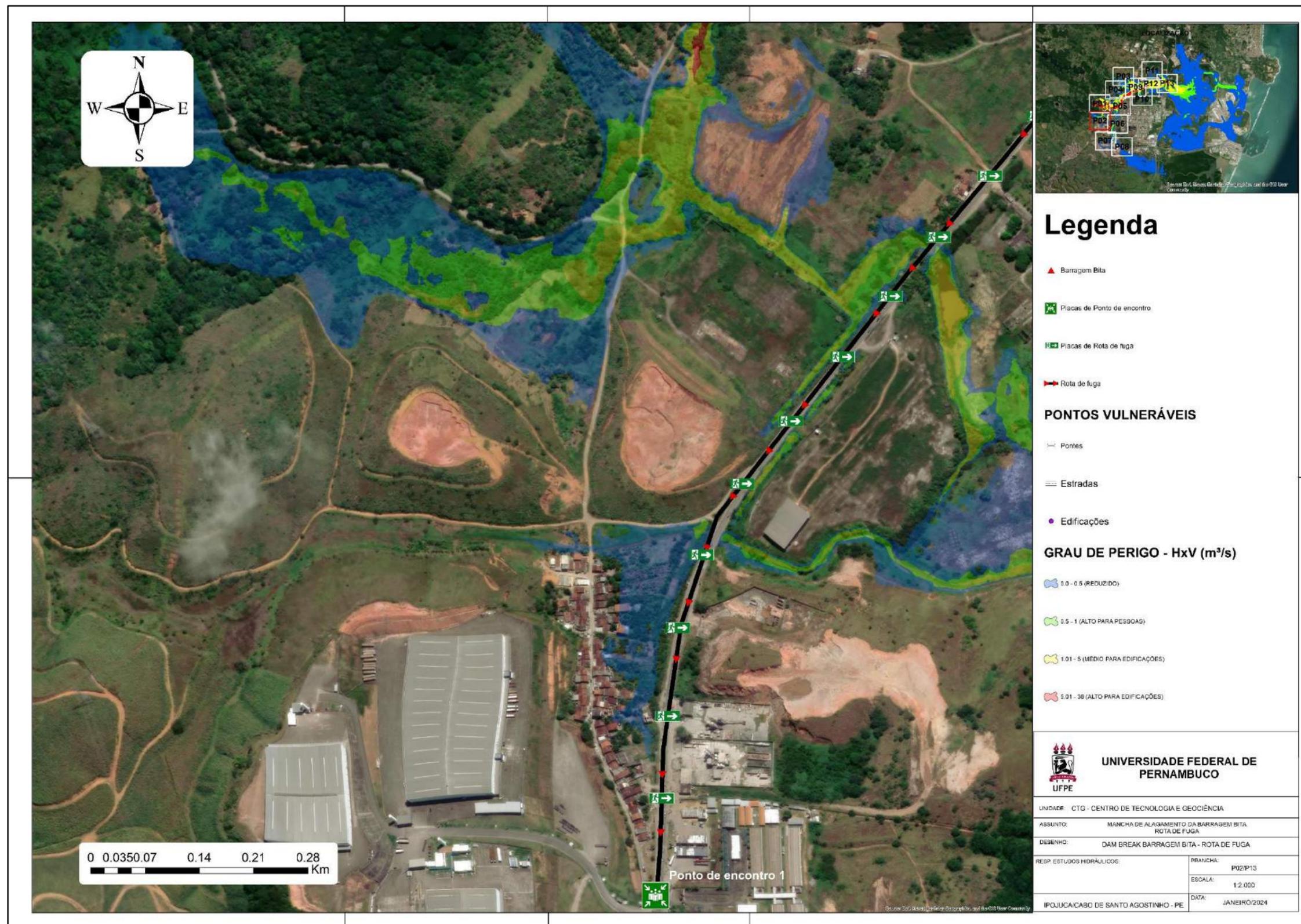
APÊNDICE A – MAPAS DETALHADOS DA ROTA DE FUGA

Figura 67 - Mapa de rota de fuga - P01



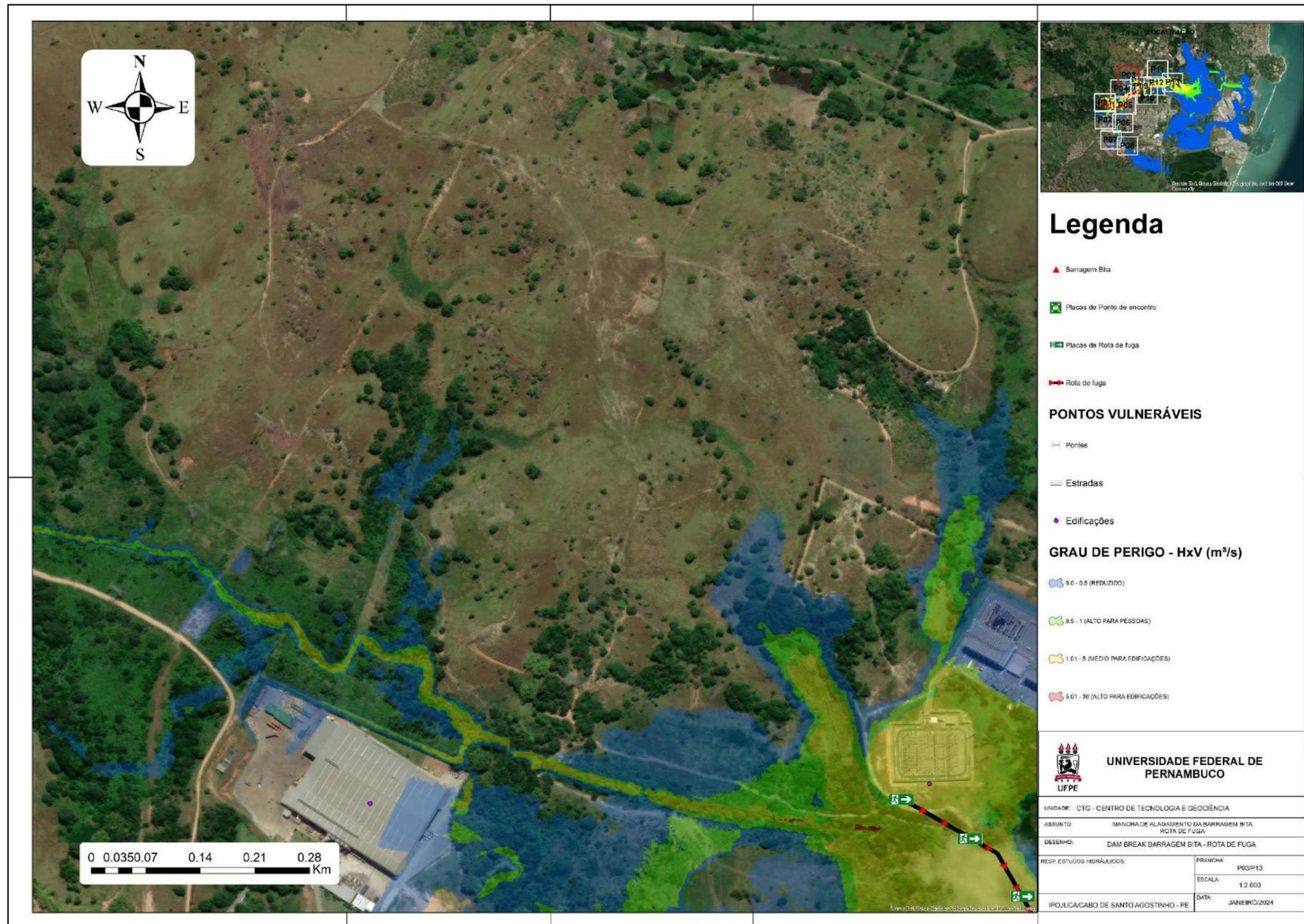
Fonte: Autor.

Figura 68 - Mapa de rota de fuga - P02



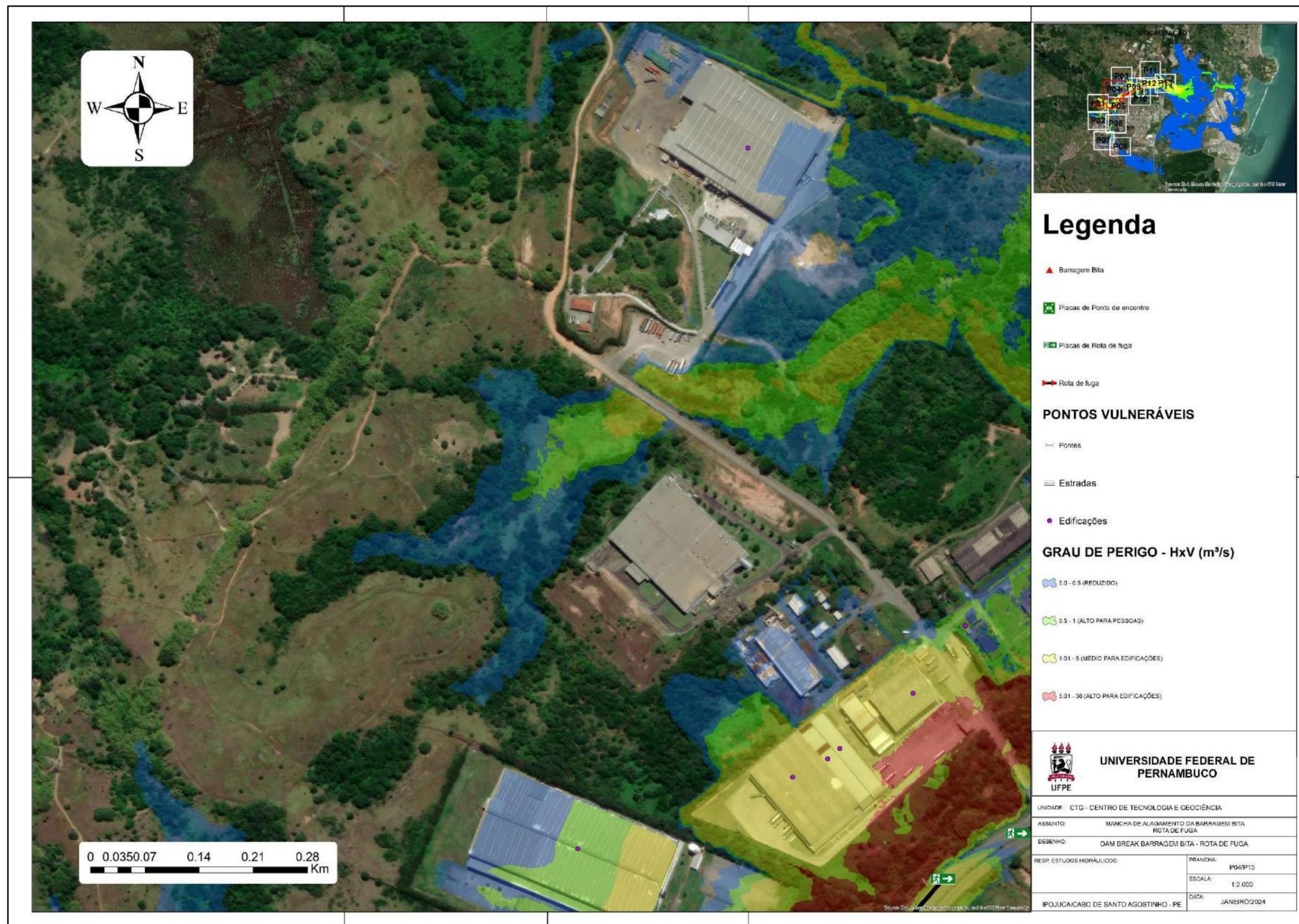
Fonte: Autor.

Figura 69 - Mapa de rota de fuga - P03



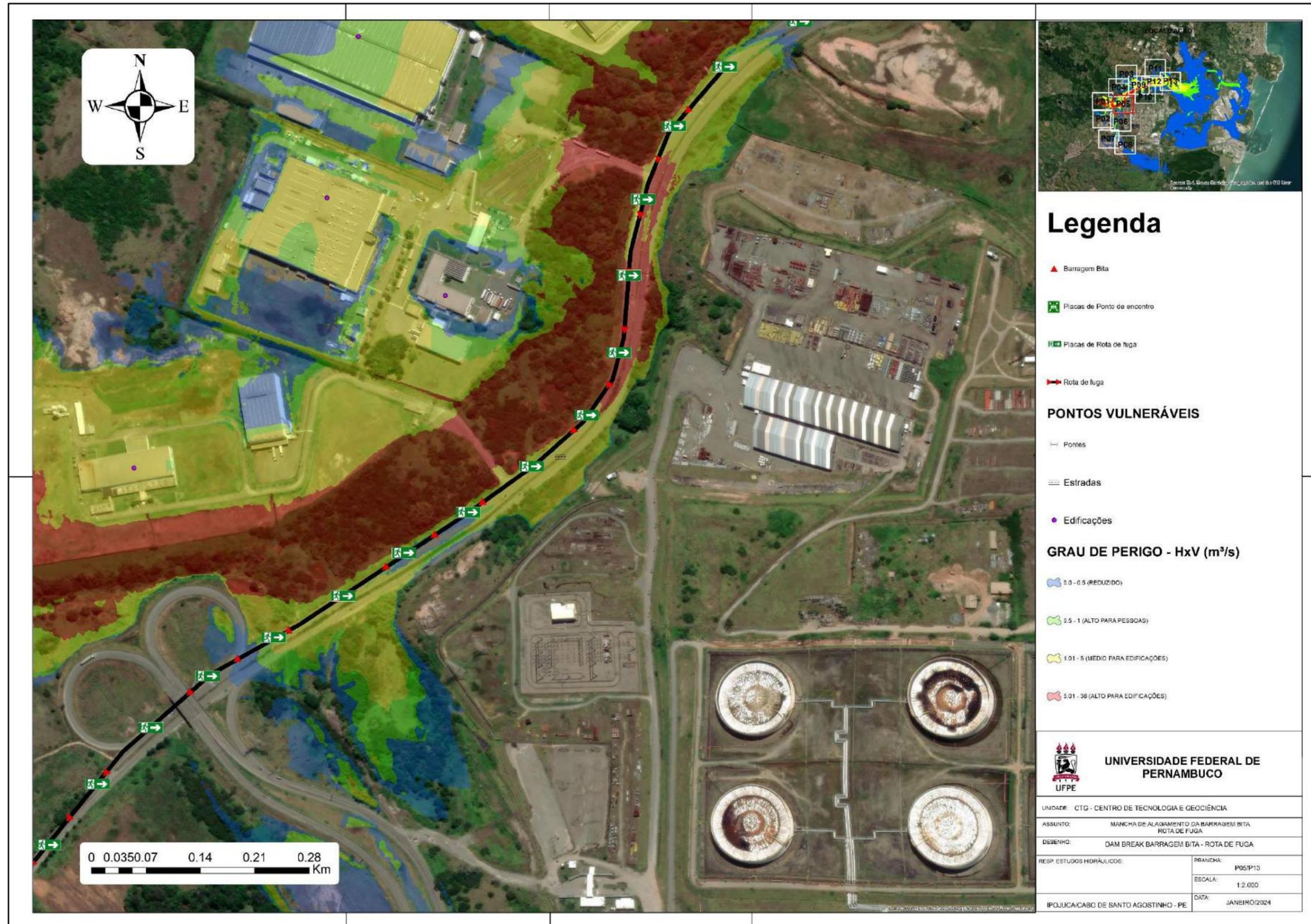
Fonte: Autor

Figura 70 - Mapa de rota de fuga - P04



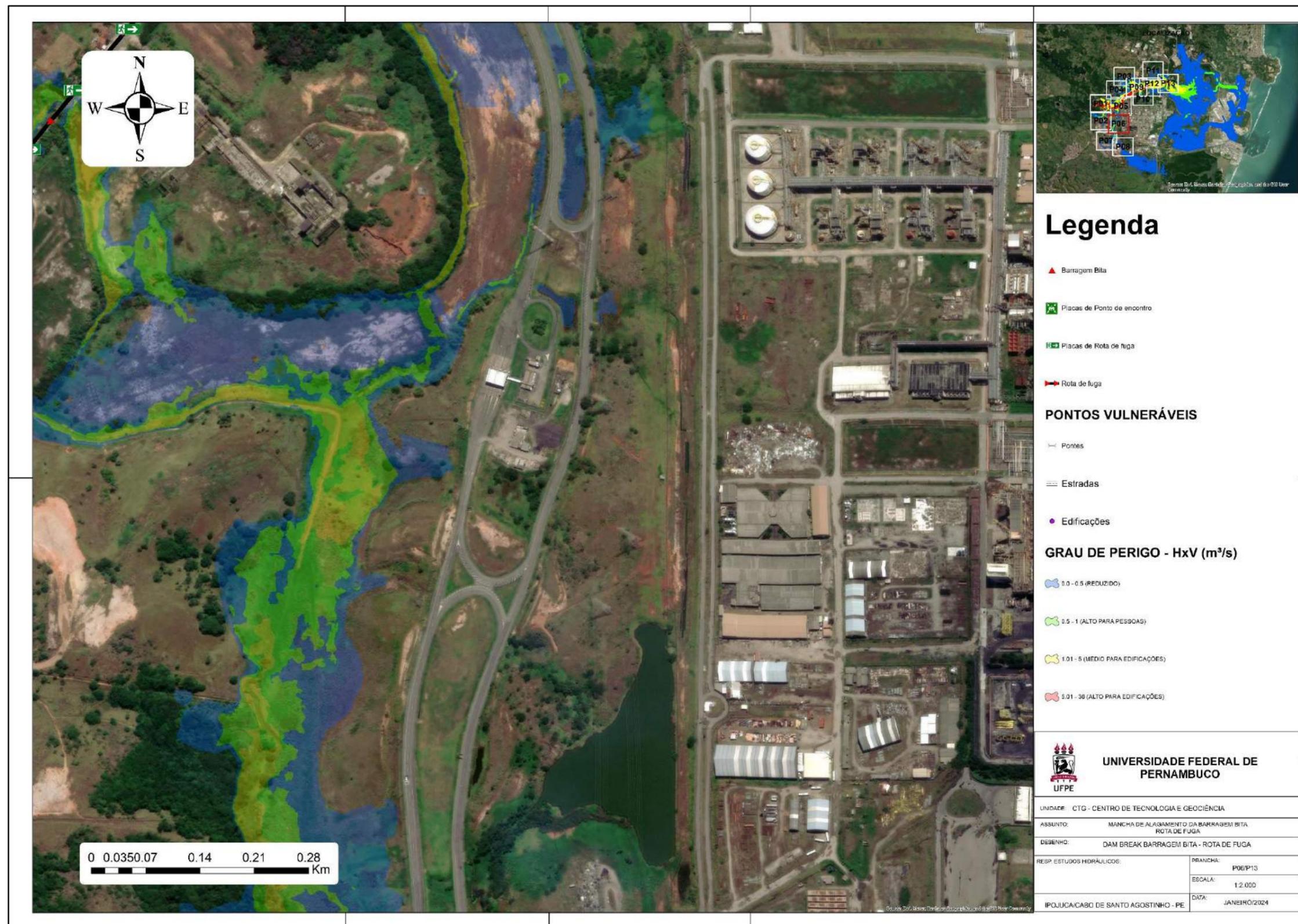
Fonte: Autor.

Figura 71 - Mapa de rota de fuga - P05



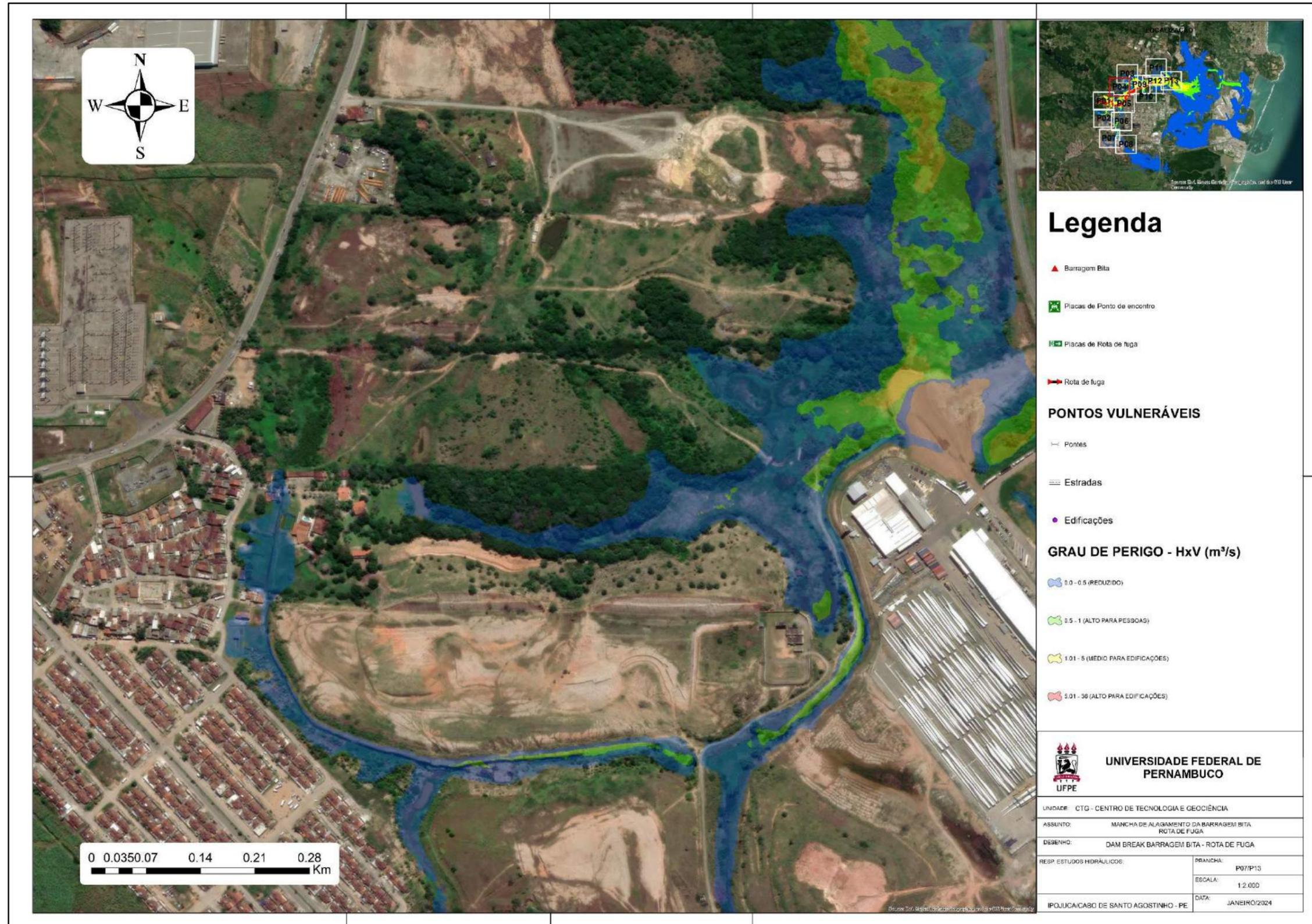
Fonte: Autor.

Figura 72 - Mapa de rota de fuga - P06



Fonte: Autor.

Figura 73 - Mapa de rota de fuga - P07



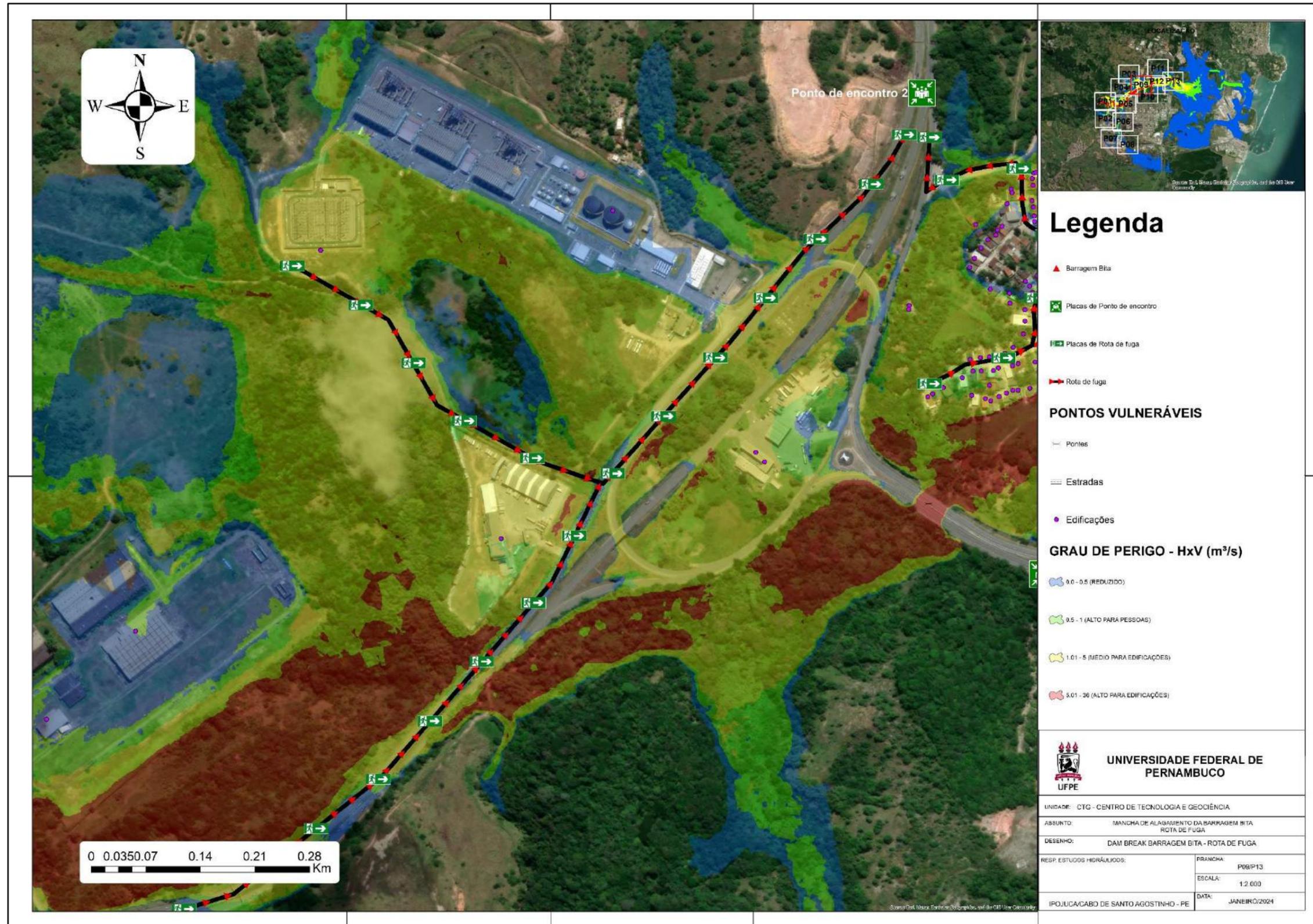
Fonte: Autor.

Figura 74 - Mapa de rota de fuga - P08



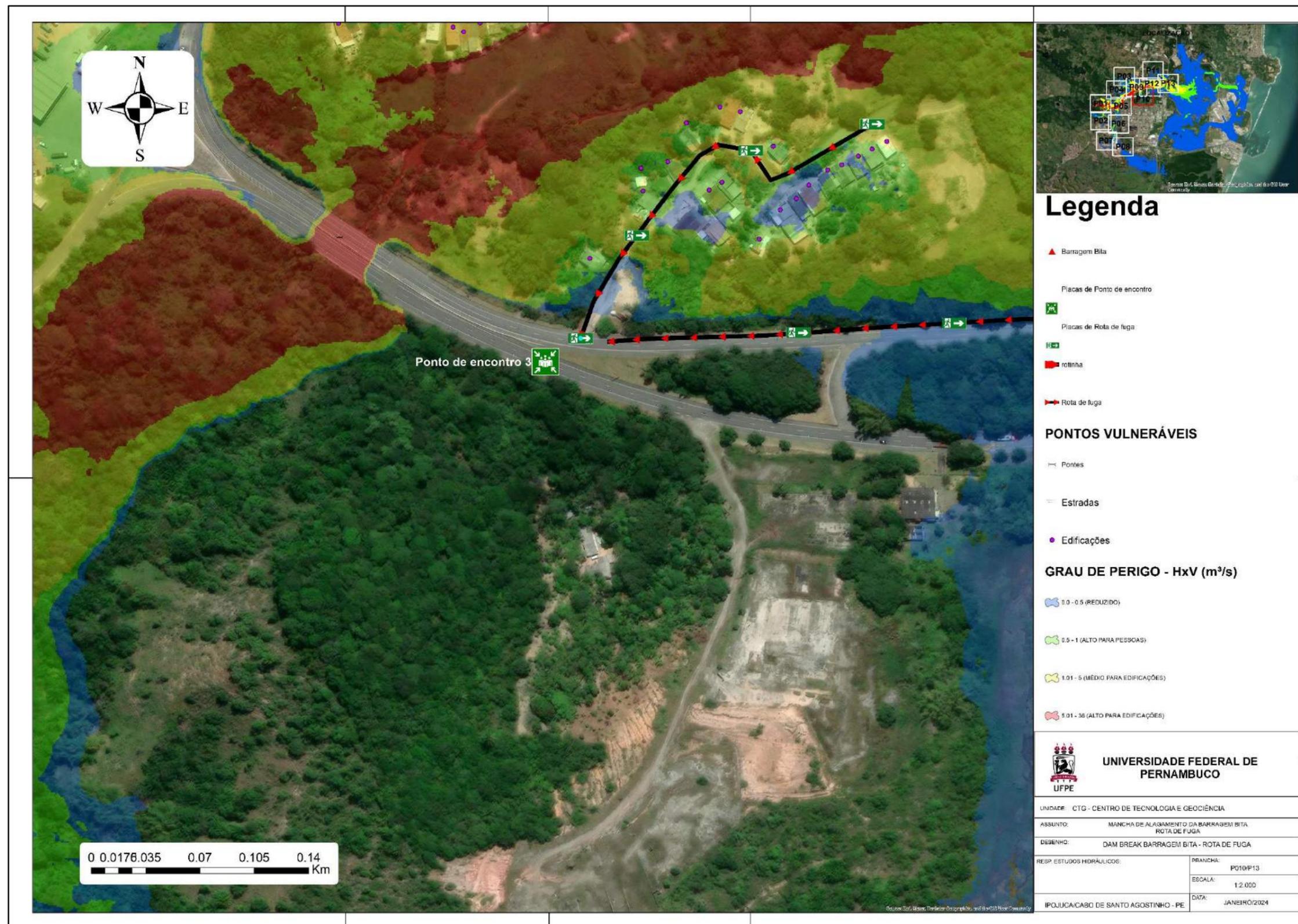
Fonte: Autor.

Figura 75 - Mapa de rota de fuga - P09



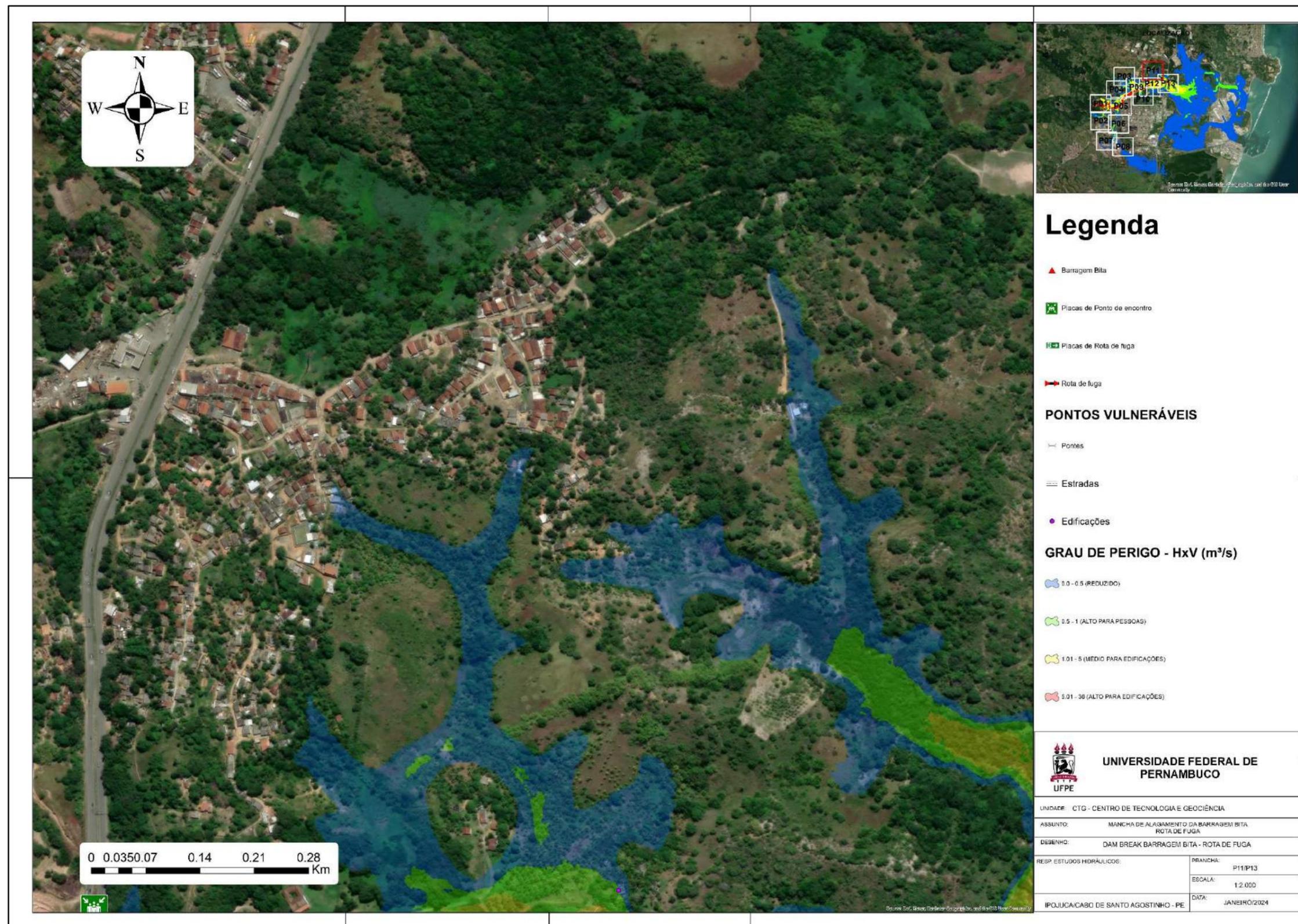
Fonte: Autor.

Figura 76 - Mapa de rota de fuga - P10



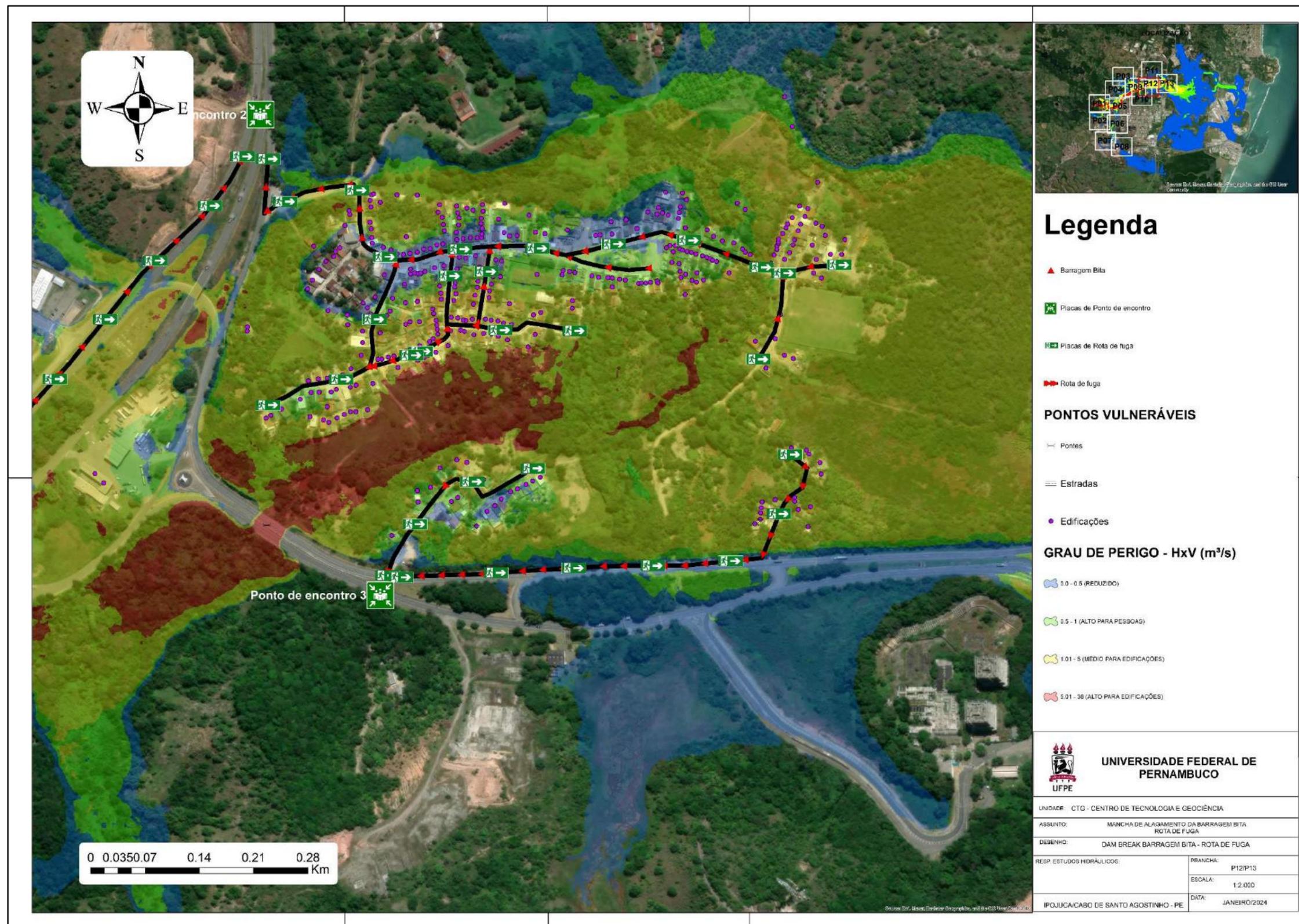
Fonte: Autor.

Figura 77 - Mapa de rota de fuga - P11



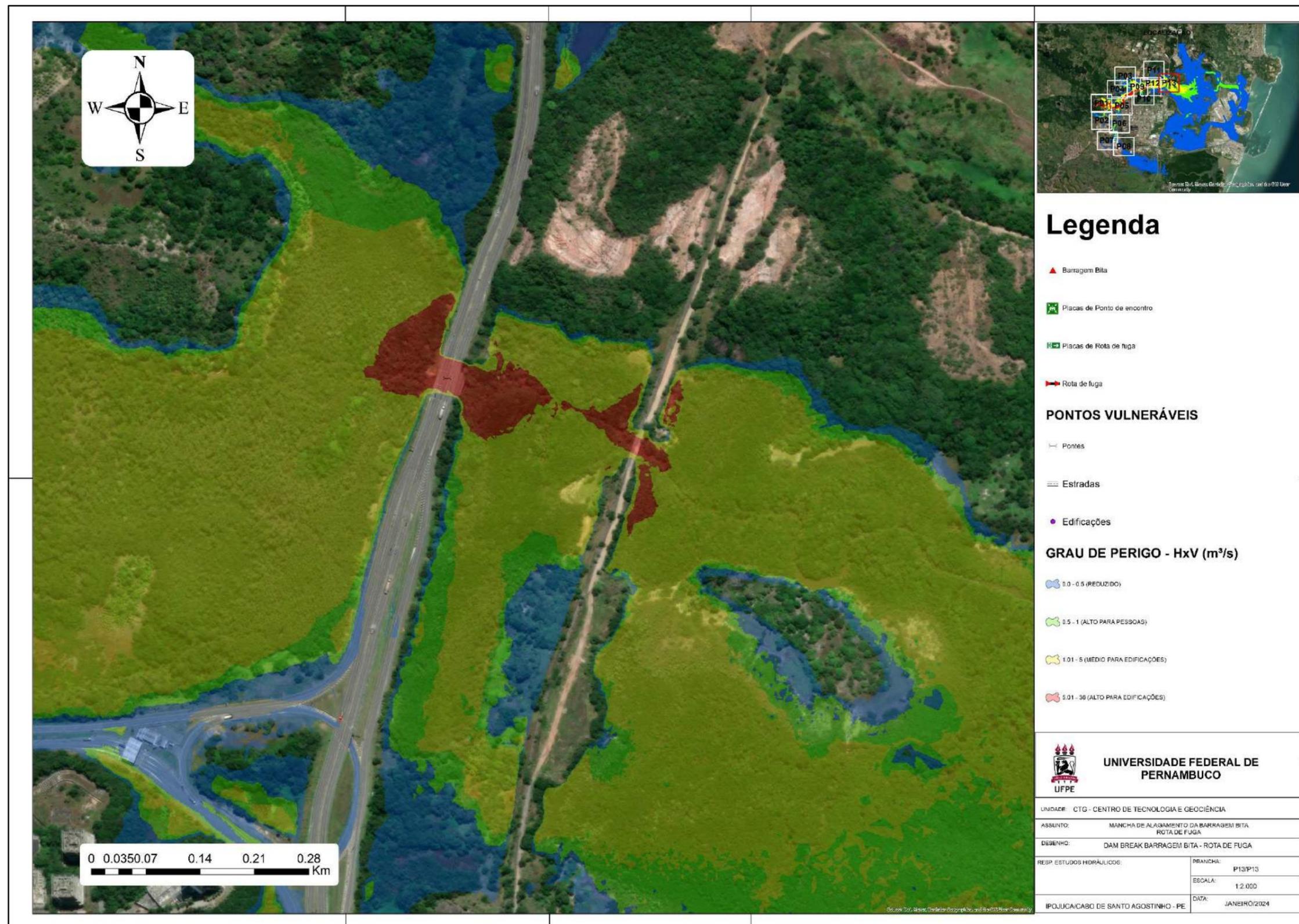
Fonte: Autor

Figura 78 - Mapa de rota de fuga - P12



Fonte: Autor

Figura 79 - Mapa de rota de fuga - P13



Fonte: Autor