



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOLOGIA

LUÍZA LARA COIADO

**ZONEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A DESLIZAMENTOS:
CENTRO URBANO DE PARAUAPEBAS, PARÁ**

BELÉM, PARÁ

2022

LUÍZA LARA COIADO

**ZONEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A DESLIZAMENTOS:
CENTRO URBANO DE PARAUAPEBAS, PARÁ**

Trabalho de Conclusão do Curso, apresentado à Faculdade de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, para obtenção do Grau de Bacharel em Geologia.

Orientadora: Profa. Dr^a. Aline Maria Meiguins de Lima

BELÉM, PARÁ

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C652z Coiado, Luíza Lara.
Zoneamento de áreas suscetíveis a deslizamentos: centro urbano de Parauapebas, Pará / Luíza Lara Coiado. — 2022.
39 f. : il. color.

Orientador(a): Prof^a. Dra. Aline Maria Meiguins de Lima
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geologia, Belém, 2022.

1. Movimentos de Massa. 2. Zoneamento. 3. Suscetibilidade. 4. Lógica Fuzzy. 5. Processo Analítico Hierárquico. I. Título.

CDD 624.151

LUÍZA LARA COIADO

**ZONEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A DESLIZAMENTOS:
CENTRO URBANO DE PARAUAPEBAS, PARÁ**

Trabalho de Conclusão do Curso, apresentado à Faculdade de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, para obtenção do Grau de Bacharel em Geologia.

Data da defesa: 20 / 06 / 2022.

Banca Examinadora:



Prof.^a Aline Maria Meiguins Lima – Orientador
Dr.^a Desenvolvimento Socioambiental
Universidade Federal do Pará



Prof. Arnaldo de Queiroz da Silva – Membro Interno
Dr. em Sensoriamento Remoto
Universidade Federal do Pará



Prof. Carlos Rangel Cruz – Membro Externo
MsC. em Hidrogeologia
Imerys Rio Capim Caulim S/A

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por ter me dado força para concluir mais essa etapa em minha vida.

À minha família, pelo carinho, estímulo, compreensão e apoio em todos os momentos, sem vocês eu nada seria. Ao meu Pai, por ser meu maior exemplo. A minha madrasta, Fernanda, e aos meus irmãos, Re, Fe, Vitor e Duda, por compartilharem a vida comigo, especialmente à minha irmã Renata, que sempre me acolheu. À Nil, por seu amor sempre presente. À minha mãe, por estar eternizada em mim.

À minha orientadora Dr^a Aline Maria Meiguins de Lima, pelo desenvolvimento deste trabalho. À Universidade Federal do Pará, ao Instituto de Geociências e aos Professores e Técnicos da instituição pela transmissão de suas experiências e conhecimento que foram de suma importância.

À Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais e aos profissionais do polo Belém, por me receberem e auxiliarem na execução deste trabalho. Em especial ao Almir, Dianne, Sheila, Íris, Luciana, Paulo e Homero pelo companheirismo e experiência transmitida ao longo de toda a fase de estágio realizado na instituição.

À Defesa Civil do município de Parauapebas, por todo suporte para a realização deste trabalho.

Ao meu namorado, Bruno, por todo amor, carinho e incentivo.

Aos meus amigos, Manu, Alethea, Maria, Luísa, Gabi, Karol, Giovanna, Parisi e Aléxis, por terem feito parte da minha vida desde a minha infância, pelo companheirismo e amizade compartilhados todo esse tempo.

A todos aqueles que, embora não nomeados, presentearam-me com seus inestimáveis apoios em distintos momentos, o meu reconhecido e carinhoso muito obrigada.

“Ciência e vida cotidiana não podem e não devem ser separadas.”

Rosalind Franklin

RESUMO

A ação dos fatores do meio físico associada ao crescimento acelerado de cidades sem planejamento urbano estratégico tem apresentado problemas na prevenção de desastres resultantes de movimentos de massas e inundações. É o caso do município de Parauapebas, no estado do Pará, que em função de características naturais e de ocupação do solo urbano, tem se demonstrado vulnerável a este fenômeno. Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a suscetibilidade a movimentos de massa no município de Parauapebas, PA, em ambiente SIG (Sistemas de Informação Geográfica) utilizando a Lógica *Fuzzy* e o Processo Analítico Hierárquico – AHP. Para isso, foram levados em consideração os vetores de declividade, geomorfologia, litologia, pedologia, setorização de risco, pontos de deslizamento e cortes em talude. A cada uma dessas características foi atribuído um peso e por meio da álgebra de mapas, associada à lógica *fuzzy*, foi possível determinar espacialmente a suscetibilidade de movimento de massa para a região. Como resultado, foi gerado o mapa de Suscetibilidade a Movimentos de Massa para o centro urbano do município de Parauapebas pela inferência *fuzzy gamma*. Este método apresentou resultado satisfatório como uma ferramenta acessível para o planejamento urbano e gestão dos deslizamentos, com o objetivo de evitar a perda de vidas e de materiais.

Palavras-chave: Movimentos de Massa. Planejamento urbano. Lógica *Fuzzy*. Processo Analítico Hierárquico.

ABSTRACT

The action of environment factors associated with the accelerated growth of cities without strategic urban planning has presented problems in the prevention of disasters resulting from mass movements and floods. This is the case of the municipality of Parauapebas, in the state of Pará, which, due to natural characteristics and the occupation of urban land, has shown itself to be vulnerable to this phenomenon. In this sense, the present work aimed to evaluate the susceptibility to mass movements in the city of Parauapebas, PA, in a GIS environment (Geographic Information Systems) using Fuzzy Logic and the Analytical Hierarchical Process - AHP. For this, slope vectors, geomorphology, lithology, pedology, risk sectorization, slip points and slope cuts were taken into account. A weight was assigned to each of these characteristics and through map algebra, associated with fuzzy logic, it was possible to spatially determine the susceptibility of mass movement for the region. As a result, the Susceptibility to Mass Movement map was generated for the urban center of the municipality of Parauapebas by the fuzzy gamma inference. This method presented satisfactory results as an accessible tool for urban planning and landslide management, in order to avoid loss of life and materials.

Keywords: Mass Movements. Urban planning. Fuzzy logic. Hierarchical Analytical Process.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Mapa do Estado do Pará com as principais tipologias de risco geológico, enfoque para o município de Parauapebas. Fonte: Adaptado de Teixeira, Bandeira e Fonseca (2019).	3
Figura 2: Escorregamento planar. Fonte: Modificado de Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998).	8
Figura 3: Escorregamento circular. Fonte: Modificado de Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998).	8
Figura 4: Escorregamento circular. Fonte: Modificado de Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998).	9
Figura 5: Comparativo entre a Lógica Clássica e a Lógica Fuzzy. Fonte: Adaptado de Kohagura (2007).	11
Figura 6: Sistema Lógico Fuzzy. Fonte: adaptado de Cox (1995) por Silva Junior (2015).	11
Figura 7: Mapa de Localização da Área no município de Parauapebas, PA, Brasil. Fonte: Autora	14
Figura 8: Paisagem urbana de Parauapebas. Relevo acidentado com morros baixos a altos. Fonte: Autora.	15
Figura 9: A) Perfil de Solo Podzólico Vermelho Amarelo com destaque para local de amostragem. B) Amostra de Solo Podzólico Vermelho Amarelo com textura predominantemente argilosa. Fonte: Autora.	16
Figura 10: Evolução da mancha Urbana de Parauapebas nos anos 1985, 2005 e 2018. Fonte: Adaptado de MapBiomias (2021).	17
Figura 11: Fluxograma da metodologia utilizada na elaboração do trabalho. Fonte: Autora	19
Figura 12: Mapas Temáticos para Declividade, Geomorfologia, Pedologia, Geologia, Setores de Risco, Pontos de Deslizamento e Corte em Talude. Fonte: Autora.	22
Figura 13: Representação gráfica dos três estágios utilizando-se o método AHP. Fonte: Silva e Nunes (2009).	23
Figura 14: Conjunto fuzzy (A). O parâmetro a determina a forma da função e c , o valor de z no ponto central de (A). Os valores definidos em d_1 e d_2 determinam a largura da região de transição a partir de um limiar de precisão de medida do objeto. (a) e (b) representam uma interpretação linear do sistema (conjunto booleano). (c) e (d) compõe uma interpretação a partir da fronteira entre um conjunto. Fonte: Câmara <i>et al.</i> (2004, pág. 7).	25
Figura 15: Mapa de Suscetibilidade a Movimentos de Massa para o centro urbano do Município de Parauapebas.	29
Figura 16: Médias mensais de pluviosidade no Município de Parauapebas no ano de 2020. Fonte: ANA/SNIRH.	30
Figura 17: Área urbanizada de Parauapebas: (a) Períodos de ocupação; (b) Tipologia de ocupação. Fonte: Melo e Cardoso (2014, pág. 8).	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação dos desastres em relação à intensidade.	5
Tabela 2: Características dos principais tipos de movimentos de massa em encostas no Brasil.....	7
Tabela 3: Definição e explicação dos 9 pesos fundamentais de julgamento comparativo.....	13
Tabela 4: Classificação quanto ao potencial.	20
Tabela 5: Potencial das variáveis do tema Declividade.	21
Tabela 6: Potencial das variáveis do tema Geologia.	21
Tabela 7: Potencial das variáveis do tema Setores de Risco.	21
Tabela 8: Potencial das variáveis do tema Pedologia.....	21
Tabela 9: Potencial das variáveis do tema Corte de Talude.....	21
Tabela 10: Potencial das variáveis do tema Deslizamento.....	21
Tabela 11: Potencial das variáveis do tema Geomorfologia.	21
Tabela 12: Matriz de comparação entre temas.	23
Tabela 13: Valor do Peso Processado de cada fator.....	24
Tabela 14: Valores de IR para matrizes quadradas de ordem.....	25

LISTA DE ABREVIACOES

AHP - *Analytical Hierarchy Process*

APA - rea de Proteao Ambiental do Igarapé Gelado

BHRP - Bacia Hidrográfica do Rio Parauapebas

COMDEC - Defesa Civil do Município de Parauapebas

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

CKS/SBCJ - Aeroporto de Carajás

FLONA - Floresta Nacional de Carajás

GPS - Aparelho de posicionamento global

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IC - ndice de Consistência

IR - ndice Randômico

ISMM - ndice de suscetibilidade a movimentos de massa

MDP - modelo digital de terreno

PARATUR - Companhia Paraense de Turismo

REBIO - Reserva Biológica do Tapirapé

RC - Razão de Consistência

SIG - Sistemas de Informaao Geográfica

[A_w] - Matriz resultante do produto de comparaao

λ max - Valor máximo do autovalor

w_i - Peso Processado

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	v
EPIGRAFE	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	ix
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE ABREVIACÕES	xi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA.....	2
1.2 OBJETIVOS.....	4
1.2.1 Objetivo Geral.....	4
1.2.2 Objetivos específicos.....	4
2 REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1 DESASTRES NATURAIS.....	4
2.2 PROCESSOS GEOLÓGICOS DESENCADEADORES DE DESASTRES NATURAIS: MOVIMENTOS DE MASSA.....	6
2.3 RISCO GEOLÓGICO, PERIGO E VULNERABILIDADE.....	9
2.4 ZONEAMENTO E SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTO DE MASSA.....	10
2.5 TEORIA FUZZY.....	10
2.6 PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO – AHP.....	12
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	14
3.1 LOCALIZAÇÃO E ACESSO.....	14
3.2 ASPECTOS FÍSICOS NATURAIS.....	15
3.2.1 Clima.....	15
3.2.2 Hidrografia.....	15
3.2.3 Relevo.....	15
3.2.4 Solo.....	16
3.2.5 Vegetação.....	16
3.2.6 Geologia.....	17
4 MATERIAIS E MÉTODOS	18
4.1 MÉTODOS.....	18
4.1.1 Pré-processamento.....	20
4.1.2 O processo analítico hierárquico - AHP.....	23
4.1.3 Elaboração do Mapa de Suscetibilidade a Movimentos de Massa.....	25
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
6 CONCLUSÃO	33

REFERÊNCIAS	34
APÊNDICE A - Tabela de Bairros do Município de Parauapebas	37
APÊNDICE B - Tabela de Localização dos Pontos de Deslizamento	38
APÊNDICE C - Matriz de cálculo de razão de coerência AHP.....	39

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, observou-se um intenso processo de urbanização da população nas últimas décadas, no qual 84% da população brasileira vivem em áreas urbanas (IBGE 2010), nas quais essas áreas ocupadas, muitas vezes, não apresentam condições de infraestrutura mínima para sustentar a população, causando problemas sociais e ambientais. Essa concentração desordenada da população nos grandes centros urbanos, sem os devidos cuidados técnicos e observância da legislação vigente, tem levado principalmente a população mais vulnerável a ocupar áreas naturalmente inadequadas ou suscetíveis a desastres naturais (Pfaltzgraff 2007).

Com o processo de antropização do espaço geográfico, os recursos naturais são utilizados de forma intensa, gerando desequilíbrios que comprometem o ecossistema. A forma de ocupação, muitas vezes, não leva em consideração características naturais como a declividade do terreno, os tipos de solo, a geologia e geomorfologia. Inicialmente, a ocupação se dá em áreas mais baixas, próximas ao leito dos rios, no entanto, em função do intenso crescimento das cidades, foram subindo as encostas (Santos 2005).

Avaliando a realidade das encostas em zonas urbanas, assim como a circunstância das habitações nessas localidades, percebe-se que as pessoas que ocupam essas áreas convivem em constante ameaça de riscos de movimentos de massa. A permanente ameaça vivida pelas pessoas que habitam as regiões de encostas é justificada pelos periódicos deslizamentos que costumam acontecer, principalmente, no período das chuvas.

É o que acontece na cidade de Parauapebas. Devido ao crescimento acelerado da cidade aliado à ocupação desordenada de encostas, bem como a ocupação das planícies de inundação dos principais cursos d'água. Tais fatores têm provocado a formação de áreas de risco geológico de deslizamento e inundações no município.

Anualmente, registram-se movimentos de massa e inundações provocados por fortes chuvas na cidade. Em janeiro de 2022, a Defesa Civil emitiu Alerta Laranja para a cheia do Rio Parauapebas, a fim de alertar a população, indicando a importância de ter atenção especial nessa época do ano, em que o índice pluviométrico aumenta na região e influencia na cheia dos rios (O Liberal 2022).

Com a finalidade de mitigar os riscos associado a movimentos de massa e inundações, assim como planejar o uso e ocupação do solo, além de identificar áreas suscetíveis a ocorrências desses fenômenos, técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto são empregadas para ponderar dados espaciais e proporcionar o entendimento e

identificação dessas áreas, possibilitando avaliar se uma área oferece algum grau de risco ou não.

O geoprocessamento, a partir da aplicação de diferentes modelos de inferência geográfica em ambiente SIG, tem resultados significativos no campo da administração municipal, no setor de transportes, planejamento urbano e regional, além de estudos ambientais, compõe ferramenta importante e eficaz para a elaboração de mapas de risco e suscetibilidade aos movimentos de massa. Igualmente, a interpolação de informações otimiza uma análise mais particularizada para cada região.

Por se tratar de um processo de modelagem ambiental no qual é naturalmente complexo e de múltiplos critérios a lógica de decisão *fuzzy* é a mais adequada para a análise desses critérios, pois diferentemente da lógica booleana que se baseia em duas possibilidades de classificação: pertencer ou não pertencer; a lógica *fuzzy*, é um método de classificação contínuo, no qual cada valor de uma variável ambiental tem maior afinidade a pertencer a uma classe A e menor afinidade a pertencer a uma classe B ou C do mesmo mapa, onde os limites espaciais são representados por zonas transicionais, e não por linhas demarcatórias rígidas (Ferreira 2014).

Nesse sentido, o presente trabalho consistiu em avaliar a suscetibilidade aos movimentos de massa no centro urbano de Parauapebas, PA, em ambiente SIG, a partir da aplicação de diferentes modelos de inferência geográfica utilizando a lógica *fuzzy* e o processo analítico hierárquico, que pondera quantitativamente variáveis mediante a interação do pesquisador com o modelo matemático. Como resultado, além da apresentação de dados vetoriais e matriciais, criou-se o mapa para suscetibilidade a movimentos de massa no centro urbano do município de Parauapebas.

1.1 JUSTIFICATIVA

Os desastres naturais têm um impacto significativo na sociedade brasileira. Anualmente, inúmeros desastres naturais ocorrem em todo o país, seja pelas fortes chuvas que desencadeiam movimento de massas, queda de blocos rochosos, além de inundações e enchentes, que oferecem risco à população. Segundo o Ministério de Integração Nacional, em 2012, foram relatados a ocorrência de 376 desastres naturais, nos quais causaram 93 óbitos e afetaram cerca de 16.977.614 pessoas. Desse total, 26 óbitos foram causados por movimentos de massa onde mais de 123 mil pessoas foram afetadas. Dos desastres que causaram mortes à

população brasileira os movimentos de massa corresponderam por cerca de 30% dos óbitos (Brasil 2012).

Nesse sentido, a fim de implementar políticas integradas e inclusivas para a redução dos desastres naturais estabeleceu-se, no Brasil, conforme o inciso IV do artigo 6º da lei número 12.608/12 que “*compete à União apoiar os Estados, o Distrito Federal e os Municípios no mapeamento das áreas de risco*” (Brasil 2012). Dessa forma, o Serviço Geológico do Brasil – CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais), empresa do governo federal ligada ao Ministério de Minas e Energia, realiza desde novembro de 2011, o mapeamento, descrição e classificação de áreas de risco geológico alto e muito alto em municípios de todas as unidades da federação selecionados pelas Defesas Civas Nacional e Estadual.

No Estado do Pará, o Serviço Geológico do Brasil mapeou 73 municípios, dos quais foram setorizadas 433 áreas de risco alto e muito alto, nas quais vivem mais de 114 mil pessoas. As tipologias de risco mais encontradas são: inundações, movimento de massas, erosão fluvial, erosão pluvial, erosão costeira, colapso de terra e enxurrada (Fig.1) (Teixeira. 2019).

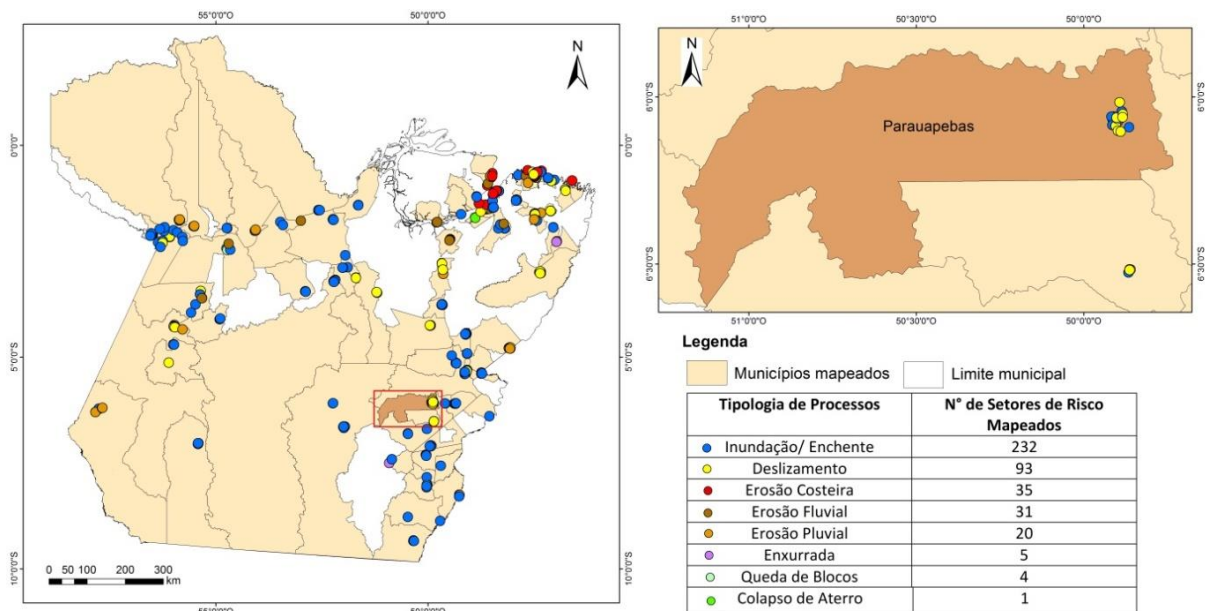


Figura 1: Mapa do Estado do Pará com as principais tipologias de risco geológico, enfoque para o município de Parauapebas. Fonte: Adaptado de Teixeira, Bandeira e Fonseca (2019).

O município de Parauapebas é constantemente atingido por desastres naturais associados aos movimentos gravitacionais de massa e inundações. Estes ocorrem devido tanto às características geológicas e geomorfológicas da área, como pelas formas de uso e ocupação da terra, associados a eventos de alta pluviosidade. Devido a isso, é imprescindível a realização de estudos prévios em escala de detalhe, a fim de identificar com maior precisão as áreas com maior suscetibilidade a movimentos de massa e contribuir para a redução de desastres naturais associados a esse tipo de evento no município.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a suscetibilidade aos movimentos de massa no centro urbano do município de Parauapebas, PA, a partir da aplicação de diferentes modelos de inferência geográfica em ambiente SIG (Sistemas de Informação Geográfica) com a geração do Mapa de Suscetibilidade a Movimentos de Massa para o centro urbano de Parauapebas.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa foram: Elaborar mapa temático a partir de modelos de inferência geográfica e; Identificar se o modelo metodológico projetou-se como adequado para a análise de suscetibilidade da região.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 DESASTRES NATURAIS

Os desastres naturais são cada vez mais recorrentes e um dos grandes responsáveis por milhares de mortes em todo o mundo. Para United National – *International Strategy for Disaster Redution* (Tominaga 2015, p.13) considera-se *desastre* uma grave perturbação do funcionamento de uma comunidade ou sociedade envolvendo perdas humanas, ambientais e econômicas de grande extensão. A autora entende, em seu trabalho, a definição de desastres naturais como:

[...] resultado do impacto de fenômenos naturais extremos ou intensos sobre um sistema social, causando sérios danos e prejuízos que excede a capacidade da comunidade ou da sociedade atingida em conviver com o impacto (Tominaga 2015, p. 14).

Os desastres podem ser classificados quanto à sua origem e à intensidade (Alcântara-Ayala 2002; Marcelino 2008). Quanto à origem estes podem ser naturais ou antropogênicos. Os desastres naturais são aqueles causados por fenômenos e desequilíbrio da natureza que ocorrem independente da ação humana e os desastres antropogênicos são relacionados com a atividade do homem como agente ou autor. Exemplo: incêndios urbanos, contaminação de rios, rompimento de barragens entre outros (Alcântara-Ayala 2002; Kobiyama *et al.* 2006; Marcelino 2008).

A classificação quanto à intensidade é importante para facilitar o planejamento e recuperação da área atingida, pois os recursos necessários para socorro às vítimas dependem da intensidade dos danos e prejuízos provocados, sendo classificados em até quatro níveis de intensidade (Tabela 1).

Tabela 1: Classificação dos desastres em relação à intensidade.

NÍVEL	INTENSIDADE	SITUAÇÃO
I	Desastres de pequeno porte, também chamados de acidentes, onde os impactos são pouco importantes e os prejuízos pouco vultuosos (Prejuízo < 5% PIB municipal).	Facilmente superável com os recursos do município.
II	De média intensidade, onde os impactos causados são de alguma importância e os prejuízos são significativos, embora não sejam vultuosos (Prejuízos entre 5-10% PIB municipal).	Superável pelo município, desde que envolva uma mobilização e administração especial.
III	De grande intensidade com danos importantes e prejuízos vultuosos. (Prejuízos entre 10-30% PIB municipal).	A situação de normalidade pode ser restabelecida com recursos locais, desde que complementados com recursos estaduais e federais. (Situação de Emergência – SE)
IV	De muito grande intensidade, com impactos muito significativos e prejuízos muito vultuosos. (Prejuízos maiores que 30% PIB municipal).	Não é superável pelo município, sem que receba ajuda externa. Eventualmente necessita ajuda internacional. (Estado de Calamidade Pública – ECP).

Fonte: Tominaga (2015), modificado de Kobiyama *et al.* (2006).

Com o aumento populacional e conseqüente ocupação humana em áreas inadequadas e/ou com potencial para a ocorrência de fenômenos geológicos esses desastres têm se expandido ao longo dos anos de forma expressiva e preocupante. Segundo *Emergency Disasters Data Base* (EM-DAT) constata-se uma tendência global para o significativo aumento do número de desastres a partir da década de 70 que passou de 50 registros por ano para 350 em 2008 tendo chegado em 500 em 2005.

No Brasil, os fenômenos que mais ocorrem relacionadas aos desastres naturais são derivados da dinâmica externa da Terra, tais como inundações, enchentes, deslizamentos, escorregamentos de solo, queda de blocos, erosão, assoreamento e subsidência/colapsos. Geralmente, esses fenômenos ocorrem associados a fortes chuvas, que correspondem ao verão no Sul e Sudeste e ao inverno na região Norte e Nordeste. Contudo, a ocupação de encostas sem nenhum planejamento ou critério técnico, bem como a ocupação das planícies de inundação dos principais cursos d'água aumentam de forma significativa à suscetibilidade de desastres relacionados a movimentos de massa e inundação.

2.2 PROCESSOS GEOLÓGICOS DESENCADEADORES DE DESASTRES NATURAIS: MOVIMENTOS DE MASSA

Os processos da dinâmica superficial da Terra são resultado de diversos fatores físicos, químicos, biológicos e fatores antrópicos (socioeconômicos, culturais e/ou tecnológicos). Essa dinâmica superficial é responsável pela modelagem da superfície da Terra. O conceito de movimento gravitacional de massa, ou mais comumente chamado, deslizamento de terra, não é definido de uma única maneira. Contudo, por entender que não cabe à proposta do presente texto discutir tal conceituação, adotou-se, para os fins da pesquisa o enfoque geomorfológico, no qual, as paisagens constituem-se, entre outros aspectos, por vertentes ou encostas com declividade e formas variáveis e os movimentos de massa consistem em um importante processo natural que atua na dinâmica dessas vertentes. Tominaga (2015) define movimento de massa como:

[...] movimento do solo, rocha e/ou vegetação ao longo da vertente sob a ação direta da gravidade. A contribuição de outro meio, como água ou gelo se dá pela redução da resistência dos materiais de vertente e/ou pela indução do comportamento plástico e fluidos do solo (Tominaga 2015, p. 27).

Diferentes tipos de deslizamentos são identificados em função de sua geometria e da natureza do material que instabilizam. Quanto à mecânica do deslocamento da massa, o

movimento pode ser de rastejo, escorregamento, queda e corrida (Tabela 2). Já quanto ao tipo de material, podem ser compostos por rochas, solo ou ambos, em movimento deflagrado pelo aumento da necessidade de mobilização de material e pela redução da resistência do material em uma superfície, que caso plana, descreverá um deslizamento translacional, caso curva, deslizamento rotacional e ainda deslizamento em cunha onde há dois planos de fraqueza. A água é um dos principais elementos regulador do processo, atuando inclusive na estabilização do talude (Faria e Fornasari Filho, 2018).

Tabela 2: Características dos principais tipos de movimentos de massa em encostas no Brasil.

PROCESSOS	CARACTERÍSTICAS DO MOVIMENTO, MATERIAL E GEOMETRIA
Rastejo (<i>creep</i>)	<ul style="list-style-type: none"> - Vários planos de deslocamento (internos) - Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes profundidades - Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes - Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada - Geometria indefinida
Escorregamentos (<i>slides</i>)	<ul style="list-style-type: none"> - Poucos planos de deslocamento (externos) - Velocidades médias (m/h) a altas (m/s) - Pequenos a grandes volumes de material - Geometria e materiais variáveis - Planares: solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza - Circulares: solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas - Em cunha: solos e rochas com dois planos de fraqueza
Quedas (<i>falls</i>)	<ul style="list-style-type: none"> - Sem planos de deslocamento - Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado - Velocidades muito altas (vários m/s) - Material rochoso - Pequenos a médios volumes - Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc - Rolamento de matacão - Tombamento
Corridas (<i>flows</i>)	<ul style="list-style-type: none"> - Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massas em movimentação) - Movimento semelhante ao de um líquido viscoso - Desenvolvimento ao longo de drenagens - Velocidades médias a altas - Mobilização de solo, rocha, detritos e água - Grandes volumes de material - Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas

Fonte: Tominaga (2015).

A identificação do tipo de deslizamento permite estimar a velocidade potencial do movimento, o volume e a distância de deslocamento, informações necessárias à adoção das medidas mitigadoras necessárias (Highland e Bobrowsky, 2008):

- Planar ou Translacionais: ocorrem em áreas de alta declividade e formam superfície de ruptura planar associadas a solos superficiais geralmente até o contato com a rocha subjacente, alterada ou não. Também podem mobilizar saprólitos e rochas quando relacionados a feições geológicas diversas, xistosidade, falhas, fraturas e etc (Fig. 2).

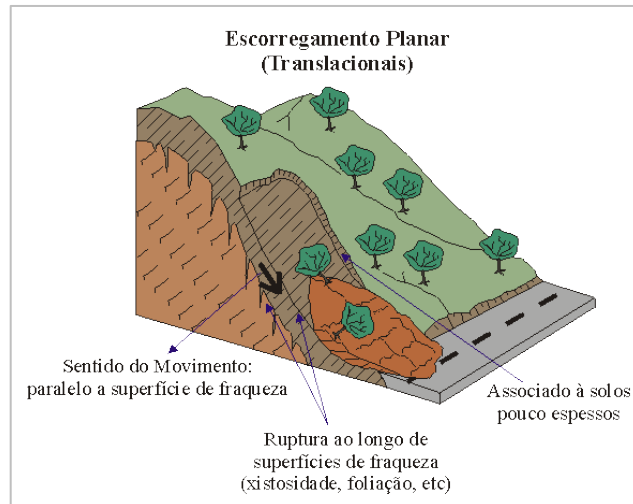


Figura 2: Escorregamento planar. Fonte: Modificado de Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998).

- Circulares ou Rotacionais: Formam superfície de ruptura curva. Estão associados à existência de solos espessos, homogêneos e rochas muito fraturadas, geralmente, localizadas no topo de escarpas ou morros (Fig. 3).

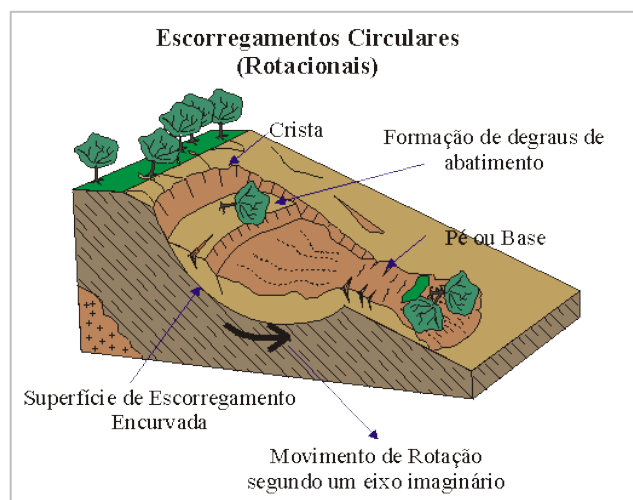


Figura 3: Escorregamento circular. Fonte: Modificado de Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998).

- Em Cunha: Estão associados à saprólitos e maciços rochosos. Apresentam dois planos de fraqueza onde o deslizamento ocorre ao longo do eixo de intersecção desses planos. Esse processo é comum em taludes de corte ou em encostas que sofreram algum tipo de desconfinamento natural ou antrópico (Fig. 4).

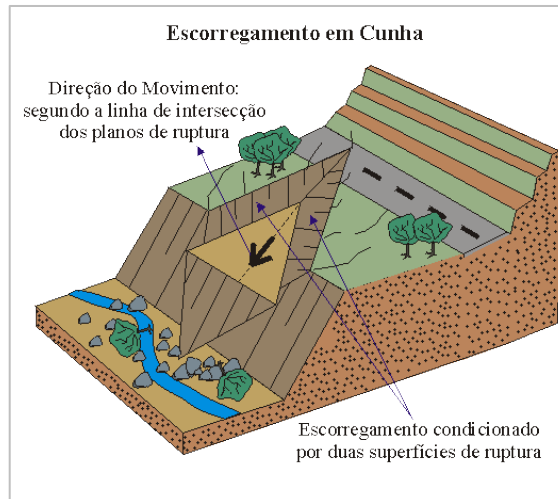


Figura 4: Escorregamento circular. Fonte: Modificado de Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998).

2.3 RISCO GEOLÓGICO, PERIGO E VULNERABILIDADE

No presente trabalho será utilizada a nomenclatura convencionada pelo Ministério das Cidades/IPT (Bitar 2014), que define:

- Risco: Relação entre a possibilidade de ocorrência de um dado processo ou fenômeno, e a magnitude de danos ou consequências sociais e/ou econômicas sobre um dado elemento, grupo ou comunidade. Quanto maior a vulnerabilidade, maior o risco. A equação mais didática utilizada para representar o risco é: $R = P \times C$, sendo: R = risco; P = probabilidade (ou possibilidade) de ocorrência de um determinado evento geológico adverso; C= consequências sociais e/ou econômicas potenciais;
- Perigo: Condição ou fenômeno com potencial para causar uma consequência desagradável. Estima-se considerando os fatores do meio físico que interferem na suscetibilidade natural do terreno, bem como os fatores relacionados ao padrão de uso da terra que potencializam a ocorrência do processo perigoso;
- Vulnerabilidade: Grau de perda para um dado elemento, grupo ou comunidade dentro de uma determinada área passível de ser afetada por um fenômeno ou processo. Permite definir o nível de exposição e a predisposição de um elemento (pessoas, bens, propriedades, vias de

acesso) ser afetado por um perigo específico, sendo esta condição determinada por fatores físicos ou humanos.

2.4 ZONEAMENTO E SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTO DE MASSA

Segundo Fell *et al.* (2008), zoneamento é a “*divisão do solo em áreas ou domínios homogêneos e sua classificação de acordo com graus de suscetibilidade, perigo ou risco de deslizamentos reais ou potenciais, ou ainda de acordo com a aplicabilidade de regulamentações ligadas ao perigo*” e estes podem ser apresentados em inventários ou mapas. No Brasil, tais zoneamentos são desenvolvidos pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM e apresentados em forma de Cartas de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações, previstas no Plano Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais.

Já o conceito de suscetibilidade a movimento de massa pode ser definido como uma “*avaliação quantitativa ou qualitativa do tipo, do volume ou área, e da distribuição espacial dos deslizamentos que existem ou potencialmente possam ocorrer em uma área. A suscetibilidade também pode incluir uma descrição da velocidade e da intensidade do deslizamento, potencial ou existente*” (Fell *et al.* 2008, p. 97). Ou seja, a suscetibilidade indicará a tendência de um dado fenômeno ou processo ocorrer em uma área.

Conforme Jackson *et al.* (2012), quando o mapeamento da suscetibilidade a deslizamentos segue uma abordagem qualitativa o método é denominado de geomorfológico, baseado em interpretações da distribuição de características geomorfológicas ou associadas a atributos do território. Quando tipicamente qualitativo/quantitativo, são cinco tipos: subjetivo-relativo (algoritmo subjetivo), movimento previsto (percurso previsto ou em uma zona de corrida), cálculo de estabilidade (cálculos de estabilidade das vertentes), variante relativa (estatístico e rigoroso) e probabilístico (relacionamento estatístico entre deslizamentos antigos e parâmetros conhecidos por serem associados com deslizamentos).

2.5 TEORIA FUZZY

A lógica *fuzzy* foi introduzida no contexto científico, em 1965, pelo professor de Ciências da Computação da Universidade da Califórnia, Lofti Asker Zadeh, através da publicação do artigo *Fuzzy Sets* no *Jornal Information and Control*. Atualmente, a lógica *fuzzy* é muito utilizada para a tomada de decisões, categorização de dados e análises, pois por ser uma lógica multivalorada, os valores verdade de variáveis podem ser qualquer número

real entre 0 e 1 indicando a sua adesão a um determinado conjunto. Cada objeto pode ser membro de vários grupos com diferentes valores de adesão, diferentemente da lógica booleana, segundo a qual os valores lógicos podem ser apenas 0 e 1 (Lanzillotti e Lanzillotti 2014).

Nesse contexto, o conceito *fuzzy* pode ser entendido como uma situação em que não é possível responder simplesmente "sim" ou "não". Mesmo conhecendo as informações necessárias sobre a situação, dizer algo entre "sim" e "não", como "talvez" ou "quase", torna-se mais apropriado. De modo figurativo enquanto a lógica clássica enxerga apenas o preto e o branco, a lógica *fuzzy* é capaz de além do preto e do branco, enxergar vários tons de cinza (Kohagura 2007) (Fig. 5).

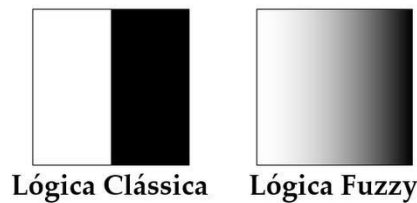


Figura 5: Comparativo entre a Lógica Clássica e a Lógica Fuzzy. Fonte: Adaptado de Kohagura (2007).

Desse modo, a Teoria *Fuzzy* cria escalas de valores que buscam quantificar o objeto a ser estudado. O uso dessa teoria implica na criação de variáveis, chamadas de variáveis linguísticas, que diferentemente da lógica clássica, possibilitam captar o grau de incerteza presente nessas variáveis e traduzir para um modelamento matemático. Esta possibilidade da lógica *fuzzy* é chamada grau de participação ou como função de pertinência (Silva Junior 2015) (Fig. 6).

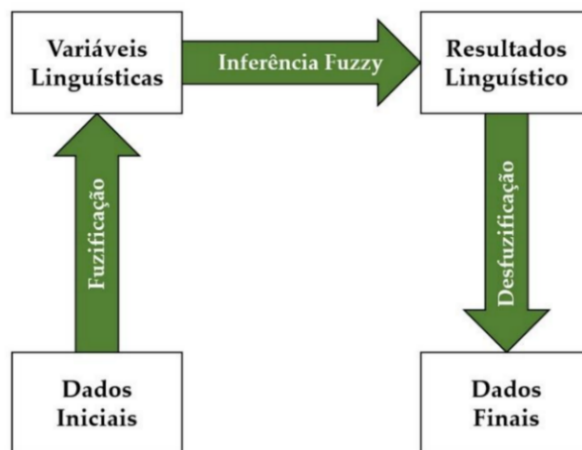


Figura 6: Sistema Lógico Fuzzy. Fonte: adaptado de Cox (1995) por Silva Junior (2015).

Na etapa de fuzificação ocorre a transformação dos dados iniciais em suas respectivas variáveis linguísticas. Nesta etapa, as informações relativas à imprecisão ou incerteza associada a estas variáveis devem ser consideradas; por isso, é muito importante a consulta do especialista da área estudada ou o uso de conhecimento já estabelecido sobre a área para a atribuição de valores relacionados aos graus de pertinência para cada uma das variáveis em estudo, contribuindo assim para maior precisão nos resultados (Silva Junior 2015).

A inferência *Fuzzy* é a etapa de operação para com os conjuntos Fuzzy. É nesta etapa que acontece o mapeamento de conjunto *Fuzzy*, além de determinar a maneira de como as regras de controle serão iniciadas e combinadas por meio das condicionais “Se; Então” (Silva Junior 2015).

A terceira e etapa do sistema lógico *fuzzy* é chamada desfuzificação e, de acordo com Silva Junior (2015), consiste na tradução do resultado linguístico do processo de inferência fuzzy, em um valor numérico (processo de fatiamento). Todavia, Cox (1995), apresenta outro conceito em que compreende o processo de conversão de um número *fuzzy* em um número real.

2.6 PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO – AHP

Segundo Saaty (1987), o Processo Analítico Hierárquico, do inglês *Analytic Hierarchy Process* – AHP é uma metodologia matemática destinada a ponderar quantitativamente variáveis mediante a interação do pesquisador com o modelo matemático e fazer isso em forma de considerações qualitativas.

Esse processo envolve a identificação de um problema de decisão e decompõe este em uma hierarquia de problemas menores e mais simples, onde são analisados de forma independente, sem perder o foco do problema de decisão. Os pesos são atribuídos de acordo com sua importância relativa (Tabela 3) e as alternativas são avaliadas, usando a escala de Saaty, por meio de comparações de pares, onde se atribui valores numéricos quantitativos e qualitativos aos critérios (Souza *et al.* 2013).

Tabela 3: Definição e explicação dos 9 pesos fundamentais de julgamento comparativo.

Intensidade de Importância	Definição	Explicação
1	Importância Equiparada	Contribuição equiparada para o objetivo
3	Importância Moderada	Um objetivo ligeiramente favorável em detrimento de outro
5	Importância Forte	Um objetivo fortemente favorável em detrimento de outro
7	Importância Muito Forte	Um objetivo muito fortemente favorável em detrimento de outro; domínio demonstrado na prática
9	Importância Absoluta	É a maior ordem de afirmação possível de um objetivo em detrimento de outro
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre dois julgamentos sucessivos	Possível necessidade de se interpolar julgamentos numéricos.

Fonte: Pinese Júnior e Rodrigues (2012, p. 9).

O AHP converte os julgamentos em valores numéricos que podem ser processados e comparados. Um peso numérico é derivado para cada elemento da hierarquia, permitindo que elementos distintos sejam comparados entre si (Shahabi *et al.* 2014). As comparações entre os atributos são registradas em matrizes na forma de frações entre 1/9 e 9. Cada matriz é avaliada pelo seu autovalor para verificar a coerência dos julgamentos. Este procedimento gera uma "*razão de coerência*", que será igual a 1 se todos os julgamentos forem coerentes entre si mesmos (Pinese Júnior e Rodrigues 2012).

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 LOCALIZAÇÃO E ACESSO

A área de estudo (145 km²) compreende o centro urbano do município de Parauapebas, no Estado do Pará (Fig. 7)¹. O Município de Parauapebas localiza-se na mesorregião sudeste paraense e na microrregião de Parauapebas, com uma população estimada de 218.787 habitantes (IBGE, 2021), distante cerca de 700 km da capital, Belém. O principal acesso terrestre, partindo da capital, é via Alça Viária pelas rodovias PA-150 e PA-275 até Parauapebas. O acesso aéreo é pelo aeroporto de Carajás (CKS/SBCJ) com voos regulares entre Belém-Carajás e Brasília-Belém-Carajás. Parauapebas se destaca pela imensa riqueza mineral em seu subsolo, além da Floresta Nacional de Carajás (FLONA), da Reserva Biológica do Tapirapé (REBIO) e da Área de Proteção Ambiental do Igarapé Gelado (APA).

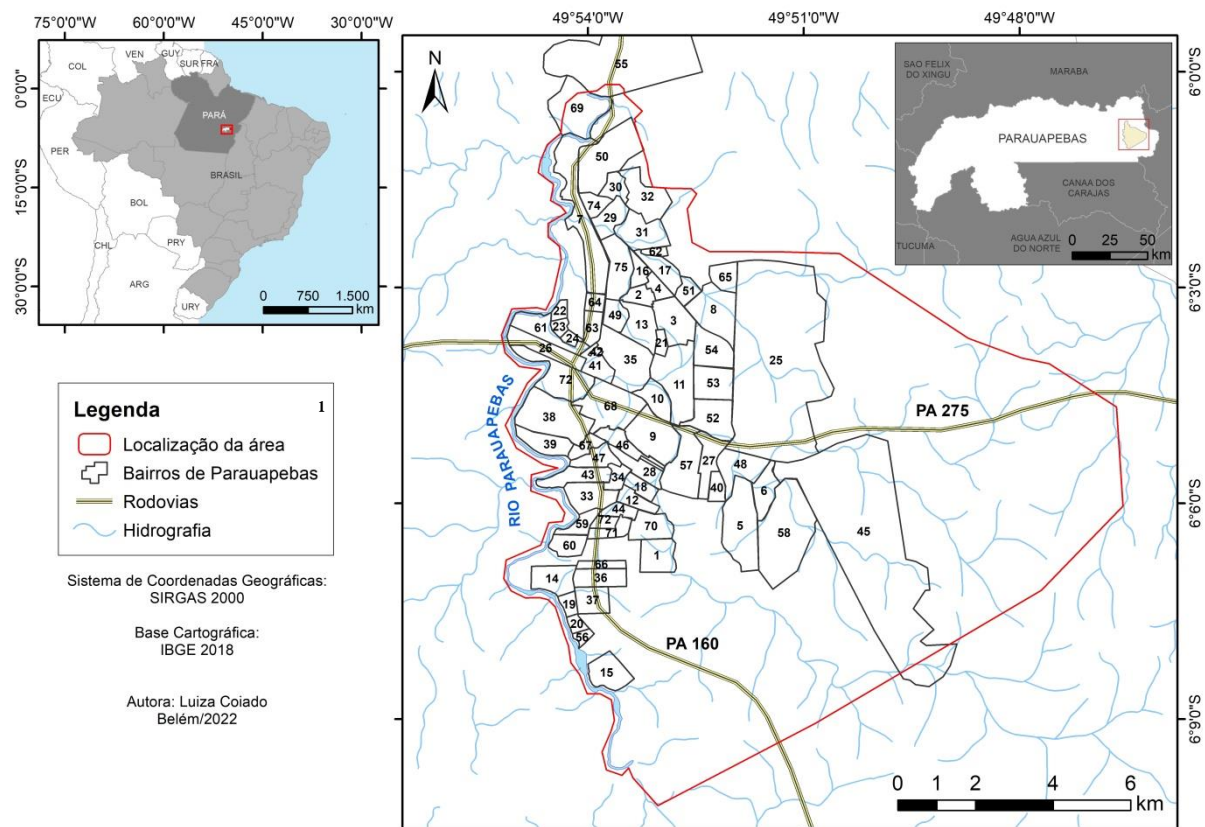


Figura 7: Mapa de Localização da área no município de Parauapebas, PA, Brasil. Fonte: Autora

¹ A tabela com a identificação e informações dos Bairros de Parauapebas encontra-se no Apêndice A.

3.2 ASPECTOS FÍSICOS NATURAIS

3.2.1 Clima

O clima predominante na região é o equatorial superúmido, tipo *Am* na classificação de Köppen. Possui duas estações climáticas bem definidas: verão chuvoso e inverno seco, sendo o período chuvoso de novembro a maio, e o mais seco, de junho a outubro, estando o índice pluviométrico/ano em torno de 2 mil mm, caracterizando-se com temperatura média anual do ar de 26°C, com máxima em torno de 32°C e mínima de 22°C (PARATUR, 2012).

3.2.2 Hidrografia

A área de estudo está inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Parauapebas (BHRP). O principal curso d'água da bacia é o rio Parauapebas, cortando cerca de 350 quilômetros no sudeste paraense, nasce na Serra Arqueada e corre na direção sul-norte, é formado pela junção do ribeirão do Caracol e do córrego da Onça. Recebe pela margem esquerda os rios Córrego da Goiaba, Sossego, Igarapé da Gal, Gelado e Sapucaia; e pela margem direita, os rios Plaquê e Verde, Igarapé Ilha do Coco e os rios Novo e Caracol (Siqueira *et al.* 2012).

3.2.3 Relevo

A região é marcada predominantemente por um relevo acidentado (Fig. 8), com presença de morros baixos a altos, apresentando uma topografia com variação dos seus níveis altimétricos, onde se destacam os maiores valores, oscilando entre os 500 e 600 metros e as cotas mais baixas entre 200 e 210 metros.



Figura 8: Paisagem urbana de Parauapebas. Relevo acidentado com morros baixos a altos. Fonte: Autora.

3.2.4 Solo

Os solos predominantes na área estão agrupados em associações, sendo o Podzólico Vermelho-Amarelo (Fig. 9), de textura argilosa e Podzólico Vermelho-Amarelo equivalente Eutrófico, com textura argilosa e relevo suave ondulado. Há também solos Litólicos Distróficos, de textura indiscriminada e relevo forte ondulado; solo Litólico, textura indiscriminada; e Terra Roxa Estrutura distrófica, textura argilosa, relevo forte ondulado e afloramento rochoso, relevo montanhoso e escarpado com áreas de aplainamento. (PARATUR, 2012).

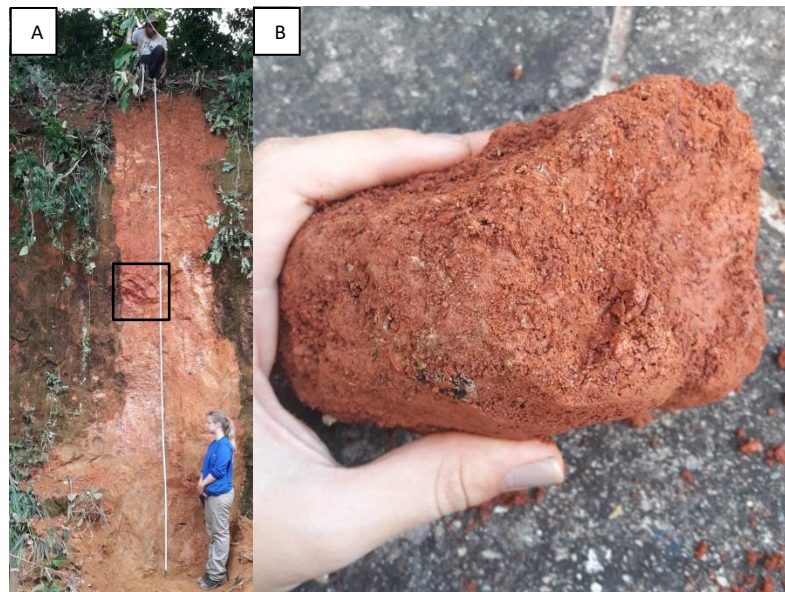


Figura 9: A) Perfil de Solo Podzólico Vermelho Amarelo com destaque para local de amostragem. B) Amostra de Solo Podzólico Vermelho Amarelo com textura predominantemente argilosa. Fonte: Autora.

3.2.5 Vegetação

O grande domínio vegetal de Parauapebas é da Floresta de Terra Firme, a qual sofre alterações variações de solo e relevo, proporcionando a ocorrência dos subtipos: Floresta Densa dos Platôs, Floresta Densa Submontana, Floresta Aberta Latifoliada (cipóal) e Floresta Aberta Mista (cocal). A implantação de fazendas de pecuária bovina e de cultivos migratórios propiciou a ocorrência de pastagens cultivadas (Fig. 10) e vegetação de capoeira (PARATUR, 2012).

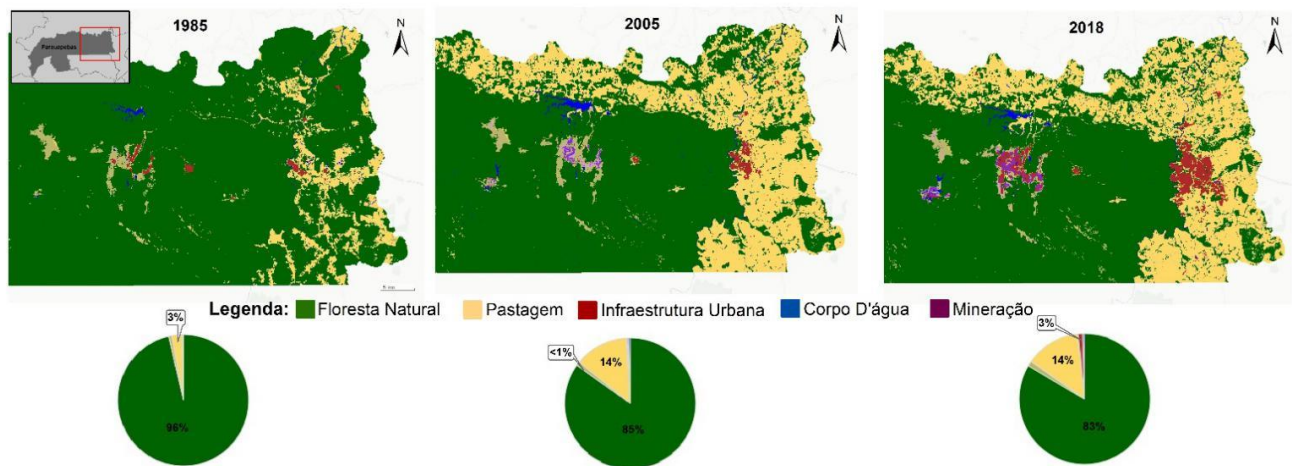


Figura 10: Evolução da mancha Urbana de Parauapebas nos anos 1985, 2005 e 2018. Fonte: Adaptado de MapBiomias (2021).

3.2.6 Geologia

Á área de estudo está inserida no Cráton Amazônico, na Província de Carajás, no Domínio de Carajás, folha Rio Verde SB-22-Z-A-III (Tavares 2014). Apresenta uma estrutura geológica definida por uma variação rochas de idade Pré-cambriana, sendo a Formação Parauapebas, do Grupo Grão Pará, a mais expressiva no local. Além disso, a assembleia de embasamento na região é do tipo TTG, definido pelo Ortognaisse Bom Jesus.

A Formação Parauapebas, 2757 ± 7 Ma (U -P bem zircão), é uma sequência do tipo *Greenstone Belts* caracterizada por rochas vulcânicas máficas, representando os derrames basálticos, além de rochas vulcânicas félsicas subordinadas e intrusões máficas. De modo geral, as rochas máficas exibem granulação fina a grossa com texturas e mineralogias primárias preservadas, exceto nas áreas deformadas, as quais indicam condições metamórficas de fácies xisto verde baixo. Esta Formação é afetada pelo Sistema Transcorrente Carajás, sinistral, de caráter rúptil a rúptil-dúctil, e pela Falha Carajás, de direção NW-SE, aos quais se associam a um complexo padrão estrutural com desenvolvimento de dobras e falhas diversas (Pinheiro 1997).

O Ortognaisse Bom Jesus, 3080 ± 10 Ma (U-Pb em zircão), caracteriza-se por ortognaises migmatíticos, de composição granodiorítica a tonalítica, apresentando bandas e enclaves anfibolíticos. Ocorrem frequentes lentes e bolsões de material leucossomático de composição granítica a granodiorítica, derivados de fusão parcial em fácies anfibolito alto a granulito (Tavares 2014).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização deste trabalho foram utilizadas referências bibliográficas disponíveis em periódicos e repositórios, além de dados espaciais e softwares aplicados em SIG. Os dados vetoriais e matriciais utilizados foram disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e Defesa Civil do Município de Parauapebas (COMDEC) e gerenciados no software ArcGis 10.5. Enquanto os demais dados e imagens foram coletados em campo, com de auxílio de aparelho de posicionamento global (GPS), *Avenza Maps*, caderneta e celular.

Destaca-se que a autora do trabalho tem experiência com o tema da pesquisa, dado seu período de estágio na CPRM, onde teve a oportunidade de atuar na área e apoiar os levantamentos.

No formato de dados vetoriais e matriciais foram adotados:

- Geomorfologia: Padrões de relevo, disponibilizados pelo IBGE na forma de polígonos. Na escala: 1:250.000.
- Pedologia: Tipos de solo, disponibilizados pelo IBGE na forma de polígonos na escala: 1:250.000.
- Geologia: litologia da folha Rio Verde (SB-22-Z-A-III), disponibilizado pela CPRM na forma de polígonos, na escala: 1:100.000.
- Setores de Risco: tipologia, grau de risco e localização de setores, disponibilizados pela CPRM na forma de polígonos, na escala: 1:1000.
- Modelo Digital de Terreno (MDT): Dado *raster*, que contém informações altimétricas e resolução espacial 1:1000, disponibilizadas pela Defesa Civil de Parauapebas - COMDEC.
- Ortofotos: Fotografias aéreas digitais coloridas de 2018, na escala 1:1000 disponibilizadas pelas Defesa Civil de Parauapebas - COMDEC.

4.1 MÉTODOS

Os métodos para a realização desse trabalho consistem na combinação de diferentes tipos de dados espaciais em ambiente SIG para estabelecer uma associação entre os fatores naturais e antrópicos, a fim de gerar um mapa de suscetibilidade. Os procedimentos metodológicos desenvolvidos consistiram no levantamento em campo, coleta de dados ambientais georreferenciados, pré-processamento, processo analítico hierárquico e elaboração

de mapas de suscetibilidade a movimentos de massa utilizando a processamento *fuzzy* (Fig. 11).

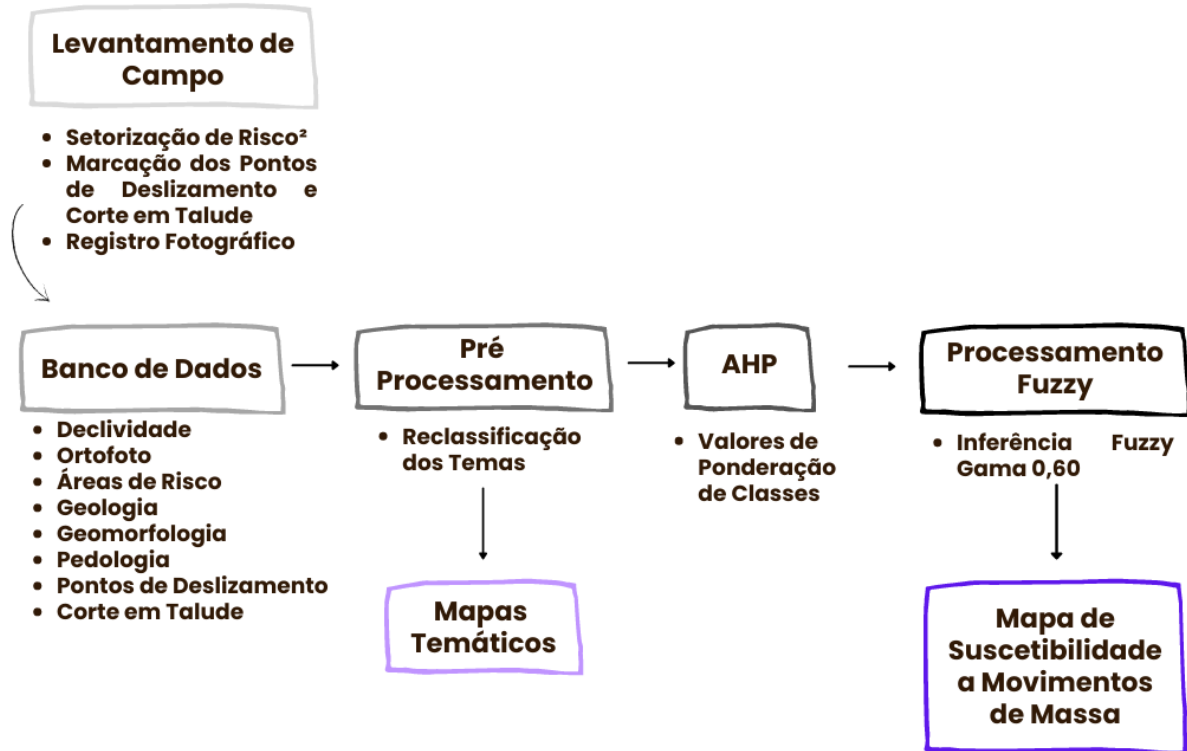


Figura 11: Fluxograma da metodologia utilizada na elaboração do trabalho. Fonte: Autora

Foram utilizados os levantamentos de campo da CPRM e Defesa Civil no município de Parauapebas – Pará no período de 15 a 23 de maio 2019, a fim de identificar os de pontos de deslizamento (Apêndice B) e corte em talude com auxílio de aparelho de posicionamento global (GPS). Além disso, durante os levantamentos de campo foram feitos registros fotográficos, e delimitação dos setores risco a movimentos de massa e inundação com a equipe da CPRM².

O banco de dados apresenta o levantamento de informações ambientais georreferenciadas em dados matriciais e vetoriais em ambiente SIG. Para a pesquisa, foram aplicados os temas: declividade, geologia, geomorfologia, pedologia, setores de risco, pontos de deslizamento e corte de talude.

² As informações e localização dos setores de risco, tipologia, grau de risco, quantidade de pessoas em risco, quantidade de imóveis em risco, mapas e relatório completo são produtos do Serviço Geológico do Brasil – CPRM e publicados no Geosgb (Banco de dados de geoinformação do Serviço Geológico do Brasil) disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/18347.2>.

4.1.1 Pré-processamento

A primeira etapa do pré-processamento consistiu na reclassificação dos temas. Para tanto, reclassificou-se o tema Geologia considerando as unidades litológicas da região, representadas pelas variáveis: a) sedimentos não consolidados, b) metassedimentares e c) granitos. De igual modo, reclassificou-se os mapas temáticos de geomorfologia em variáveis de relevo: a) pediplano, b) tabular, c) convexo e d) encosta íngreme. Para usar o tema declividade, primeiro procedeu-se com MDT de inclinação: “0-10%”, “10-15%”, “15-20% e “20-78%”. O último intervalo com maior range, foi definido em considerações às observações em registros históricos que apontam deslizamento em áreas com inclinação a partir de 20°.

O tema setor de risco (para movimentos de massa) foi classificado em: a) alto, b) muito alto e c) sem registro. Os temas “Ocorrências de Deslizamento e Corte de Talude” descrevem diferentes aspectos de ocorrência relevantes para a pesquisa e que são caracterizadas sob duas condições: a) presença e b) ausência.

Após isso, elaborou-se o mapa temático de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa segundo as técnicas de inferência booleana. Para gerar os mapas temáticos segundo a álgebra booleana, adotaram-se os seguintes relacionamentos, para definir o grau de potencialidade à ocorrência de deslizamentos:

- a) **Muito alta e alta:** quando em encostas íngremes, com declividade maior que 20% e fosse verificada a ocorrência de deslizamentos de terra e risco a movimentos de massa alto e muito alto, além de corte em talude, assim como solos do tipo argiloso/cascalhento;
- b) **Moderado:** com declividade entre 15% e 20%, com ocorrência de rochas metassedimentares, em encosta com vertente convexa e para solos do tipo médio argiloso.
- c) **Baixo e muito baixo:** com declividade entre 0% e 15%, em terreno pediplano, onde não há registro de deslizamento de terra e risco de movimento de massa, com rochas granitóides e sedimentos não consolidados.

A Tabela 4 mostra a associação entre os relacionamentos de variáveis e o grau de potencialidade de deslizamentos.

Tabela 4: Classificação quanto ao potencial.

Classificação	Potencial	Classificação	Potencial
Muito Baixo a Nulo	1	Alto	4
Baixo	2	Muito Alto	5
Moderada	3		

Os resultados para cada variável temática são apresentados nas Tabelas 5 a 11. A Figura 12 ilustra a representação final, associada à reclassificação.

Tabela 5: Potencial das variáveis do tema Declividade.

Declividade	Potencial (V1)
0-10	1
10-15	2
15-20	3
20-78	5

Tabela 6: Potencial das variáveis do tema Geologia.

Geologia	Potencial (V2)
Areia/cascalho	4
Metasedimentares	3
Metamórficas	2
Granitos	2

Tabela 7: Potencial das variáveis do tema Setores de Risco.

Setores De Risco (V3)	Potencial (V3)
Deslizamento muito alto	5
Deslizamento alto	4
Sem deslizamento	1

Tabela 8: Potencial das variáveis do tema Pedologia.

Pedologia (V4)	Potencial (V4)
Argilosa/cascalhenta	5
Argilosa	4
Média argilosa	3
Muito argilosa	2

Tabela 9: Potencial das variáveis do tema Corte de Talude.

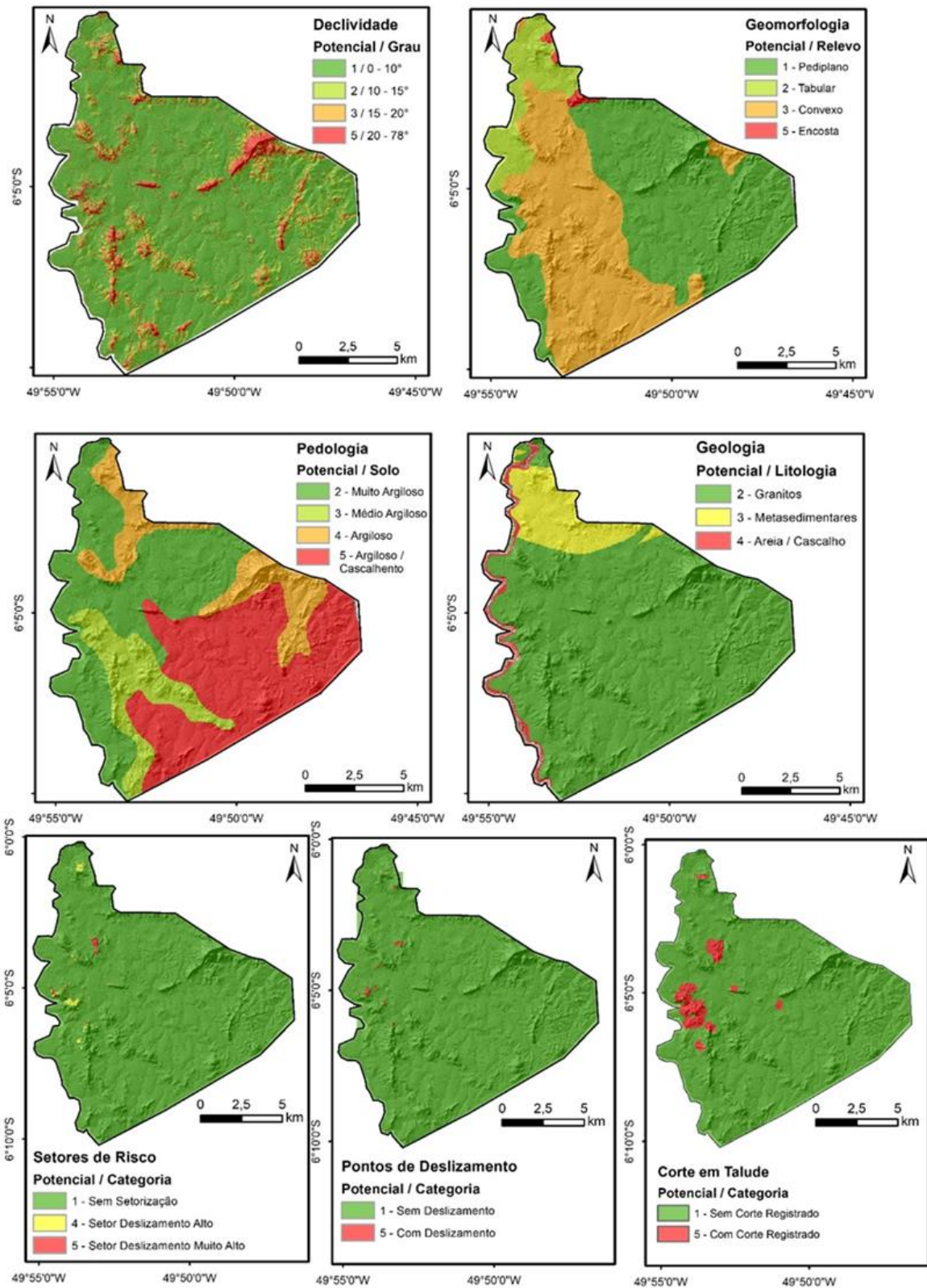
Corte De Talude (V5)	Potencial V5
COM	5
SEM	1

Tabela 10: Potencial das variáveis do tema Deslizamento.

Deslizamento	Potencial (V6)
Com	5
Sem	1

Tabela 11: Potencial das variáveis do tema Geomorfologia.

Geomorfologia (V7)	Potencial (V7)
Pediaplano	1
Tabular	2
Convexo	3
Encosta íngreme	5



Autora: Luiza Coiado 2022 Base Cartográfica: IBGE 2018 Setores de Risco: CPRM 2020 Sistema de Coordenadas Geograficas: SIRGAS 2000

Figura 12: Mapas Temáticos para Declividade, Geomorfologia, Pedologia, Geologia, Setores de Risco, Pontos de Deslizamento e Corte em Talude. Fonte: Autora.

4.1.2 O processo analítico hierárquico - AHP

Após a fase de pré-processamento dos dados, foi feita uma análise hierárquica (AHP – *Analytical Hierarchy Process*), que consiste em um método matemático desenvolvido por Saaty (1987), permitindo comparar diferentes alternativas, fundamentada em vários critérios, com o objetivo de direcionar a tomada de decisão para uma escolha mais ponderada. Para construção e uso da matriz foi adotado o procedimento indicado pelos autores Silva e Nunes (2009), onde o processo pode ser agrupado em 3 estágios, conforme Figura 13.

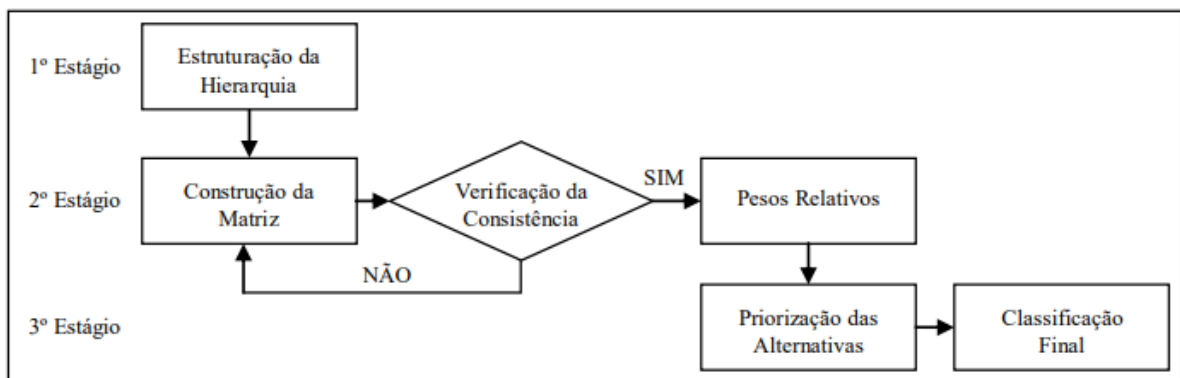


Figura 13: Representação gráfica dos três estágios utilizando-se o método AHP. Fonte: Silva e Nunes (2009).

No primeiro estágio foi feita uma análise hierárquica onde se determinou os pesos para cada critério, através da comparação pareada, onde os diferentes critérios são comparados aos pares de forma a orientar os fatores ponderantes de maneira crescente, desde o primeiro até o último fator. No segundo estágio, as comparações entre os temas foram registradas em matrizes na forma de frações entre 1/5 (0,20) a 5 (Tabela 12). Cada matriz foi avaliada pelo seu autovalor para verificar a coerência dos julgamentos, no qual a razão de coerência deve ser igual a 1 quando todos os julgamentos são coerentes entre si.

Tabela 12: Matriz de comparação entre temas.

	Declividade (V1)	Geologia (V2)	Setores de Risco (V3)	Pedologia (V4)	Corte de Talude (V5)	Deslizamento (V6)	Geomorfologia (V7)
(V1)	1,00	4,00	0,25	4,00	2,00	0,25	2,00
(V2)	0,25	1,00	0,20	1,00	0,33	0,20	0,50
(V3)	4,00	5,00	1,00	5,00	4,00	1,00	5,00
(V4)	0,25	1,00	0,20	1,00	0,33	0,20	0,50
(V5)	1,00	3,00	0,25	3,00	1,00	0,25	1,00
(V6)	4,00	5,00	1,00	5,00	4,00	1,00	4,00
(V7)	0,50	2,00	0,20	2,00	1,00	0,25	1,00
Soma:	11,00	21,00	3,10	21,00	12,66	3,15	14,00

De acordo com a metodologia de Saaty (1987), os valores de cada célula da Tabela 12 são divididos pela somatória da respectiva coluna. Posteriormente, realizou-se a normalização destes valores, onde a soma de cada linha da matriz encontrada é dividida pela ordem da matriz n , encontrando-se, portanto, o valor do Peso Processado (w_i) de cada fator ponderante (Tabela 13). A tabela de matriz completa encontra-se no Apêndice C.

Tabela 13: Valor do Peso Processado de cada fator

AW1/WI	AW2/WI	AW3/WI	AW4/WI	AW5/WI	AW6/WI	AW7/WI
7,07	7,23	7,81	7,23	7,18	7,84	7,27

O cálculo do λ_{max} indica o valor máximo do autovalor λ , e é obtido pela equação 1.

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[Aw]}{w_i} \quad (1)$$

Onde $[Aw]$ é a matriz resultante do produto de comparação pareada pela matriz dos pesos processados (w_i). Assim sendo o valor de $\lambda_{max} = 7,38$. Uma boa estimativa dos coeficientes da matriz implica um λ_{max} mais próximo de n (nesse caso, $n=7$).

Esse desvio de consistência é medido pelo Índice de Consistência (IC) através da equação 2, que para a avaliação realizada foi de 0,06.

$$IC = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)} \quad (2)$$

Após o cálculo dos pesos de cada fator foi necessária a avaliação de sua aceitabilidade ou Razão de Consistência (RC) que, de acordo com Saaty (1987), deve apresentar valor menor que 0,10, ou seja, o resultado desta razão deve ser menor que 10 %. O cálculo de RC é obtido pela equação 3.

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (3)$$

O Índice Randômico (IR) é extraído da tabela de valores para matrizes quadradas de ordem n estabelecida pelo *Oak Ridge National Laboratory*, EUA, conforme orientado por Saaty (1987) (Tabela 14).

Tabela 14: Valores de IR para matrizes quadradas de ordem n .

N	2	3	4	5	6	7
IR	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32

FONTE: Adaptado de Saaty (1987).

Dessa forma o $RC = 0,047$, sendo o valor menor que 0,10, portanto, considerado correto segundo a escala de Saaty.

4.1.3 Elaboração do Mapa de Suscetibilidade a Movimentos de Massa

Para a elaboração do mapa de suscetibilidade foi utilizado o método de combinação de mapas através da lógica *fuzzy*, processada em ambiente ArcGis 10.5. A partir desse método, diversos mapas podem ser combinados para geração de um único produto através da função *fuzzy* (Fig. 14), que representa o peso de cada classe em uma série contínua, com valores entre 0 e 1, denominados *fuzzy membership* (Boham-Carter 1994).

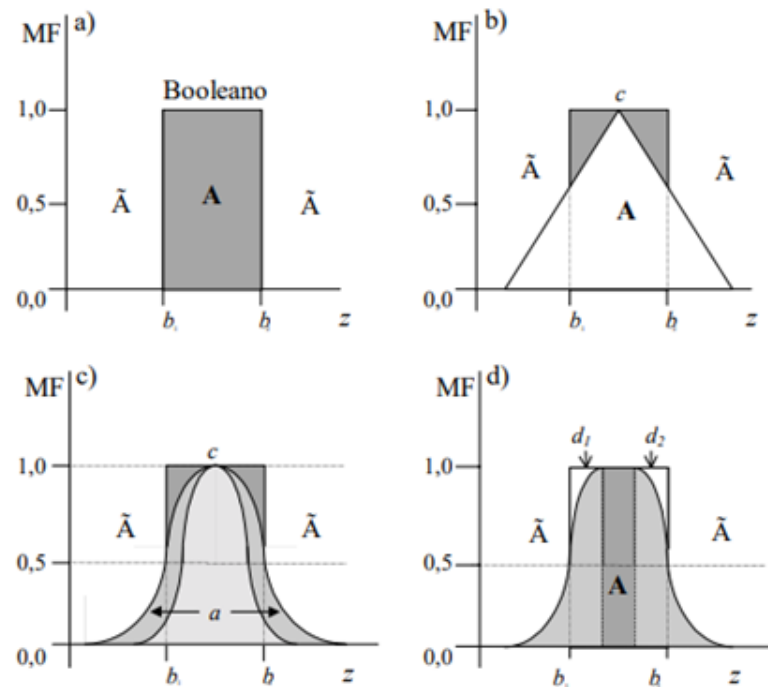


Figura 14: Conjunto fuzzy (A). O parâmetro a determina a forma da função e c , o valor de z no ponto central de (A). Os valores definidos em d_1 e d_2 determinam a largura da região de transição a partir de um limiar de precisão de medida do objeto. (a) e (b) representam uma interpretação linear do sistema (conjunto booleano). (c) e (d) compõe uma interpretação a partir da fronteira entre um conjunto. Fonte: Câmara *et al.* (2004, pág. 7).

No processamento efetuado, a AHP gerou por álgebra de mapas um resultado comparativo com os obtidos por lógica *fuzzy*. Sendo, que neste último foram testados os produtos para os processamentos *fuzzy overlay gamma*, *fuzzy overlay product*, e *fuzzy weighted soma*. Onde aquele que melhor se adequou ao observado nos levantamentos de campo e a cartografia gerada pela via álgebra pela AHP foi o *fuzzy overlay gamma*.

O operador *fuzzy gamma* é definido por dois termos, um produto algébrico *Fuzzy* e uma soma algébrica *Fuzzy* dados pela equação 5.

$$\mu = (\text{soma algébrica } fuzzy)^\gamma \times (\text{produto algébrico } fuzzy)^{1-\gamma} \quad (5)$$

Onde μ é definido pela equação 6. Assim, encontra-se o valor de w_i dos membros *fuzzy* para uma variável “ v ”. Onde $\prod_{i=1}^n$ é a função de pertinência *fuzzy* do conjunto μ .

$$\mu = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \quad (6)$$

O termo $(1 - w_i)$ é multiplicado por meio do operador. O resultado da soma algébrica será igual ou maior ao valor de entrada do maior membro *fuzzy* (w_i). Quanto ao segundo termo da equação 6, este é obtido pela equação 7.

$$\mu = \prod_{i=1}^n (\mu_i) \quad (7)$$

Neste caso, o operador executa a multiplicação dos atributos de todas as variáveis e o valor de saída de um determinado ponto será sempre igual ou menor ao valor do menor membro *fuzzy* (Moreira 2002). Onde w_i é, também, o valor dos membros *fuzzy* para uma variável “ i ”.

No operador *gamma* pode-se variar a importância de cada termo (soma algébrica e produto algébrico *Fuzzy*). A importância de cada termo no operador *gamma* é definida atribuindo-se valores entre 0 e 1. Quando este for igual a 0, o resultado será igual ao produto algébrico, e quando igual a 1, o resultado será igual à soma algébrica. Os valores de *gamma* entre 0 e 0,35 apresentaram um caráter “*diminutivo*”, ou seja, sempre menor ou igual ao menor membro *fuzzy* de entrada. Também, estes valores entre 0,8 e 1,0 terão um caráter “*aumentativo*” onde o valor de saída será igual, ou maior que o valor do maior membro *Fuzzy* de entrada. Os valores de gama entre 0,35 e 0,8 não apresentaram resultados nem de caráter

“*augmentativo*” nem “*diminutivo*”, e os valores de saída cairão sempre entre o menor e o maior valor dos de entrada (Câmara *et al.* 2004).

O resultado da função *fuzzy gamma* corresponde ao índice de suscetibilidade a movimentos de massa (ISSM), que é assinalado a cada pixel após a análise espacial do mapa temático. Assim, valores altos indicam alta suscetibilidade a movimentos de massa, enquanto, valores baixos indicam o oposto.

Dessa forma, foi gerado o mapa de suscetibilidade a partir do valor de *gamma* de 0,6. No mapa elaborado, os valores do ISSM foram categorizados em quatro classes (muito baixo, baixo, médio, alto). Na categorização foi utilizado o método de “*quebras naturais*”, a qual realiza a classificação automática através do histograma de frequência dos valores de ISSM.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como resultado, o mapa de suscetibilidade a movimentos de massa foi gerado pela inferência *fuzzy overlay*, com valor *gamma* de 0.6 (Fig. 15), dividido em quatro classes de probabilidade a ocorrência de tais eventos: muito baixa, baixa, média e alta.

Foi observado que a área classificada como muita baixa suscetibilidade representa 20% (29 km²) da região centro urbana do município de Parauapebas. A região de baixa suscetibilidade é predominante e representa aproximadamente 43% (62 km²) do total. Já a classe de média suscetibilidade representa 18% (26 km²) e a classe mais crítica, correspondente à alta suscetibilidade, representa 19% (27,5 km²) da área total do centro urbano de Parauapebas com aproximadamente 4.900 moradias e 19.600 pessoas.

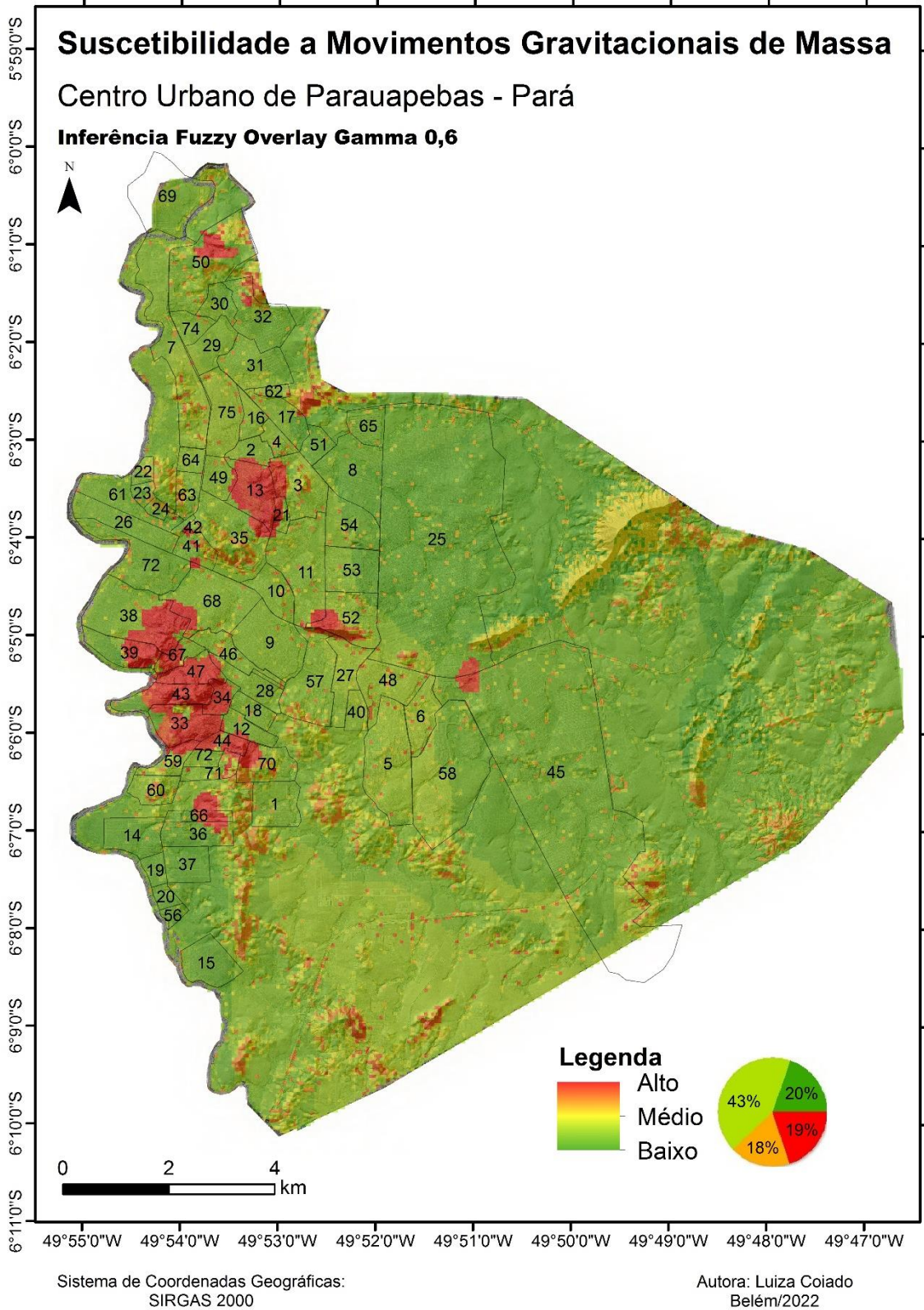


Figura 15: Mapa de Suscetibilidade a Movimentos de Massa para o centro urbano do Município de Parauapebas.

O mapa de suscetibilidade mostra que as áreas de suscetibilidade muito baixa e baixa se distribuem principalmente nas regiões leste e sudeste (Fig. 15). Os terrenos com média suscetibilidade se estendem principalmente pelas regiões norte e sudoeste. Enquanto isso, as áreas com alta suscetibilidade a movimentos de massa estão concentradas na região oeste e noroeste. A partir desse mapa foram identificadas zonas críticas, onde se concentram a maior parte das áreas de alta e muito risco a movimentos de massa.

As regiões se localizam principalmente na porção oeste do centro urbano de Parauebas, nos bairros Liberdade 1 e 2, Jardim América 1 e 2, Residencial Bambui, Nova Vida 2, Montes Claros, Morada Nova, Parque da Nações 1, São Lucas 1, Rio Verde, Raio de Sol, P. dos Carajás, Novo Viver, Betânia, Céu Azul, Alto Boa Vista, Maranhão e Maranhãozinho, onde observou-se que esses bairros se situam em uma expressiva região de alta suscetibilidade a movimentos de massa.

De maneira geral, a suscetibilidade é maior em locais de alta declividade, com a presença de cortes em talude para a construção civil, onde houve remoção da cobertura vegetal, seja por origem antrópica (área urbana) e/ou por movimentos de massa recentes (solo exposto). Além disso, o aumento do índice pluviométrico no período de janeiro a março contribui significativamente para a ocorrência de deslizamentos na região (Fig. 16).

O mapa de suscetibilidade final, gerado a partir de $\gamma = 0.60$, mostra que as regiões críticas identificadas se situam em área urbanizada. Esse fato evidencia que a ação antrópica, conjuntamente aos demais fatores em análise, contribui diretamente para o aumento da probabilidade de ocorrência dos movimentos de massa nessas regiões.

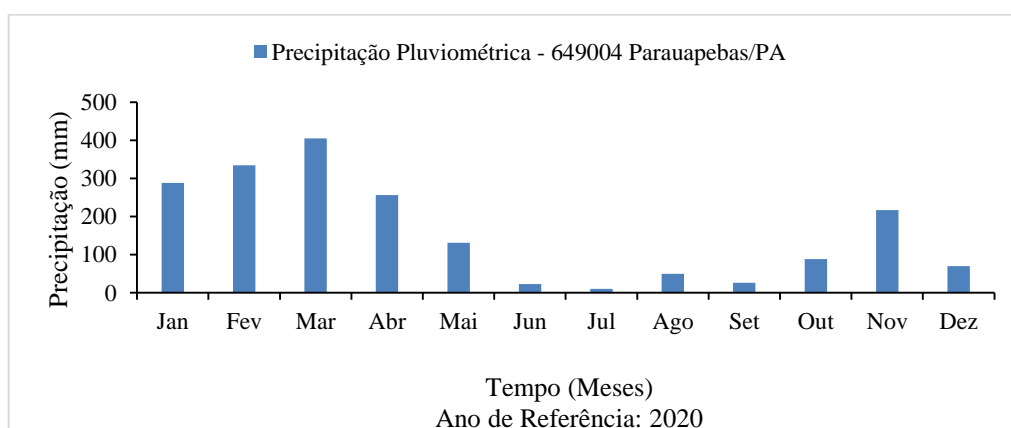


Figura 16: Médias mensais de pluviosidade no Município de Parauebas no ano de 2020. Fonte: ANA/SNIRH³.

³ <http://www.snirh.gov.br/hidrotelemetria/Mapa.aspx>. Acesso em: 01/06/2022.

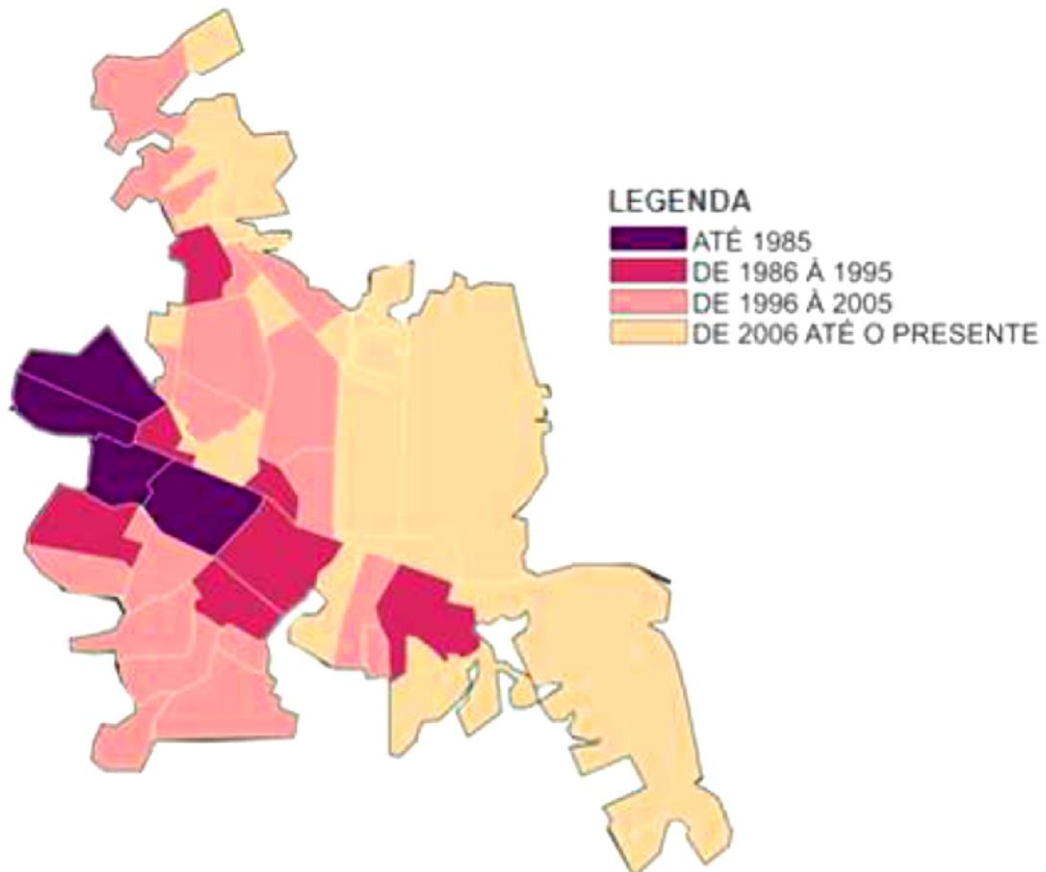
O produto apresentado tem ampla aplicação no planejamento urbano e na avaliação de riscos das cidades. Como estudos similares que também adotaram a lógica *fuzzy*, citam-se: Silva Junior (2015), com uma revisão associada ao problema de deslizamentos de massa; Lisboa *et al.* (2020), que discutem o risco de contaminação em áreas urbanas; e Lima *et al.* (2021), que trazem o método para avaliação de risco em ambientes de encostas.

A cidade de Parauapebas e sua expansão, vinculados ao histórico mineral da região de Carajás, demandam por estudos complementares, que abordem sua vulnerabilidade e sirvam para subsidiar o processo de tomada de decisão: Furtado e Ponte (2014) apresentam a visão da expansão da ocupação no município. Drago *et al.* (2018) discutem a aplicação de geotecnologias aplicadas ao zoneamento do território segundo suas vulnerabilidades, adotando como área o município de Parauapebas. E Cristo *et al.* (2022) apresentam as mudanças nas formas de uso da terra e suas consequências socioambientais, neste contexto de integração dado pela ferrovia.

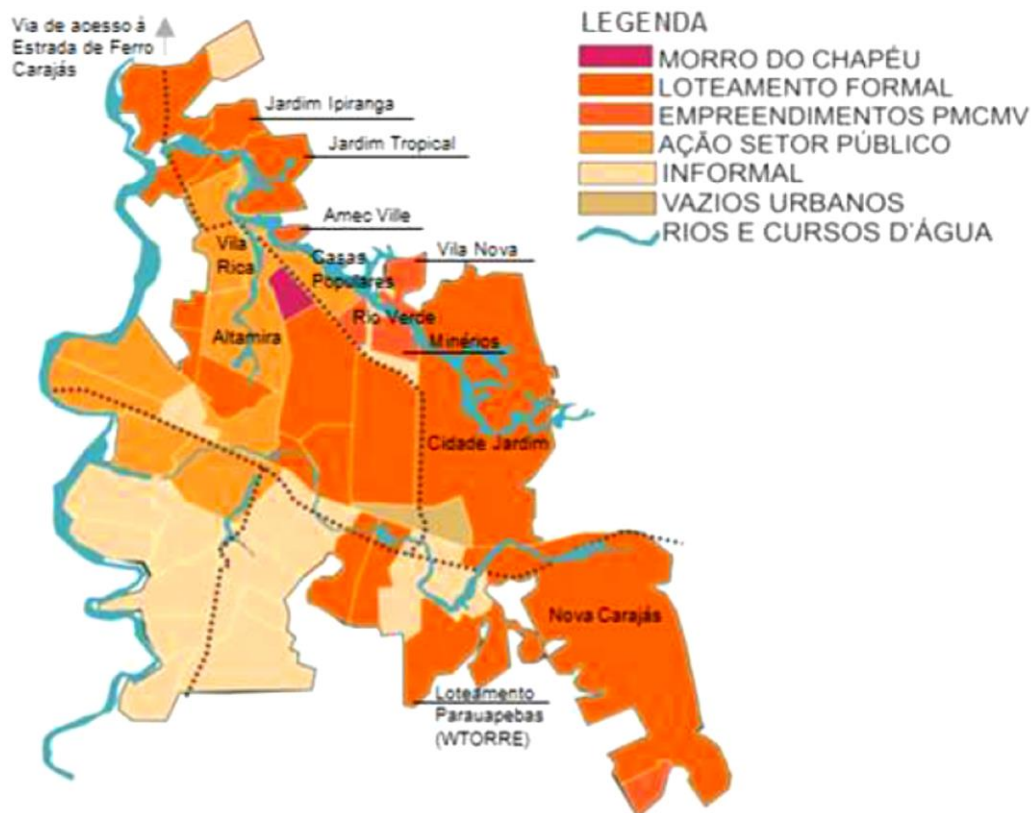
Safadi (2017) cita que a consultoria *Urban Systems*, publicou em 30 de abril de 2014 na revista Exame, uma pesquisa, intitulada “*As melhores cidades para os negócios*”, onde em uma escala de 0 a 14, Parauapebas, aparece em primeiro lugar com nota 7,46. Tal fato, indica que a mesma ainda é considerada como um atrativo de ocupação no Estado, motivado principalmente pelo potencial mineral instalado.

Comparando-se o zoneamento da Fig. 15 com a análise de Melo e Cardoso (2014) observa-se com base no produto gerado, ser possível decidir por ações mais efetivas de controle. A Fig. 17 retrata fases de ocupação espontânea, e posterior regularização urbanística e fundiária dos núcleos pioneiros (até 1985); expansão do núcleo pioneiro e origem das primeiras ocupações periféricas (de 1986 a 1995); ocupação informal, associada ao acelerado processo de expansão periférica (de 1996 a 2005); e abertura de loteamentos formais de médio e alto padrão (2005 até o momento), destacando os decorrentes do Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV) e de bairros planejados de médio e alto padrão (Melo e Cardoso 2014). É preocupante a destinação de uma ocupação informal, em uma área de elevado risco.

Desta forma, seguindo a abordagem de Furtado e Ponte (2014), é necessário que se continue e amplie a realização de estudos pautados na relação ambiente-expansão urbana, visando mitigar as fragilidades/vulnerabilidades existentes e aproveitar as potencialidades ambientais, resultantes de uma estrutura diversificada dos compartimentos topográficos, contribuindo assim para a melhor gestão de risco por parte do órgão municipal e estado.



(a)



(b)

Figura 17: Área urbanizada de Parauapebas: (a) Períodos de ocupação; (b) Tipologia de ocupação. Fonte: Melo e Cardoso (2014, pág. 8).

6 CONCLUSÃO

O trabalho apresentou como resultado, o mapa de suscetibilidade de movimentos gravitacionais de massas para o centro urbano do município de Parauapebas, PA, elaborados segundo a técnica de inferência geográfica *fuzzy overlay gama*.

Com relação ao método *fuzzy gama*, a transformação dos valores qualitativos para valores numéricos tornou possível o tratamento das incertezas inerentes a fenômenos naturais, como as transições graduais entre as classes estudadas. De modo geral, a atividade representou um profícuo exercício metodológico, que possibilitou a verificação do potencial e da flexibilidade do método *fuzzy gama* em estudos ambientais. Este método apresentou os resultados satisfatórios e apresenta um grande potencial de desenvolvimento, com possibilidades de uso de diferentes regras de composição de operadores, que podem fornecer diferentes interpretações sobre o fenômeno estudado.

É importante também observar a contribuição do AHP no tratamento das incertezas nesse trabalho para ponderar os valores empíricos, uma vez que estabelece, com base na opinião de especialista, os pesos de cada variável na composição final de um indicador ambiental. Nesse trabalho, nota-se nesses pesos, a importância dada às áreas de risco, declividade, pontos de deslizamento e corte em talude, uma vez que esses fatores contribuem significativamente para os movimentos de massa nas áreas urbanas no município.

Conclui-se que a aplicabilidade do modelo *fuzzy* na suscetibilidade e zoneamento a movimentos de massa é eficiente, fácil e de baixo custo, visto que a disponibilidade de dados gratuitos em plataformas de livre acesso possibilita, assim, ferramenta acessível para ser utilizada para o planejamento e gestão dos deslizamentos, com o objetivo de evitar a perda de vidas e de materiais.

Logo, é importante a elaboração desse tipo de mapeamento para os municípios brasileiros como parte das ferramentas indispensáveis aos órgãos responsáveis pela gestão e monitoramento de deslizamentos.

REFERÊNCIAS

- Alcântara-Ayala I. 2002. Geomorphology, Natural Hazards, Vulnerability and Prevention of Natural Disasters in Developing Countries. *Geomorphology*, 47: 2-4, p. 107-124.
- Bitar O. Y. (Coord.). 2014. Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações 1:25.000: nota técnica explicativa. São Paulo, IPT, 50p. (IPT Publicação 3016).
- Bonham-Carter G. F. 1994. *Geographic information systems for geoscientists: Modelling with GIS*. Ontario, Pergamon, 416 p.
- Brasil. 2012. Anuário brasileiro de desastres naturais. Brasília, Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres – CENAD, Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Defesa Civil. Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres.
- Brasil. Lei no 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil – SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil – CONPDEC. Disponível em: www.planalto.gov.br. Acesso em: 05/50/2021
- Câmara G. et al. 2004. Técnicas de Inferência Geográfica. In: Druck S. et al. (Org.). *Análise Espacial de Dados Geográficos*. Brasília, EMBRAPA, 250 p.
- Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM. 2020. Setorização de áreas em alto e muito alto risco a movimentos de massa, enchentes e inundações: Parauapebas, Pará. Belém, 24p. Disponível em: rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/18347.2. Acesso em: 05/05/2021
- Companhia Paraense de Turismo - PARATUR. 2012. Inventário da obra turística: Parauapebas. Belém, 102p.
- Cox, E. 1995. *Fuzzy logic for business and industry*. Massachusetts, Charles River Media Inc, 601 p.
- Cristo L. D. A., Santos M. A., Matlaba V. J. 2022. Land-Use Changes and Socioeconomic Conditions of Communities along the Carajás Railroad in Eastern Amazonia. *Sustainability*, 14, 5132. Disponível em: doi.org/10.3390/su14095132. Acesso em: 18/02/2022
- Defesa civil dispara alerta laranja para cheia do rio de Parauapebas no sudeste do Pará. O Liberal, Belém, 5 jan. 2022. Disponível em: www.oliberal.com/para/defesa-civil-dispara-alerta-laranja-para-cheia-dorio-de-parauapebas-no-sudeste-do-para-1.479244. Acesso em: 09/04/2022
- Drago T. K. C. et al. 2018. Geotecnologias aplicadas ao mapeamento da vulnerabilidade ambiental: estudo de caso do município de Parauapebas, sudeste paraense. In: *Anais... COBRAC*, Florianópolis, p. 1-11.
- Faria M. S. C. & Fornasari Filho N. 2018. Relevo e dinâmica superficial, *Geologia de engenharia e Ambiental*, p. 205-228.
- Fell R. et al. 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102, n. 3-4, p. 85–98.

- Ferreira M. C. 2014. Iniciação à análise geoespacial: teoria, técnicas e exemplos para geoprocessamento. São Paulo Editora UNESP, 344 p.
- Furtado A. M. M. & Ponte F. C. 2014. Ocupação e impactos decorrentes da expansão urbana da cidade de Parauapebas, Estado do Pará. *Revista do Instituto Histórico e Geográfico do Pará*, 1(01): 123-134. Disponível em: doi.org/10.17553/2359-0831/ihgp.n1v1p123-134. Acesso em: 09/11/2021
- Highland L. M. & Bobrowsky P. 2008. *O Manual de Deslizamento: um guia para a compreensão de deslizamentos*. Reston, Virginia, U.S. Geological Survey, 176 p.
- Infanti Junior N. & Fornasari Filho N. 1998. Processos de Dinâmica Superficial. In: Oliveira A. M. S. & Brito S. N. A. (Eds.). *Geologia de Engenharia*. São Paulo, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), cap. 9, p.131-152.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. 2011. *Base de informações do Censo Demográfico 2010: resultados do universo por setor censitário*. Rio de Janeiro, 125 p.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. 2010. *Dados estatísticos municipais de Parauapebas - PA*. Disponível em: www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pa/parauapebas.html. Acesso em: 09/11/2021
- Jackson L. E., Bobrowsky P. T., Bichler A. 2012. Identify cation, maps and mapping: Canadian technical guidelines and best practices related to landslides: a national initiative for loss reduction. Ottawa, Geological Survey of Canada - GSC, 33 p.
- Kobiyama M. et al. 2006. *Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos*. Curitiba, Organic Trading, 109 p.
- Kohagura T. 2007. *Lógica Fuzzy e suas aplicações*. 49 f. Monografia (Trabalho de Conclusão), Departamento de Computação da Universidade Estadual de Londrina, Londrina – PR.
- Lanzillotti R. S. & Lanzillotti H. S. 2014. *Lógica fuzzy – uma abordagem para reconhecimento de padrão*. Jundiaí, Paco Editorial, 188 p.
- Lima M. L. S. et al. 2021. Vulnerability and socio-ecological risks: an integrated perspective of risks in Guaratiba (Rio de Janeiro - Brazil). *Soc. Nat.*, v. 33, e58841. doi.org/10.14393/SN-v33-2021-58841
- Lisboa, E. G. et al. 2020. Fuzzy-Probabilistic Model for a Risk Assessment of Groundwater Contamination: Application to an Urban Zone in the City of Belém, Pará, Brazil. *Water*, 12, 1437. doi.org/10.3390/w12051437
- MAPBIOMAS. 2021. *Alerta 6.0 - Sistema de Validação e Refinamento de Alertas de Desmatamento com Imagens de Alta Resolução*. Disponível em mapbiomas.org.
- Marcelino E. V. 2008. *Desastres naturais e geotecnologias: conceitos básicos*. Santa Maria, CRS/INPE, 2008, 36 p.
- Melo A. C. & Cardoso A. C. 2014. Cidade para quem? O descompasso entre políticas ambientais e políticas urbanas na periferia do capitalismo. In: *Anais da APPUrbana*, Belém, p. 1-19.

- Moreira F. R. S. 2002. Uso da avaliação de técnicas de integração e análise espacial de dados em pesquisa mineral aplicadas ao planalto de Poços de Caldas. 200 f. Dissertação (Mestrado), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- Parauapebas. Coordenadoria Municipal de Defesa Civil - COMDEC. 2013. [Sem Título]. Acervo fotográfico. (Foto: Pedro Jaques).
- Pfaltzgraff P. A. S. 2007. Mapa de susceptibilidade a deslizamentos na região metropolitana do Recife. 151 f. Tese (Doutorado), Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco.
- Pinese Júnior J. F. & Rodrigues S. C. 2012. O método de análise hierárquica – AHP – como auxílio na determinação da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Piedade (MG). *Revista do Departamento de Geografia*, 23, 2012, p. 4–26.
- Pinheiro R. V. L. 1997. Reactivation history of the Carajás and Cinzento strike-slip systems, Amazon, Brazil. 408 f. Tese (Doutorado), University of Durham, England.
- Saaty R. W. 1987. The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, Oxford, 9 (3-5): p. 161-176, 1987. doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8
- Safadi S. O. 2017. Ocupação urbana, redes sociais e territorialização da resistência: o caso de Aparecida de Goiânia, Brasil. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 9(1): 52+97.
- Santos R. F. 2005. Planejamento Ambiental: teoria e prática. São Paulo, Oficina de Textos.
- Shahabi H. et al. 2014. Landslide susceptibility mapping at central Zab basin, Iran: A comparison between analytical hierarchy process, frequency ratio and logistic regression models. *CATENA*, 115, p. 55-70. doi.org/10.1016/j.catena.2013.11.014
- Silva C. A. & Nunes F. P. 2009. Mapeamento de vulnerabilidade ambiental utilizando o método AHP: uma análise integrada para suporte à decisão no município de Pacoti/CE. In: 14., Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, INPE, p. 5435-5442.
- Silva Junior C. H. L. 2015. Lógica Fuzzy e Processo Analítico Hierárquico (AHP) aplicados ao Zoneamento de Áreas Suscetíveis a Deslizamentos: Uma Revisão. *Revista Monografias Ambientais*, 14(3): 42-58. doi.org/10.5902/2236130818976
- Siqueira G. W., Aprile F., Miguei A.M. 2012. Diagnóstico da qualidade da água do rio Parauapebas (Pará - Brasil). *Acta Amazônica*, 42: 413-422.
- Souza D. F. et al. 2013. Aplicação do método AHP-Fuzzy. Guarapuava - PR, UNICENTRO, p. 104-115.
- Tavares F. M. 2014. Programa Geologia do Brasil - PGB: Rio Verde - SB.22-Z-A-III, Estado do Pará - Carta Geológica. Belém, CPRM, 1 mapa colorido, Escala 1:100.000.
- Teixeira S. G., Bandeira I. C. N., Fonseca D. D. F. 2019. Caracterização das tipologias de risco geológico identificadas no Estado do Pará no período de 2012 a 2018, p. 253-269.
- Tominaga L. K., Santoro J., Amaral R. 2015. Desastres Naturais: conhecer para prevenir. São Paulo, Instituto Geológico, 196 p. (Contribuições à Geologia da Amazônia, v. 11).

APÊNDICE A - TABELA DE BAIRROS DO MUNICÍPIO DE PARAUPEBAS

Número	Nome do Bairro	Número	Nome do Bairro
1	Águas Lindas	48	Novo Brasil
2	Altamira	49	Novo Horizonte
3	Alto Boa Vista	50	Novo Viver
4	Alto Bonito	51	P. Moveleiro
5	Amazonas	52	P.dos Carajás 1
6	Apoena	53	P.dos Carajás 2
7	B.da FAP	54	P.dos Carajás 3
8	B.dos Minérios	55	Palmares Sul
9	Bairro da Paz	56	Panorama
10	Beira Rio	57	Paraíso
11	Beira Rio 2	58	Placemark
12	Bela Vista	59	Pq.das Nações 1
13	Betânia	60	Pq.das Nações 2
14	Bom Jesus	61	Primavera
15	Brasília	62	R.Amec Ville
16	C.Populares 1	63	R.Porto Seguro
17	C.Populares 2	64	R.Vale dos Carajás
18	Caetanópolis	65	R.Vila Nova
19	Califórnia	66	Raio de Sol
20	Casa Branca	67	Res. Bambuí
21	Céu Azul	68	Rio Verde
22	Ch.da Lua	69	Santa Luzia
23	Ch.das Estrelas	70	São Lucas 1
24	Ch.do Sol	71	São Lucas 2
25	Cidade Jardim	72	Talismã
26	Cidade Nova	72	União
27	Explanada	74	Vale do Sol
28	Guanabara	75	Vila Rica
29	J. Ipê		
30	J. Ipiranga		
31	J. Tropical 1		
32	J. Tropical 2		
33	J.América		
34	J.América 2		
35	Jardim Canadá		
36	Jardim Eldorado		
37	Jardim Planalto		
38	Liberdade 1		
39	Liberdade 2		
40	Linha Verde		
41	Maranhão		
42	Maranhãozinho		
43	Montes Claros		
44	Morada Nova		
45	Nova Carajás		
46	Nova Vida 1		
47	Nova Vida 2		

APÊNDICE B - TABELA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE DESLIZAMENTO

Pontos de Deslizamento	UTM_X	UTM_Y
1	623145.0001	9330246
2	621438	9327310
3	621388	9327251
4	623071	9330316
5	621861	9327639
7	623441	9330375
8	623417	9330330
9	623176	9330278
10	621376	9327590
11	621349.6695	9327435.382
12	621365.4939	9327445.409
13	622407	9334676
14	622363.8572	9326769.772
15	620720.2643	9327347.513
16	623494.4596	9330183.853

APÊNDICE C - MATRIZ DE CÁLCULO DE RAZÃO DE COERÊNCIA AHP.

DECLIVIDADE (V1)	DECLIVIDADE (V1)	GEOLOGIA (V2)	SETORES DE RISCO (V3)	PEDOLOGIA (V4)	CORTE DE TALUDE (V5)	DESLIZAMENTO (V6)	GEOMORFOLOGIA (V7)	PESOS FINAIS
1,00	4,00	0,25	4,00	2,00	0,25	2,00	0,1403	
0,25	1,00	0,20	1,00	0,33	0,20	0,50	0,0434	
4,00	5,00	1,00	5,00	4,00	1,00	5,00	0,3051	
0,25	1,00	0,20	1,00	0,33	0,20	0,50	0,0434	
1,00	3,00	0,25	3,00	1,00	0,25	1,00	0,1013	
4,00	5,00	1,00	5,00	4,00	1,00	4,00	0,2940	
0,50	2,00	0,20	2,00	1,00	0,25	1,00	0,0765	
							1,0039	
	AW1	AW2	AW3	AW4	AW5	AW6	AW7	
	0,99	0,31	2,38	0,31	0,73	2,31	0,56	
N	1/N	AW1/W1	AW2/W1	AW3/W1	AW4/W1	AW5/W1	AW6/W1	AW7/W1
2	0,00	7,07	7,23	7,81	7,23	7,18	7,84	7,27
3	0,33							
4	0,25		$\lambda_{(max)}$	7,38				
5	0,20							
6	0,17		IC	0,06				
7	0,14							
RC	0,047	CORRETO						