

ÁREAS SUSCETÍVEIS A MOVIMENTOS DE MASSA EM PARAUPEBAS (PA): ZONEAMENTO POR LÓGICA FUZZY E ANÁLISE GEOESPACIAL

Luíza Lara COIADO¹

Aline Maria Meiguins de LIMA²

RESUMO

O crescimento acelerado de cidades sem planejamento urbano estratégico tem apresentado problemas na prevenção de desastres resultantes de movimentos de massas e inundações. Este é o caso do município de Parauapebas (Pará) onde as características naturais e de ocupação do solo urbano, tornou a cidade vulnerável à ocorrência de desastres naturais. Com este objeto de estudo, a suscetibilidade a movimentos de massa no município de Parauapebas (Pará) foi avaliada em ambiente SIG (Sistemas de Informação Geográfica), utilizando a Lógica *Fuzzy* e o Processo Analítico Hierárquico. Para isso, foram considerados os vetores de declividade, geomorfologia, litologia, pedologia, pontos de deslizamento e cortes em talude, tratados utilizando a análise multivariada ponderada. Como resultado, foi gerado o mapa de Suscetibilidade a Movimentos de Massa para o centro urbano do município de Parauapebas pela inferência *fuzzy gamma*, que definiu as zonas mais críticas, onde o planejamento urbano e o processo de gestão de riscos devem atuar, com o objetivo de evitar a perda de vidas e materiais, no apoio a implantação do plano diretor municipal.

Palavras-chave: Movimentos de Massa. Planejamento urbano. Suscetibilidade.

¹ Geóloga pela Universidade Federal do Pará (UFPA) - Analista da Secretaria de Estado da Saúde do Pará (SESPA).

² Doutora, Docente na Universidade Federal do Pará (UFPA), Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Gestão de Risco e Desastres Naturais na Amazônia (PPGGRD).

LANDSLIDES SUSCEPTIBLE AREAS IN PARAUAPEBAS (PA): ZONING BY FUZZY LOGIC AND GEOSPATIAL ANALYSIS

ABSTRACT

The accelerated growth of cities without strategic urban planning became a problem, enabling the occurrence of natural disasters such as mass movements and floods. That is the case of the municipality of Parauapebas (Pará). The natural characteristics and urban development made the city vulnerable to dangerous situations. With this object of study, the susceptibility to mass movements in the municipality of Parauapebas (Pará) was evaluated in a GIS (Geographic Information Systems) environment, using Fuzzy Logic and the Hierarchical Analytical Process. For this, were considered and treated, using weighted multivariate analysis: slope vectors, geomorphology, lithology, pedology, landslide points, and slope cuts. The Susceptibility to Mass Movements map produced for the urban center of the municipality of Parauapebas by fuzzy gamma inference defined the most critical zones. In these areas, the urban planning and the risk management process should act to avoid the loss of lives and materials in supporting the implementation of the municipal master plan.

Keywords: Mass Movements. Urban planning. Susceptibility.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o crescimento de áreas urbanas mostrou um desenvolvimento significativo de 1940 a 2010, com um incremento de 254% no número de municípios, com sucessivos desmembramentos, principalmente a partir de 1991 (Fernandes, 2018). Esse impulso foi influenciado por políticas públicas de incentivos econômicos voltadas para o setor agropecuário e mineral, especialmente na Amazônia (Lobão; Staduto, 2019), onde ocorreu o exemplo da “desconcentração concentrada do dinamismo econômico” (Rolnik; Klink, 2011), com algumas cidades se tornando polos locais, com potencial de formação de regiões metropolitanas.

Na região norte, com destaque no Sudeste paraense, a evolução econômica não representou o crescimento equilibrado em termos espaciais e setoriais, sem produzir a modernização destes espaços, constituindo muito mais “uma fragmentação produtiva e heterogênea em seus subespaços” (Moraes; Steinberger, 2019).

A consequência imediata da urbanização sem associação com o planejamento é a instalação de situações que caracterizam zonas de risco. Este é associado às definições de perigo, exposição e vulnerabilidade, sendo delineado por vários fatores (ex: culturais, econômicos dos residentes urbanos, capacidade técnica e institucional das prefeituras, ambiente construído, infraestrutura); a vulnerabilidade urbana é definida por fatores ou processos físicos, demográficos, econômicos e ambientais, regulados pelo grau de gestão das cidades, que diretamente modulam sua resiliência (Sherbinin *et al.*, 2007; Gencer *et al.*, 2018).

As condições de risco geológico (movimentos de massa, quedas, tombamentos e rolamentos de rocha ou ao desenvolvimento de feições erosivas) são comumente encontradas em áreas onde existem formas de relevo definidas por declividades variáveis, onde o avanço do espaço urbano (com desmatamento das encostas) encontra nesses espaços um potencial de ocupação, mesmo entendendo as condições de instabilidade natural existentes (Gariano; Guzzetti, 2016; Meerow *et al.*, 2016; Garcia *et al.*, 2020; Liu; Chen, 2020).

Os deslizamentos de massa caracterizam situações de risco geológico, avaliadas principalmente em nível de macroescala, com o objetivo de identificar e hierarquizar os elementos que condicionam o processo, empregando técnicas de mapeamento (Kühnl *et al.*,

2023).

Estes podem envolver ou não condições de ameaça a vida, dependendo do ambiente onde ocorrem. Assim, pode-se ter uma condição instalada em uma encosta vegetada que ocasione um dano estrutural a uma estrada ou perda de área florestada, impactando os ecossistemas locais, ou situações em que sejam observados danos diretos a ambientes com ocupação humana.

A análise geoespacial, por meio de sensores remotos, passa a ser um elemento fundamental para o processo de reconhecimento destes processos, pois consegue traduzir (e interagir) um conjunto amplo de variáveis, possibilitando assim a geração de modelos e simulações que possibilitam a realização de diagnósticos atuais e prospectivos (Martire *et al.*, 2012; Ghorbanzadeh *et al.*, 2019; Skrzypczak *et al.*, 2021).

A modelagem geoespacial é ampla em termos de técnicas e procedimentos (Szwagrzyk *et al.*, 2018; Van Dao *et al.*, 2020), e a análise a partir de múltiplos critérios tem sido uma alternativa utilizada pela sua aplicabilidade a várias demandas (Stanley; Kirschbaum, 2017; Biswas *et al.*, 2022). A lógica de decisão *fuzzy* faz parte deste contexto, sendo um método de classificação contínuo, no qual cada valor de uma variável tem maior afinidade a pertencer a uma classe “A” e menor afinidade a pertencer a uma classe “B” ou “C” do mesmo conjunto, onde os limites espaciais são representados por zonas transicionais, e não por linhas demarcatórias rígidas (Ferreira, 2014; Li *et al.*, 2022; Nwazelibe *et al.*, 2023).

A utilização do mapeamento geoespacial possibilita a integração do planejamento urbano com o controle e redução das áreas de risco geológico. A pesquisa apresenta uma aplicação desta ferramenta com a avaliação da suscetibilidade aos movimentos de massa no centro urbano de Parauapebas (PA), onde o crescimento acelerado aliado à ocupação desordenada de encostas tem colocado a população residente em condição de vulnerabilidade.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo (145 km²) compreende o centro urbano do município de Parauapebas, no Estado do Pará (Fig. 01). 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.

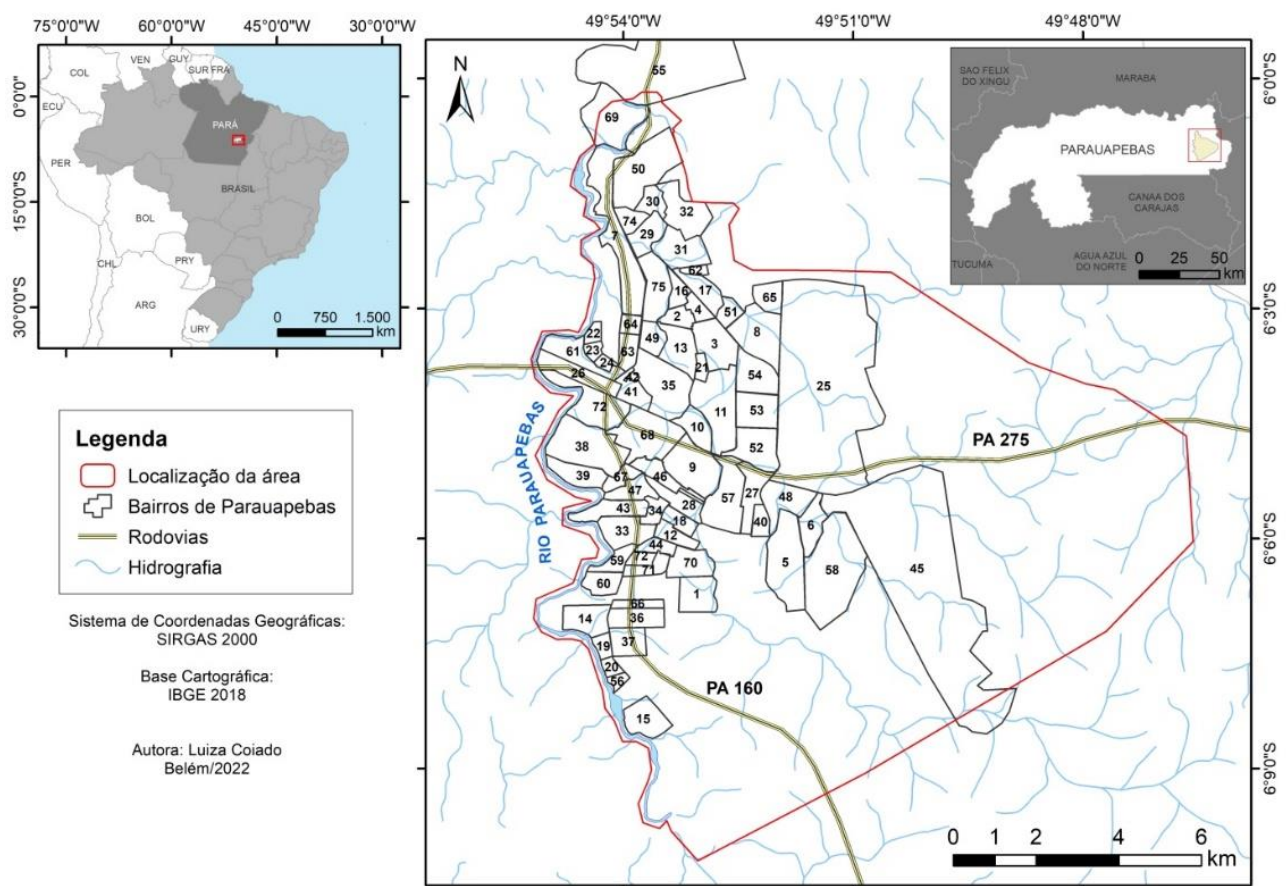


Figura 01 - Mapa de localização da área no município de Parauapebas, PA, Brasil.

Fonte: Coiado (2022).

Civil do Município de Parauapebas (COMDEC). No formato de dados vetoriais e matriciais foram adotados: Geomorfologia - padrões de relevo, IBGE (2018a), em polígonos, na escala de 1:250.000; Pedologia - tipos de solo, IBGE (2018b), em polígonos na escala de 1:250.000; Geologia - litologia da folha Rio Verde (SB-22-Z-A-III), gerados pela CPRM na forma de polígonos, na escala de 1:100.000 (Tavares, 2014); Setorização de áreas de ocorrência de movimentos de massa em Parauapebas (Pará), elaborados pela CPRM na em polígonos, na escala de 1:1.000 (Fonseca *et al.*, 2019); Modelo Digital de Terreno (MDT) - dado *raster* (com informações altimétricas e resolução espacial 1:1.000) e Ortofotos - fotografias aéreas digitais coloridas (escala 1:1.000) disponibilizadas pelas Defesa Civil de Parauapebas (COMDEC, 2018).

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. 02). Foram utilizados os levantamentos de campo da CPRM e Defesa Civil no município de Parauapebas (período de 15 a 23 de maio 2019, 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).

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

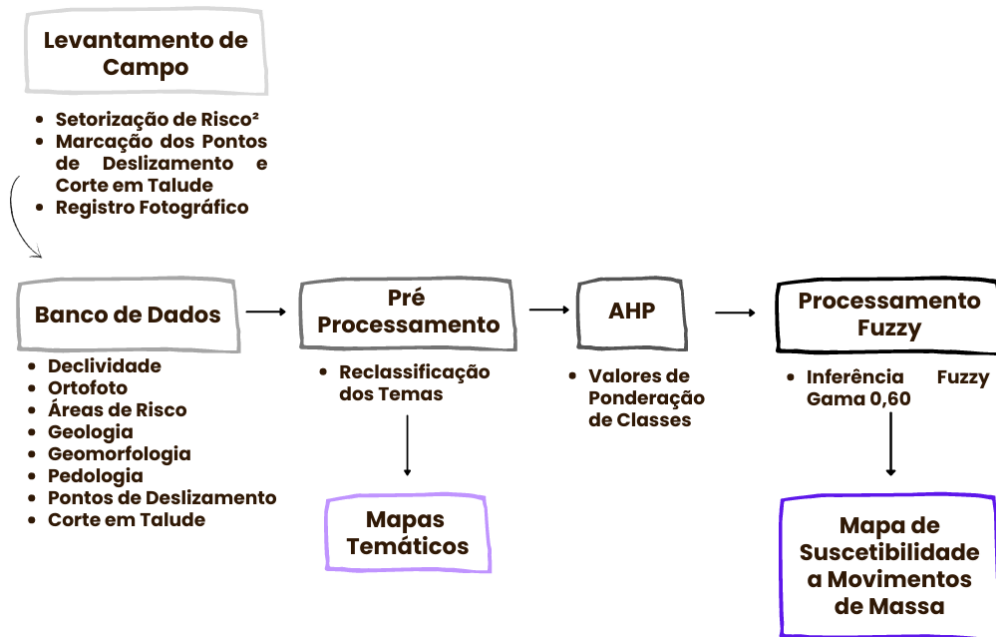


Figura 02 - Fluxograma da metodologia utilizada na elaboração do trabalho.

Fonte: Coiado (2022).

2.1 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.

A classificação do parâmetro de declividade adotou os limites de: “0-10%”, “10-15%”, “15-20% e “20-78%”. O último intervalo com maior range, foi definido em considerações às observações em registros históricos ocorridos na região.

O tema setor de risco (para movimentos de massa) foi classificado em: a) alto, b) muito alto e c) sem registro. Estes levaram em consideração os registros mapeados na região (cicatrizes de deslizamento e locais de instabilidade recentes) sendo caracterizados nas condições de: 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 01 mostra a associação entre os relacionamentos de variáveis e o grau de potencialidade de deslizamentos. Os resultados para cada variável temática são apresentados na Tabela 02, os valores foram definidos pelos autores. A Figura 03 ilustra a representação final, associada à reclassificação.

Tabela 01 - Classificação quanto ao potencial.

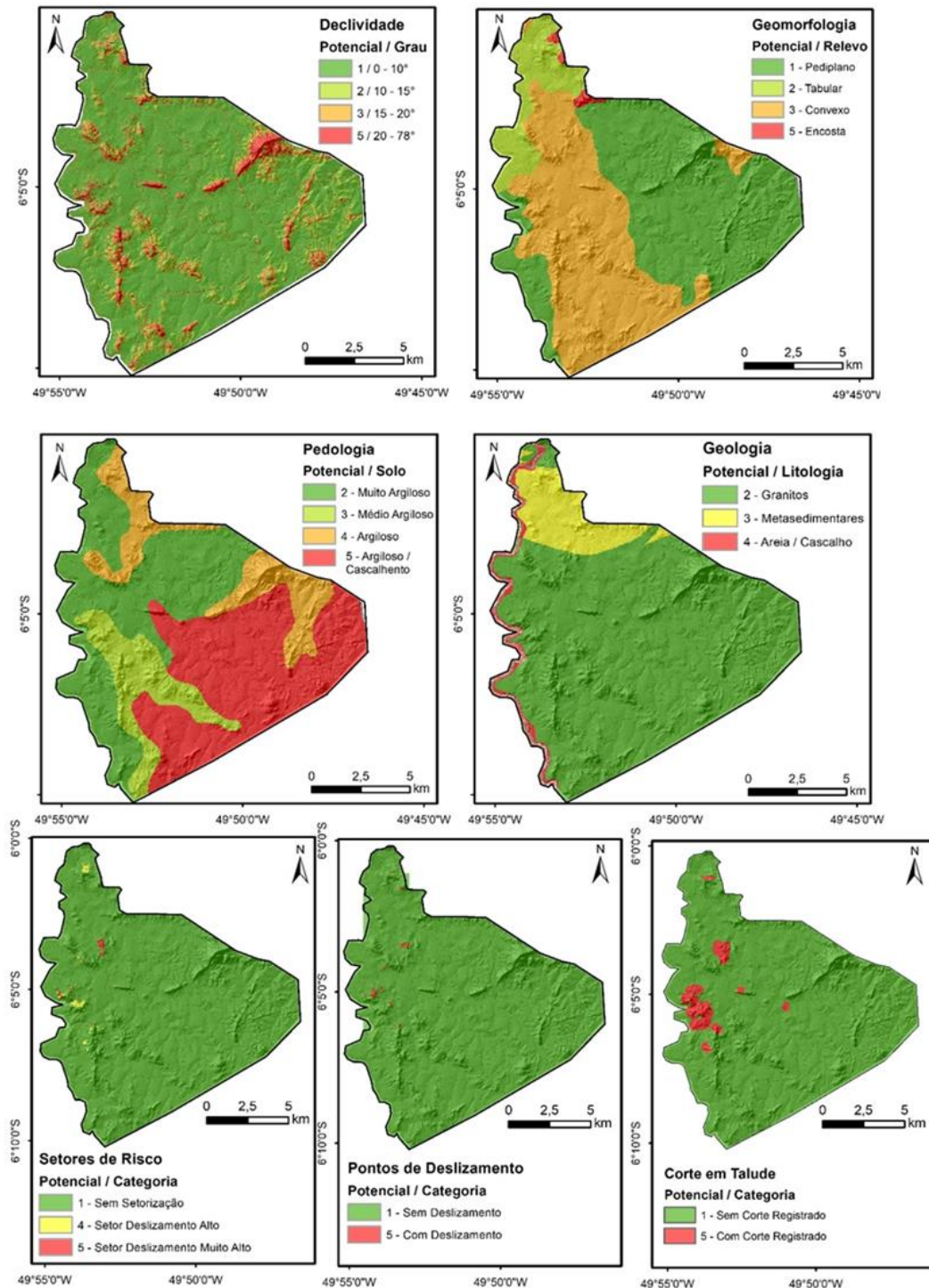
Classificação	Potencial
Muito Baixo a Nulo	1
Baixo	2
Moderada	3
Alto	4
Muito Alto	5

Fonte: Coiado (2022).

Tabela 02 - Potencial das variáveis dos temas: (a) declividade; (b) geologia; (c) setores de risco; (d) pedologia; (e) geomorfologia; (f) corte de talude; (g) deslizamento.

Declividade (a)	Potencial (V1)
0-10	1
10-15	2
15-20	3
20-78	5
Geologia (b)	Potencial (V2)
Areia/cascalho	4
Metasedimentares	3
Metamórficas	2
Granitos	2
Setores de Risco (c)	Potencial (V3)
Deslizamento muito alto	5
Deslizamento alto	4
Sem deslizamento	1
Pedologia (d)	Potencial (V4)
Argilosa/cascalhenta	5
Argilosa	4
Média argilosa	3
Muito argilosa	2
Corte de Talude (f)	Potencial V5
Com	5
Sem	1
Deslizamento (g)	Potencial (V6)
Com	5
Sem	1
Geomorfologia (e)	Potencial (V7)
Pediaplano	1
Tabular	2
Convexo	3
Encosta íngreme	5

Fonte: Coiado (2022).



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

Figura 03 - Mapas temáticos para declividade, geomorfologia, pedologia, geologia, setores de risco, pontos de deslizamento e corte em talude.

Fonte: Coiado (2022).

2.2 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.

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 o grau de influência entre as variáveis analisadas. No segundo estágio, as comparações entre os temas foram registradas em matrizes na forma de frações entre 1/5 (0,20) a 5 (Tabela 03). 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 03 - 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

Fonte: Adaptado de Saaty (1987).

Tabela 04 - 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

Fonte: Adaptado de Saaty (1987).

De acordo com a metodologia de Saaty (1987), os valores de cada célula da Tabela 03 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

04).

Essa condição perdurou até o ano de 2012, quando ocorre uma nova alteração. Nela se instituiu o novo – e atual – Código Florestal (Lei nº 12.651). As mudanças foram geradas com forte apoio de setores vinculados ao agronegócio. Do lado oposto, ocorreram muitas críticas, sobretudo dos movimentos ambientalistas e sociais, dos povos indígenas e da comunidade acadêmica ligada a temática ambiental.

O cálculo do λ_{max} indica o valor máximo do autovalor λ , e é obtido pela equação 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, $n = 7$). Após o cálculo dos pesos de cada fator foi necessária a avaliação de sua aceitabilidade ou Razão de Consistência (RC) que 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 2. O Índice Randômico (IR) é extraído da tabela de valores para matrizes quadradas de ordem n estabelecida pelo *Oak Ridge National Laboratory*, EUA, segundo Saaty (1987). Dessa forma o RC = 0,047, sendo o valor menor que 0,10, portanto, considerado correto segundo a escala de Saaty.

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

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (2)$$

2.3 PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO - AHP

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

No processamento efetuado, a AHP gerou por álgebra de mapas um resultado

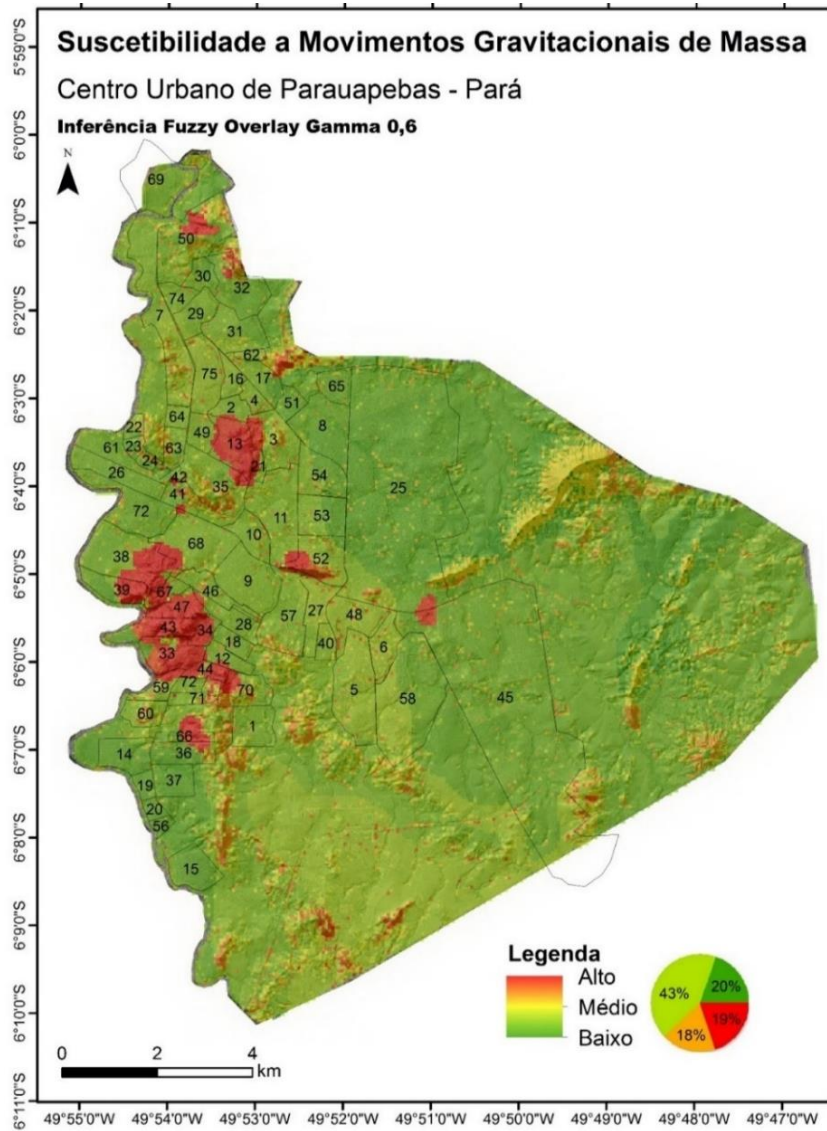
comparativo com os obtidos por lógica *fuzzy*. Sendo o mais adequado ao observado nos levantamentos de campo e a cartografia gerada pela via álgebra pela AHP foi o *fuzzy overlay gamma*. O operador *fuzzy gamma* é definido por dois termos, um produto algébrico *Fuzzy* e uma soma algébrica *Fuzzy* dados pela equação 3.

$$\mu = (\text{soma algébrica } fuzzy)^\gamma \times (\text{produto algébrico } fuzzy)^{1-\gamma} \quad (3)$$

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). 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. 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.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O mapa de suscetibilidade a movimentos de massa foi gerado pela inferência *fuzzy overlay*, com valor *gamma* de 0.6 (Fig. 04), 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.



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

Figura 04 - Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa para o centro urbano do município de Parauapebas.

Fonte: Coiado (2022). Denominação dos bairros adaptado de Parauapebas (2022).

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.

As áreas de suscetibilidade muito baixa e baixa se distribuem principalmente nas regiões leste e sudeste. 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. As zonas críticas se localizam principalmente na porção oeste do centro urbano de Parauapebas, 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. Esse fato evidencia que a ação antrópica, conjuntamente aos demais fatores em análise, contribuem diretamente para o aumento da probabilidade de ocorrência dos movimentos de massa nessas regiões.

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 contribuiu significativamente para a ocorrência de deslizamentos na região (Fig. 05).

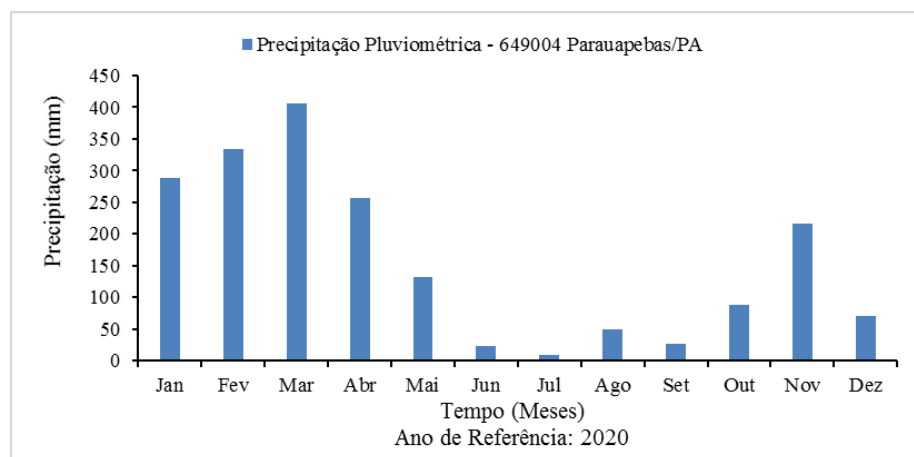


Figura 05 - Médias mensais de pluviosidade no município de Parauapebas no ano de 2020.

Fonte: ANA/SNIRH (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. Destacam-se como exemplos já efetuados: Furtado e Ponte (2014) que apresentam a visão da expansão da ocupação no município; Drago *et al.* (2018) que 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) que apresentam as mudanças nas formas de uso da terra e suas consequências socioambientais, neste contexto de integração dado pela ferrovia.

Vieira (2019) ao descrever a evolução da região do sudeste paraense cita que na década de 80 a então Companhia Vale do Rio Doce (CVRD):

optou por construir, do lado de fora do seu Projeto, um núcleo habitacional chamado “Parauapebas”, devido ao nome do rio que separava sua área da nova cidade. O núcleo fora dotado de água tratada, esgotos coletados, luz, hospital (da Fundação SESP), escola (Euclides Figueiredo) e instalações de Subprefeitura, delegacia e cadeia”, com o objetivo de, dentre outras coisas, criar uma cidade que abrigasse a população que normalmente se instala em redor de um grande projeto; instalar todas as repartições de um município, pois, na época, tudo o que se precisava só existia em Marabá, distante mais de 200 km de Carajás (Vieira, 2019, p. 295).

Da proposta de um início planejado, a cidade foi se modificando, principalmente em função das tensões que se davam na região decorrentes da atividade mineral, e que permanecem presentes até a atualidade. Kzam *et al.* (2021) destaca que “embora o crescimento de Parauapebas nas últimas décadas tenha sido admirável, o município padece de problemas como a violência urbana, favelização e precariedade do saneamento básico”.

Lima e Silva (2017) apontam que no estado do Pará dois municípios - Parauapebas

(criado em 1988) e Canaã dos Carajás (criado em 1994) - são responsáveis por grande parte da balança comercial do estado, e garantem sua representatividade mundial. Desta forma, existe o confronto entre uma cidade em expansão sem planejamento e um município, cuja arrecadação permitiria um investimento no plano diretor urbano, visando um município moderno, atuante nas metas de sustentabilidade ambiental. Este já existe quanto mecanismo institucional pela Lei Complementar n. 024 de 05 de janeiro de 2021 (que institui o Plano Diretor do Município de Parauapebas), alterada pela Lei Complementar n. 029 de 05 de outubro de 2022.

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.

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.

Esse argumento é reforçado pelo que aponta o próprio plano diretor do município (Lei Complementar n. 024 de 05 de janeiro de 2021), que no Art. 44, cita no inciso I, que as Áreas Especiais de Interesse Social (ZEIS 1) são as “correspondentes as áreas públicas ou particulares ocupadas por assentamentos de população de baixa renda consolidadas até 31-12-2016, desde que não ofereçam riscos a permanência humana ou que possam ser requalificada”; e afirma no Art. 246 que o município deve implantar uma Política de Desenvolvimento Urbana Integrada com a Política de Gestão Ambiental voltada ao “planejamento com base em pesquisas e estudos sobre áreas de risco e incidência de desastres no território municipal” (Lei Complementar n. 024 de 05 de janeiro de 2021, Art. 246, alínea d), mantendo “a população informada sobre áreas de risco e ocorrência de eventos extremos, bem como sobre protocolo de prevenção e alerta, e sobre as ações emergenciais em circunstâncias de desastres” (Lei Complementar n. 024 de 05 de janeiro de 2021, Art. 246, alínea g).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação da suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massas para o centro urbano do município de Parauapebas (PA) por meio do método *fuzzy gama*, implicou na transformação de valores qualitativos para valores numéricos, o que tornou possível o tratamento das incertezas inerentes a fenômenos naturais, como as transições graduais entre as classes estudadas. 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 observar a contribuição do AHP no tratamento das incertezas, para ponderação dos valores empíricos, uma vez que estabelece os pesos de cada variável na composição final de um indicador ambiental. Este tipo de formulação de mapeamento é importante como parte das ferramentas indispensáveis aos órgãos responsáveis pela gestão e monitoramento de áreas de risco, possibilitando assim simulações continuadas e uma sistemática dinâmica de geração de cartas de risco.

A zona urbana da sede municipal de Parauapebas deve ter seu processo de expansão controlado, para que a intensificação do surgimento de feições de risco não se amplie, colocando a população local em uma condição de vulnerabilidade. Os bairros já instalados nessas zonas, precisam de monitoramento e acompanhamento para minimizar o efeito da degradação sobre essas áreas, com a implantação de novas moradias e desmatamento de áreas essenciais para manutenção das encostas nos locais de maior declividade.

5 REFERÊNCIAS

BRASIL. **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH)**: Mapa Interativo de Hidrotelemetria. Brasília - DF: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidrotelemetria/Mapa.aspx>. Acesso em: 22 ago. 2022.

BISWAS, N. K., *et al* . A dynamic landslide hazard monitoring framework for the Lower Mekong Region. **Frontiers in Earth Science**, Lausanne, Switzerland, v. 10, p. 01-15 2022. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/earth-science/articles/10.3389/feart.2022.1057796/full>. Acesso em: 20 abr. 2024.

BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic information systems for geoscientists: Modelling with GIS**. Ontario - Canadá: Pergamon, 1994, 416 p.

COIADO, L. L. **Zoneamento de áreas suscetíveis a deslizamentos: centro urbano de Parauapebas, Pará**. 2022. 50 f. Monografia (Graduação) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2022.

COORDENADORIA MUNICIPAL DE PROTEÇÃO E DEFESA CIVIL - DEFESA CIVIL DE PARAUPEBAS - COMDEC. **Base de informações altimétricas**. Modelo Digital de Terreno (MDT). Escala: 1:1.000, Ortofotos, Parauapebas - PA: COMDEC, 2018.

CRISTO L. D. A., *et al.* Land-Use Changes and Socioeconomic Conditions of Communities along the Carajás Railroad in Eastern Amazonia. **Sustainability**, Basel, *Switzerland*, v. 14, p. 01-22, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/9/5132>. Acesso em: 12 fev. 2024.

DRAGO T. K. C., *et al.* Geotecnologias aplicadas ao mapeamento da vulnerabilidade ambiental: estudo de caso do município de Parauapebas, sudeste paraense. **Anais do Congresso de Cadastro Multifinalitário e Gestão Territorial**, Florianópolis, Santa Catarina, v. 1, p. 01-11, 2018. Disponível em: <https://ocs.cobrac.ufsc.br/index.php/cobrac/cobrac2018>. Acesso em: 10 jan. 2024.

FERNANDES, P. H. C. O urbano brasileiro a partir das pequenas cidades. **Georaguaia**, Barra do Garças, v. 8, n. 1, p. 13-31, 2018. Disponível em: <<https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/geo/article/view/6981>>. Acesso em: 09 mar. 2024.

FERREIRA M. C. **Iniciação à análise geoespacial: teoria, técnicas e exemplos para geoprocessamento**. São Paulo - SP: Editora UNESP, 2014, 344 p.

FONSECA, D. D. F., *et al.*, **Setorização de áreas em alto e muito alto risco a movimentos de massa, enchentes e inundações: Parauapebas, Pará**. GEOSGB - Banco de dados de geoinformação do Serviço Geológico do Brasil, Belém - PA: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), 2019. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/18347.2>. Acesso em: 09 mar. 2024.

FURTADO A. M. M.; PONTE F. C. Ocupação e impactos decorrentes da expansão urbana da cidade de Parauapebas, Estado do Pará. **Revista do Instituto Histórico e Geográfico do Pará**, Belém, v. 1, n. 01, p. 123-134, 2014. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/233889478.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2023.

GARCIA, P. M., *et al.* Geomorphological index as support to urban planning. **Mercator**, Fortaleza v. 19, p. 1-24, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/mercator/a/CLZ7BKYST48dKfWQBCJw3bq/?lang=>>. Acesso em: 22 jan. 2024.

GARIANO, S. L.; GUZZETTI, F. Landslides in a changing climate. **Earth-Science Reviews**, London, v. 162, p. 227-252, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825216302458>. Acesso em: 20 jan. 2024.

GENCER, E., *et al.* Disasters and risk in cities. In: ROSENZWEIG, C., *et al.* (eds.). **Climate Change and Cities: Second Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network**. New York - EUA: Cambridge University, 2018, p. 61-98.

GHORBANZADEH, O., *et al.* Evaluation of different machine learning methods and deep-learning convolutional neural networks for landslide detection. **Remote Sensing**, Basel, Switzerland, v. 11, n. 2, p. 1-21, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/2/196>. Acesso em: 19 mar. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Dados estatísticos municipais**: Parauapebas - PA. 2021. Disponível em: www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pa/parauapebas.html. Acesso em: 12 nov. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Geomorfologia** - padrões de relevo, na escala: 1:250.000. 2018a. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/geomorfologia/mapas/escala_250_mil/. Acesso em: 15 dez. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Pedologia** - tipos de solo, na escala: 1:250.000. 2018b. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/pedologia/mapas/escala_250_mil/. Acesso em: 15 dez. 2023.

KÜHNL, M., *et al.* Multitemporal landslide exposure and vulnerability assessment in Medellín, Colombia. **Natural Hazards**, Göttingen, Germany, v. 119, p. 883-906, 2023. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-022-05679-z>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

KZAM, A. L., *et al.* Parauapebas e a dependência mineral: lições do passado e desafios do presente. **REUMAM**, Belém, Pará, v. 6, n. 1, p. 16-34, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/reumam/article/view/13395>. Acesso em: 21 mar. 2024.

LI, Y., *et al.* The risk assessment of landslide hazards in the Badong section of Three Gorges using the variable fuzzy set theory. **Frontiers in Physics**, Lausanne, Switzerland, v. 10, p. 1-11, 2022. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/journals/physics/articles/10.3389/fphy.2022.1006840/full>>. Acesso em: 23 mar. 2024.

LIMA M. L. S., *et al.* Vulnerability and socio-ecological risks: an integrated perspective of risks in Guaratiba (Rio de Janeiro - Brazil). **Sociedade e Natureza**, Uberlândia, Minas Gerais, v. 33, p. 1-16, 2021. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/sn/a/cY5KM7BbrnT3wYhTqj3qW7k/>>. Acesso em: 01 mar. 2024.

LIMA, R. A. P; SILVA, J. M. P. Economia mineral e os impactos nos territórios amazônicos do sudeste paraense. **Planeta Amazônia: Revista Internacional de Direito Ambiental e Políticas Públicas**, Macapá, Amapá, v. 1, n. 9, p. 103-116, 2017. Disponível em: <<https://periodicos.unifap.br/planetaamazonia/issue/archive>>. Acesso em: 11 fev. 2024.

LISBOA, E. G., *et al.* Fuzzy-Probabilistic Model for a risk assessment of groundwater contamination: application to an urban zone in the city of Belém, Pará, Brazil. **Water**, Basel, Switzerland, v. 12, p. 1-27, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4441/12/5/1437>>. Acesso em: 12 mar. 2024.

LIU, C.; CHEN, C. Achievements and countermeasures in risk reduction of geological disasters in China. **Journal of Engineering Geology**, Beijing, China, v. 28, p. 375-383, 2020. Disponível em: <http://en.dzcx.org/article/doi/10.13544/j.cnki.jeg.2023-0082>. Acesso em: 10 fev. 2024.

LOBÃO, M. S. P.; STADUTO, J. A. R. O rural e o urbano na Amazônia brasileira: um estudo a partir da abordagem territorial. **Boletim de Geografia**, Maringá, Paraná, v. 37, n. 2, p. 77-93, 2019. Disponível em: <<https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/BolGeogr/article/view/41229>>. Acesso em: 05 fev.

2024.

MARTIRE, D., *et al.* Landslide hazard and land management in high-density urban areas of Campania region, Italy. **Natural Hazards Earth System Sciences**, Göttingen, Germany, v. 12, p. 905-926, 2012. Disponível em: <<https://nhess.copernicus.org/articles/12/905/2012/>>. Acesso em: 07 fev. 2024.

MEEROW, S., *et al.* Defining urban resilience: a review. **Landscape and Urban Planning**, Amsterdam, Netherlands, v. 147, p. 38-49, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204615002418>>. Acesso em: 13 mar. 2024.

MORAES, S. R.; STEINBERGER, M. A desconcentração produtiva entre 2000 e 2015: uma nova dinâmica virtuosa?. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, Presidente Prudente, São Paulo, v. 21, n. 2, p. 280-297, 2019. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbeur/a/J86NW8zSF83j3sc9k4sfSML/>>. Acesso em: 01 mar. 2024.

MOREIRA F. R. S. **Uso da avaliação de técnicas de integração e análise espacial de dados em pesquisa mineral aplicadas ao planalto de Poços de Caldas**. 2002. 200 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002.

NWAZELIBE, V. E., *et al.*, Testing the performances of different fuzzy overlay methods in GIS-based landslide susceptibility mapping of Udi Province, SE Nigeria. **Catena**, Amsterdam, Netherlands, v. 220, p. 1-16, 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816222006403>>. Acesso em: 04 jan. 2024.

PARAUPEBAS. **Mapa de Localização dos Bairros de Parauapebas - PA**. Parauapebas - PA: Prefeitura Municipal de Parauapebas, Secretária Especial de Governo - SEGOV, 2022.

ROLNIK, R.; KLINK, J. Crescimento econômico e desenvolvimento urbano: Por que nossas cidades continuam tão precárias?. **Novos estudos CEBRAP**, São Paulo, São Paulo, v. 89, p. 89-109, 2011. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/nec/a/RVtd8zVwYXXbP74GzMM7tsD/abstract/?lang=pt>>. Acesso em: 14 fev. 2024.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. **Mathematical Modelling**, Amsterdam, Netherlands, v. 9, p. 161-176, 1987. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0270025587904738>>. Acesso em: 10 set. 2023.

SAFADI S. O. Ocupação urbana, redes sociais e territorialização da resistência: o caso de Aparecida de Goiânia, Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, Curitiba. Paraná, v. 9, p. 52-97, 2017. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/urbe/a/b7YgLyZrrq5QcnN8H4xnKvJ/abstract/?lang=pt>>. Acesso em: 14 jan. 2024.

SHERBININ, A., *et al.*, A. The vulnerability of global cities to climate hazards. **Environment & Urbanization**, Washington DC, United States, v. 19, p. 39-64, 2007. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0956247807076725>>. Acesso em: 09 jan. 2024.

SILVA JUNIOR, C. H. L. Lógica Fuzzy e Processo Analítico Hierárquico (AHP) aplicados ao zoneamento de áreas suscetíveis a deslizamentos: uma revisão. **Revista Monografias Ambientais**, Santa Maria, Rio Grande do Sul, v. 14, p. 42-58, 2015. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/remoa/article/view/18976/pdf>>. Acesso em: 12 fev. 2024.

SKRZYPCZAK, I., *et al.* Landslide hazard assessment map as an element supporting spatial planning: the Flysch Carpathians region study. **Remote Sensing**, Basel, Switzerland, v. 13, n. 2, p. 1-20, 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/13/2/317>>. Acesso em: 15 jan. 2024.

STANLEY, T.; KIRSCHBAUM, D. B. A heuristic approach to global landslide susceptibility mapping. **Natural Hazards**, Göttingen, Germany, v. 87, p. 145-164, 2017. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-017-2757-y>>. Acesso em: 12 mar. 2024.

SZWAGRZYK, M., *et al.* Impact of forecasted land use changes on food risk in the Polish Carpathians. **Natural Hazards**, Göttingen, Germany, v. 94, p. 227-240, 2018. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-018-3384-y>>. Acesso em: 05 fev. 2024.

TAVARES, F. M. **Programa Geologia do Brasil - PGB: Rio Verde - SB.22-Z-A-III**, Estado do Pará - Carta Geológica. Belém: CPRM, 2014. 1 mapa colorido, Escala 1:100.000. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/17757>. Acesso em: 04 nov. 2023.

VAN DAO, D., *et al.* A spatially explicit deep learning neural network model for the prediction of landslide susceptibility. **Catena**, Amsterdam, Netherlands, v. 188, p. 1-13, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816219305934>>. Acesso em: 13 mar. 2024.

VIEIRA, D. D. J. Muito além da mineração: faces da história de Parauapebas na década de 1980. **Contraponto**, Teresina, Piauí, v. 8, p. 289-303, 2019. Disponível em: <<https://revistas.ufpi.br/index.php/contraponto/article/view/9927>>. Acesso em: 10 abr. 2024.

Data de recebimento: 12 de dezembro de 2023.

Data de aceite: 09 de setembro de 2024.