

ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSA EM GAROPABA/SC

ANALYSIS OF SUSCEPTIBILITY TO MASS MOVEMENTS IN GAROPABA/SC

JOÃO PEDRO DI MARCO NUNES

Geólogo pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Geologia da UFSC. E-mail: joaopdimarco_@hotmail.com

JOICE CAGLIARI

Engenheira Ambiental, Professora e Pesquisadora do Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS. E-mail: joiceca@unisinos.br

RESUMO ABSTRACT

O município de Garopaba, no litoral sul de Santa Catarina, possui uma geodiversidade marcante, com morros de mais de 450 m de altitude formados por rochas cristalinas em contato direto com a planície costeira. A região apresenta frequentes movimentos de massa, com destaque para deslizamentos de rochas e de solo, os quais ocasionam danos materiais e comprometem o desenvolvimento urbano. Com o objetivo de analisar a suscetibilidade a movimentos de massa na região, este trabalho apresenta o inventário de movimentos de massa e os resultados da análise de suscetibilidade a esses movimentos no município. Utilizou-se a metodologia *fuzzy* em ambiente SIG, com cálculos baseados na relação de frequência e nos graus de pertinência dos fatores selecionados: geologia, geomorfologia, uso do solo, declividade, hipsometria e orientação das encostas. O inventário foi realizado por mapeamento de campo, interpretação de imagens de sensoriamento remoto e revisão bibliográfica, resultando em 67 pontos de movimento de massa. Desses, 75% (50 pontos) foram utilizados para o cálculo dos graus de pertinência e geração dos produtos cartográficos, enquanto os 25% restantes (17 pontos) foram empregados na posterior validação dos mapas gerados. Os resultados indicam que altas declividades e terrenos formados por rochas cristalinas, especialmente nos morros das Serras do Leste Catarinense em áreas de vegetação nativa e pastagens, são fatores críticos para suscetibilidades mais altas. Três mapas foram gerados com diferentes valores de *gamma* no processamento *fuzzy*. Após validação com os métodos *Receiver Operating Characteristics* e *Area Un-*

The city of Garopaba, on the southern coast of Santa Catarina state, has a remarkable geodiversity, with hills over 450 m high formed by crystalline rocks next to coastal plain. The region experiences frequent mass movements, especially rock and soil slides, which cause material damage and affect urban development. In order to analyze the susceptibility to mass movements in the region, this paper presents the inventory of mass movements and the results of the analysis of susceptibility to these movements in the city. A fuzzy methodology was used in a GIS environment, calculated based on the frequency ratio and degrees of pertinence of the selected factors: geology, geomorphology, land use, slope, hypsometry and slope orientation. The inventory was carried out using field mapping, remote sensing image interpretation and a literature review, resulting in 67 mass movement points. Of these, 75% (50 points) were used to calculate the degrees of pertinence and generate the cartographic products, while the remaining 25% (17 points) were used in the subsequent validation of the maps generated. The results indicate that high slopes and terrain formed by crystalline rocks, especially in the hills of the Eastern Santa Catarina Mountains in areas of native vegetation and pastures, are critical factors for higher susceptibilities. Three maps were generated with different gamma values in the fuzzy processing. After validation with the Receiver Operating Characteristics and Area Under Curve methods, the map with gamma 0.825 showed the best accuracy of 71.1%. The study indicates that the Gamboa, Quilombo Morro do Fortunato, Cova Triste

der Curve, o mapa com γ 0,825 apresentou a melhor acurácia, de 71,1%. O estudo indica que os bairros Gamboa, Quilombo Morro do Fortunato, Cova Triste e Siriú são os mais críticos, com pelo menos 25% de suas áreas em regiões de alta ou muito alta suscetibilidade.

Palavras-Chave: deslizamentos; mapa de suscetibilidade; Sistemas de Informação Geográfica; operador fuzzy; Garopaba.

and Siriú neighborhoods are the most critical, with at least 25% of their areas in regions of high or very high susceptibility.

Keywords: mass movements; susceptibility; Geographic Information System; Fuzzy operator; Garopaba.

1. INTRODUÇÃO

Movimento de massa é definido pelo movimento de rochas, solo, vegetação e detritos, sob o controle principal da gravidade, incluindo movimentos atribuídos a terrenos inclinados, movimentos gravitacionais verticais e laterais não necessariamente ligados à inclinação do terreno (Gunther, 2022). Tais movimentos são processos importantes na modelagem da superfície terrestre, influenciados por fatores como água, gelo ou ar (Bigarella *et al.* 2003). Esses eventos podem ser provocados tanto por fatores naturais (geologia, geomorfologia e vegetação) quanto antrópicos (ocupação urbana). Para mitigar os riscos, é essencial estudar as condições e mecanismos desses fenômenos, além de avaliar os perigos e os riscos (Tominaga *et al.* 2009).

Desde a década de 1960, com o avanço das geotecnologias, passaram a ser elaborados mapas de risco, vulnerabilidade e suscetibilidade a desastres naturais, elaborados em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), os quais indicam a probabilidade (e não frequência) de ocorrência de tais fenômenos em diferentes áreas, classificando-os de baixa a alta intensidade. Tais mapas, em conjunto com ações mitigadoras, fornecem medidas de redução de risco importantes às populações localizadas em áreas de risco.

A cidade de Garopaba, objeto de estudo do presente trabalho, encontra-se situada na margem litorânea do estado de Santa Catarina, compreendendo um território de 114,773 km² diverso em

termos geomorfológicos. Os diferentes tipos de terreno no município são frequentemente afetados por movimentos de massa, muitas vezes intensificados por conta dos elevados índices pluviométricos. Este estudo analisa a suscetibilidade a movimentos de massa em Garopaba utilizando SIG, com o objetivo de analisar a influência dos fatores físicos na ocorrência destes movimentos, além de gerar um mapa passível de utilização pelo poder público no planejamento urbano do município.

2. METODOLOGIA

2.1 Inventário de movimentos de massa

O inventário de movimentos de massa foi elaborado a partir do mapeamento de campo (24 pontos), da interpretação de produtos obtidos por sensores remotos (imagens do satélite CBERS-4A, imagens da série temporal história do Google Earth Pro e do Modelo Digital de Superfície; 41 pontos), e da utilização de pontos anteriormente mapeados na bibliografia (2 pontos), retirados do mapeamento de áreas de risco realizado pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB) (Hoelzel, 2013). Os pontos inventariados foram divididos aleatoriamente em dois grupos: 75% dos pontos (50) para aplicação e cálculo da relação de frequência e graus de pertinência; e 25% dos pontos (17) para validação posterior dos resultados obtidos (Figura 1).

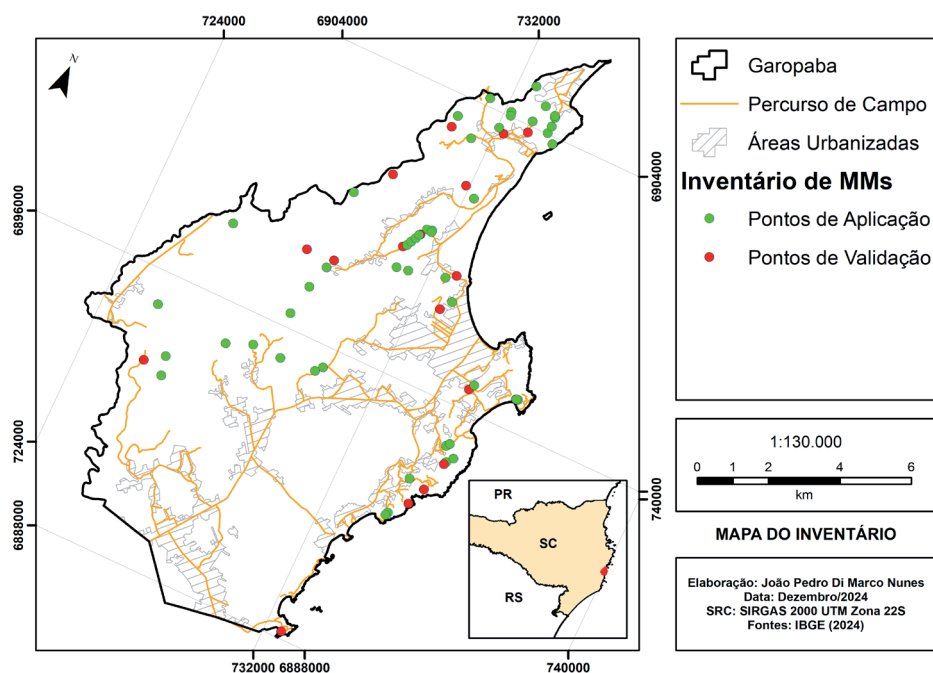


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo com a distribuição dos pontos do inventário de movimentos de massa, com discriminação dos pontos separados para aplicação e validação do método.

2.2 Fatores condicionantes e classes

Foram selecionados seis fatores condicionantes, a partir da disponibilidade dos dados para a área de estudo, para o cálculo dos valores de relação de frequência e grau de pertinência, sendo eles: geologia, geomorfologia, uso do solo, declividade, hipsometria e orientação das vertentes. Para o fator geologia, adotou-se o mapeamento geológico estadual do SGB (Wildner *et al.* 2014), na escala 1:500.000, que define 12 diferentes unidades litoestratigráficas (classes) para o território de Garopaba. Para o fator geomorfologia, adotou-se o mapeamento do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), disponível para todo o território nacional na escala 1:250.000 (IBGE, 2023), que define 4 diferentes classes, representadas pelas unidades geomorfológicas da região

de estudo. Quanto ao uso do solo, os dados utilizados são oriundos dos mapas de uso e cobertura da terra do Projeto MapBiomas (2024), com resolução espacial de 30 m. Para a aquisição dos valores de declividade, hipsometria e orientação das encostas, utilizou-se o Modelo Digital de Terreno (MDT) da *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA, 2024), com resolução espacial de 12,5 m. Os valores de declividade foram classificados conforme a divisão proposta pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa, 1979), a qual define cinco classes de porcentagem para a área de estudo. Os valores de hipsometria foram divididos em seis classes distintas, enquanto o fator orientação das encostas foi dividido de acordo com os pontos cardeais e colaterais, gerando 8 diferentes classes (Tabela 1).

Tabela 1. Fatores e classes condicionantes.

Fatores Condicionantes	Classes (quantidade de classes)
Geologia	Q2a, Q2pr, Q2ca, Q2b4e, Q2fl, Q1b3pl, E2yrc, NP3ypca, NP3ypi, NP3ygg, NP3ypl e NP2ysi (12)
Geomorfologia	Corpo D'água Continental, Serras do Leste Catarinense, Planícies Litorâneas e Planícies Alúvio-colvionares (4)
Uso do Solo	Agropecuária, Área não Vegetada, Corpo D'água, Floresta, Formação Natural não Florestal e Não Observado (6)
Declividade	0 – 3, 3 – 8, 8 – 20, 20 – 45 e 45 – 75 (5)
Hipsometria	0 – 50, 50 – 150, 150 – 250, 250 – 350, 350 – 450 e > 450 (6)
Orientação das Encostas	Norte, Nordeste, Leste, Sudeste, Sul, Sudoeste, Oeste, Noroeste (8)

2.3 Relação de frequência

A equação da relação de frequência (1) corresponde a um método estatístico baseado em dados (*data-driven*), responsável por reduzir a subjetividade da etapa de cálculo dos graus de pertinência

ocasionada por conta de métodos (*knowledge-driven*). O resultado da equação expressa a relação entre o número de movimentos de massa ocorridos na área de uma classe de cada fator condicionante, em relação à porcentagem da área total representada pela referida classe (Correia, 2015).

$$\text{Relação de Frequência (RF)} = \frac{\text{Nº de pontos de movimento de massa na classe (\%)}}{\text{Domínio da classe em relação ao fator condicionante (\%)}} \quad (1)$$

Para a aplicação da equação (1), são determinadas as porcentagens da quantidade de pontos do inventário identificados na classe que está sendo calculada em relação ao total de pontos do inventário, além do domínio da classe (área) em relação à área total de estudo.

condicionante, por meio da reclassificação dos pixels em ambiente SIG.

2.4 Graus de pertinência

Posteriormente, os valores de relação de frequência de cada classe são normalizados entre 0 e 1, através da equação dos graus de pertinência (2) (SEMA *et al.* 2017) a seguir:

$$\text{Grau de Pertinência} = \frac{X_{RF} - \min_{RF}}{\max_{RF} - \min_{RF}} \quad (2)$$

A equação (2) em questão considera X_{RF} o valor de relação de frequência calculado para a classe, e \min_{RF} e \max_{RF} como sendo o menor e maior valor de relação de frequência entre todas as classes do fator em questão, respectivamente (Maccari, 2022). Nesta etapa, todos os arquivos vetoriais (classes de geologia, geomorfologia e uso do solo) são transformados em arquivos matriciais (*raster*) para padronização com os demais fatores. Com isso, os valores de grau de pertinência calculados são atribuídos aos mapas de classes de cada fator

2.5 Integração dos dados

A lógica *fuzzy* é baseada na representação de dados espaciais como objetos de conjuntos *fuzzy*, cujos graus de pertinência são atribuídos a cada conjunto, correlacionando o nível de pertencimento do objeto ao conjunto (Maccari, 2022). Assim, cada classe representa um objeto, cujo valor de pertinência atribuído representa sua influência na suscetibilidade a movimentos de massa considerando todos os fatores analisados.

Para a integração dos fatores, utilizou-se o operador *fuzzy gamma* (3), que realiza a operação a partir da união de outros dois operadores independentes, *fuzzy soma* e *fuzzy produto*. O operador *fuzzy gamma* é aplicado a partir da inserção de um valor de *gamma* (γ) pelo usuário, para definir a importância dos operadores utilizados no cálculo. Os valores mais próximos de zero representam um peso maior ao operador *fuzzy produto*, enquanto os valores mais próximos de um representam um peso maior ao operador *fuzzy soma*, já valores intermediários representam a progressão entre os dois operadores (Correia, 2015).

$$\text{Fuzzy gamma} = (\text{Fuzzy soma})^\gamma \cdot (\text{Fuzzy produto})^{1-\gamma} \quad (3)$$

Os valores de *gamma* utilizados (0,75; 0,825 e 0,9) foram selecionados com base em trabalhos semelhantes (Sema, 2017; Schramm, 2019; Maccari, 2022), realizados em diferentes áreas de estudo, que constatarem resultados mais pertinentes ao utilizar valores elevados de *gamma* para o cálculo da suscetibilidade a movimentos de massa.

2.6 Validação dos dados

Para a validação dos resultados de cada um dos três produtos (mapas) gerados (um para cada valor de *gamma*), os métodos *Receiver Operating Characteristic* (ROC) e *Area Under Curve* (AUC) são aplicados para a verificação da qualidade representativa dos produtos matriciais de suscetibilidade gerados.

A curva ROC, segundo Maccari (2022), consiste em um gráfico composto pela sensibilidade do modelo (razão entre dados corretamente classificados como positivos e o total de dados positivos) versus a taxa de falsos positivos (razão entre dados incorretamente classificados como positivos e o total de dados positivos). O método AUC corresponde à área sob a curva ROC; em que valores mais baixos indicam falha no modelo, enquanto valores mais altos (próximos de 1) indicam seu bom desempenho.

Nesta etapa, aplicam-se os pontos separados para validação (25% do total) como valores de en-

trada, ou “positivos verdadeiros” que serão utilizados para o cálculo da qualidade representativa dos modelos a partir da curva ROC e, posteriormente, do valor de AUC.

Para elaboração da curva ROC, os valores dos produtos calculados pelo operador *fuzzy gamma* são agrupados em dez classes por meio do método de quebras naturais (Algoritmo de Jenks) que, embasado em um cálculo matemático da soma dos desvios absolutos sobre a mediana das classes, realiza o agrupamento dos dados com menor variação, estabelecendo os padrões espaciais de maneira estatística para os dados utilizados (Zucherato e Freitas, 2011).

3. RESULTADOS

3.1 Movimentos de Massa na área de estudo

Considerando os 65 pontos de movimentos de massa mapeados pelo autor, deslizamentos representam o tipo de movimento de massa amplamente mais encontrado na área de estudo. Em termos quantitativos, dos 24 pontos mapeados em campo, 23 (95,83%) correspondem a deslizamentos translacionais e rotacionais, com ocorrências subordinadas de queda de blocos em 3 pontos (Figura 2A e Figura 2B).

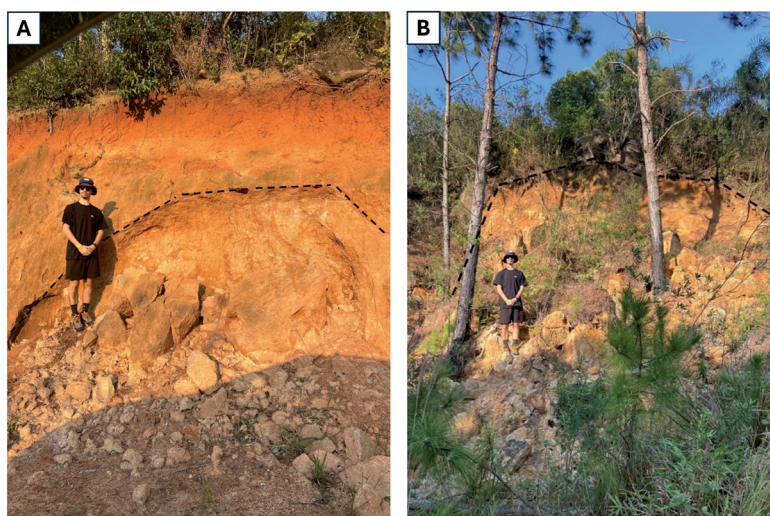


Figura 2. A) Deslizamento e queda de blocos no ponto de coordenadas 731150E 6899655N (22J). B) Deslizamento e queda de blocos no ponto de coordenadas 731459E 6904228N (22J). As linhas tracejadas pretas indicam as cicatrizes de rompimento.

Já para os 41 pontos mapeados remotamente, os deslizamentos representam 100% das ocorrências de movimentos de massa verificadas, com

3.2 Relação de frequência e graus de pertinência

3.2.1 Geologia

Para este fator, as classes representadas pelas litologias ígneas do Neoproterozoico (NP3ypca,

rastejos sendo registrados de forma concomitante aos deslizamentos em 4 pontos.

NP3ypci, NP3ygg, NP3ypil, NP2ysi) apresentaram os maiores valores de graus de pertinência, predominando de forma significativa em relação às litologias sedimentares do Quaternário (Q2a, Q2pr, Q2ca, Q2b4e, Q2fl, Q1b3pl), vide Tabela 2 e Figura 3 a seguir.

Tabela 2. Valores de relação de frequência e grau de pertinência para o fator geologia.

*Unidades litoestratigráficas de acordo com Wildner *et al.* (2014).

Classe (Unidade Litoestratigráfica)*	Área (km ²)	Pontos de Aplicação	Relação de Frequência	Grau de Pertinência
Depósitos Aluvionares (Q2a)	6,43	0	0,000	0,000
Depósitos praias atuais (Q2pr)	0,04	0	0,000	0,000
Depósitos colúvio-aluvionares (Q2ca)	0,99	0	0,000	0,000
Depósitos eólicos atuais (Q2b4e)	6,82	1	0,318	0,035
Depósitos flúvio-lagunares (Q2fl)	21,22	0	0,000	0,000
Depósitos de planície lagunar barreira III (Q1b3pl)	17,08	7	0,890	0,098
Granito Rio Chicão (E2yrc)	10,82	2	0,401	0,044
Granito Imaruí-Capivari (NP3ypca)	9,74	9	2,006	0,221
Granito Ilha (NP3ypci)	1,20	5	9,044	1,000
Granitoides Garopaba (NP3ygg)	16,37	17	2,254	0,249
Granitoides Paulo Lopes (NP3ypil)	15,77	8	1,101	0,121
Diorito Silveira (NP2ysi)	2,05	1	1,059	0,117

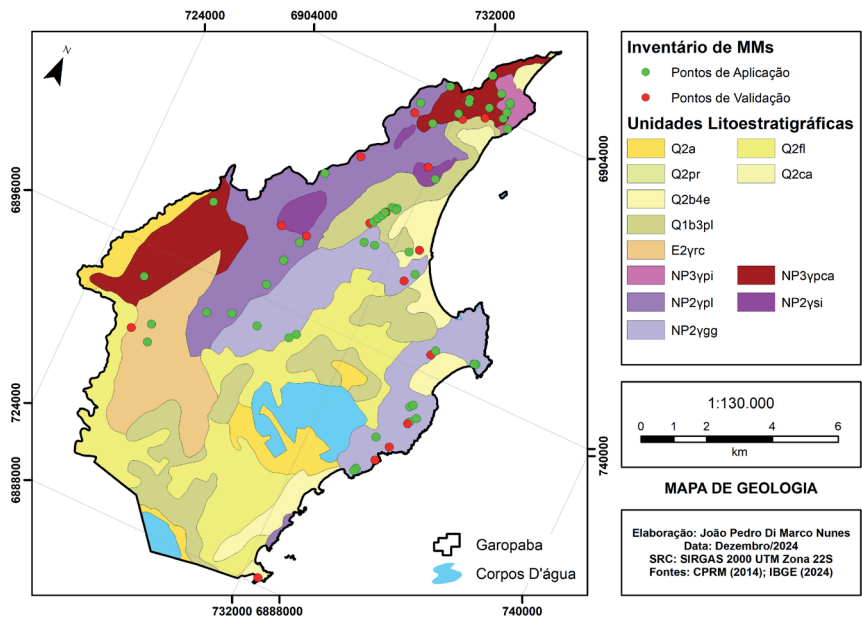


Figura 3. Mapa das classes de geologia (unidades litoestratigráficas) e os pontos mapeados para o inventário.

3.2.2 Geomorfologia

Para este fator, a classe representada pela unidade geomorfológica das Serras do Leste Catarinense apresentou o maior valor de grau de pertinência, sendo também a classe com maior área

em relação à totalidade do fator (Tabela 3 e Figura 4). As classes de Corpo D’água Continental e de Planícies Alúvio-coluvionares, por sua vez, não apresentaram pontos de aplicação e consequentes graus de pertinência.

Tabela 3. Valores de relação de frequência e grau de pertinência para o fator geomorfologia. *Unidades geomorfológicas de acordo com IBGE (2023).

Classe (Unidade Geomorfológica)*	Área (km²)	Pontos de Aplicação	Relação de Frequência	Grau de Pertinência
Corpo D’água Continental	6,18	0	0,000	0,000
Serras do Leste Catarinense	61,53	47	1,750	1,000
Planícies Litorâneas	42,82	3	0,160	0,091
Planícies Alúvio-coluvionares	4,00	0	0,000	0,000

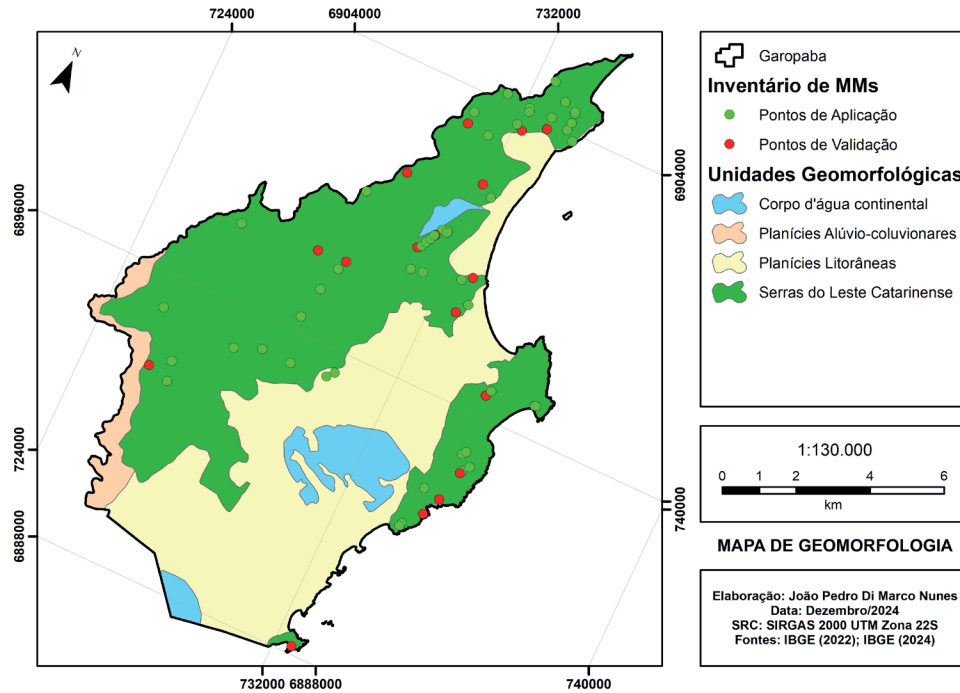


Figura 4. Mapa das classes de geomorfologia (unidades geomorfológicas) e os pontos mapeados para o inventário.

3.2.3 Uso do solo

Para este fator, foram identificados pontos de aplicação apenas nas classes de solo ocupado por

áreas de Floresta e Agropecuária, sendo a última delas a com maior valor de grau de pertinência calculado e com maior área em relação à totalidade do fator (Tabela 4 e Figura 5).

Tabela 4. Valores de relação de frequência e grau de pertinência para o fator uso do solo.

*Classes de Uso do Solo de acordo com Projeto MapBiomias (2022).

Classe (Uso do Solo)*	Área (km²)	Pontos de Aplicação	Relação de Frequência	Grau de Pertinência
Floresta	44,24	19	0,985	0,704
Formação Natural não Florestal	0,32	0	0,000	0,000
Agropecuária	50,83	31	1,399	1,000
Área não Vegetada	11,47	0	0,000	0,000
Corpo D'água	7,59	0	0,000	0,000
Não observado	0,27	0	0,000	0,000

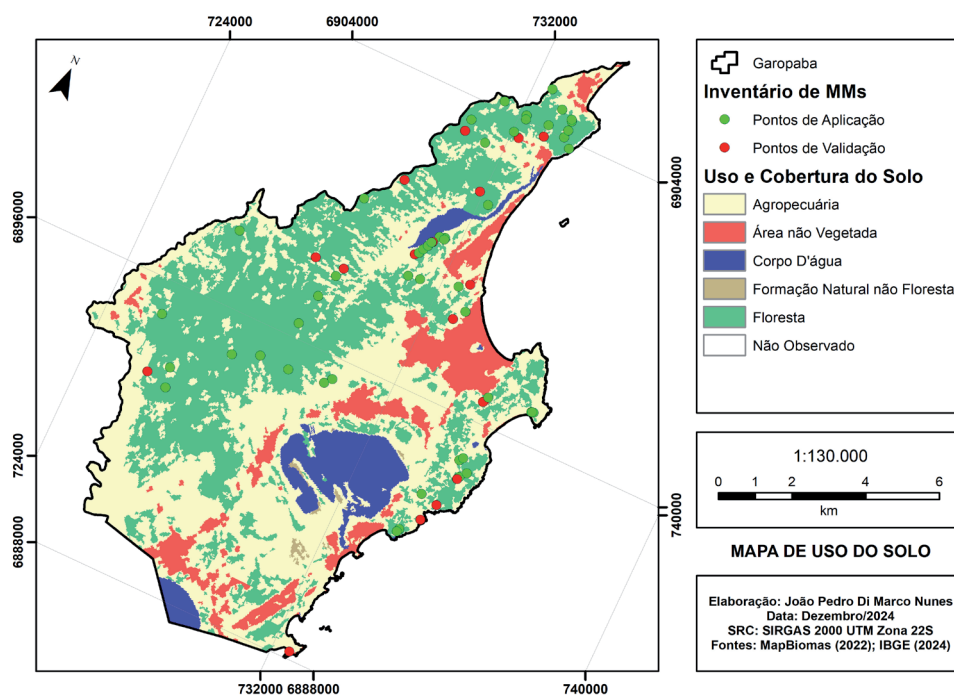


Figura 5. Mapa das classes de uso do solo e os pontos mapeados para o inventário.

A respeito do mapeamento de uso do solo do Projeto MapBiomas (2022), salienta-se que ele contempla as áreas urbanizadas dentro da classe de “Área não Vegetada”, bem como as faixas de areia das diferentes praias do município.

3.2.4 Declividade

Para este fator, o maior grau de pertinência remete à classe com declividades entre 45 e 75%

(Tabela 5 e Figura 6). Com exceção da classe entre 3 e 8%, nota-se uma tendência de aumento nos graus de pertinência proporcional ao aumento da declividade, fato que sugere que o aumento da declividade favorece a ocorrência de movimentos de massa.

Tabela 5. Valores de relação de frequência e grau de pertinência para o fator declividade.

Classe (%)	Área (km ²)	Pontos de Aplicação	Relação de Frequência	Grau de Pertinência
0 – 3	17,08	4	0,537	0,002
3 – 8	23,01	2	0,200	0,000
8 – 20	52,08	23	1,014	0,004
20 – 45	22,57	20	2,034	0,009
45 – 75	1,14	1	200,000	1,000

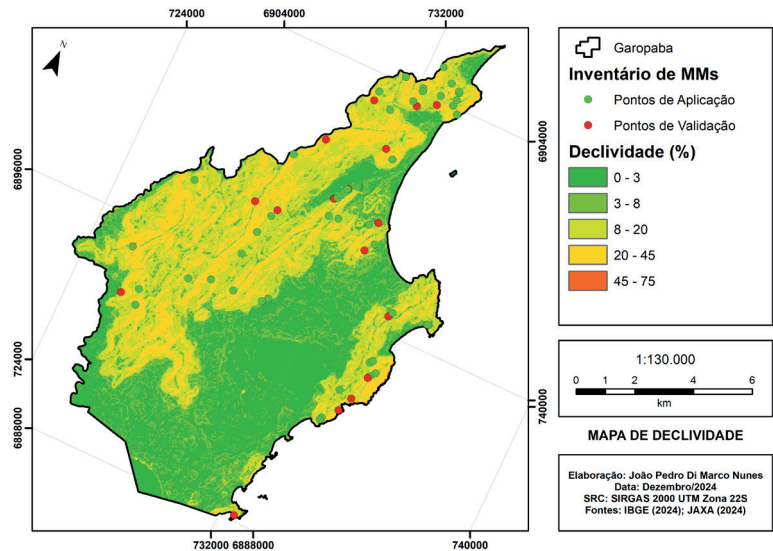


Figura 6. Mapa das classes de declividade e os pontos mapeados para o inventário.

3.2.5 Hipsometria

Para este fator, o grau de pertinência máximo calculado se refere aos terrenos com altimetrias

compreendidas entre 150 e 250 m, enquanto os terrenos com cotas superiores a 450 m apresentaram grau de pertinência zerado (Tabela 6 e Figura 7).

Tabela 6. Valores de relação de frequência e grau de pertinência para o fator hipsometria.

Classe (m)	Área (km²)	Pontos de Aplicação	Relação de Frequência	Grau de Pertinência
0 - 50	65,91	17	0,590	0,218
50 - 150	20,26	14	1,582	0,583
150 - 250	12,66	15	2,712	1,000
250 - 350	9,35	3	0,735	0,271
350 - 450	5,31	1	0,431	0,159
> 450	0,97	0	0,000	0,000

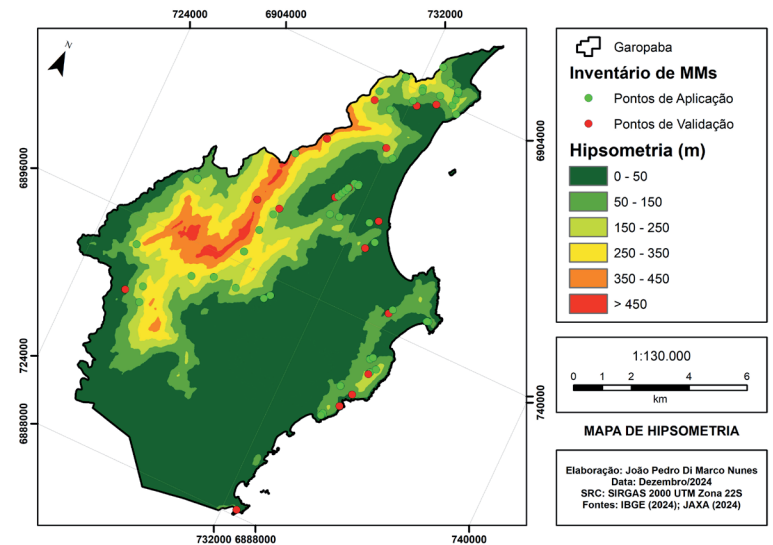


Figura 7. Mapa das classes de hipsometria e os pontos mapeados para o inventário.

3.2.6 Orientação das encostas

Para este fator, registrou-se que as vertentes com sentido NW apresentaram o maior grau de pertinência, seguidas pelas vertentes com sentido

S (Tabela 7 e Figura 8). As vertentes para N apresentaram grau de pertinência zerado, enquanto as demais classes apresentaram valores intermediários entre 0,038 e 0,424.

Tabela 7. Valores de relação de frequência e grau de pertinência para o fator orientação das encostas.

Classe (sentido)	Área (km²)	Pontos de Aplicação	Relação de Frequência	Grau de Pertinência
Norte	16,94	3	0,379	0,000
Nordeste	9,86	5	1,086	0,424
Leste	16,17	7	0,926	0,328
Sudeste	17,82	8	0,961	0,349
Sul	9,74	8	1,759	0,828
Sudoeste	9,69	2	0,442	0,038
Oeste	14,27	5	0,750	0,223
Noroeste	12,56	12	2,046	1,000

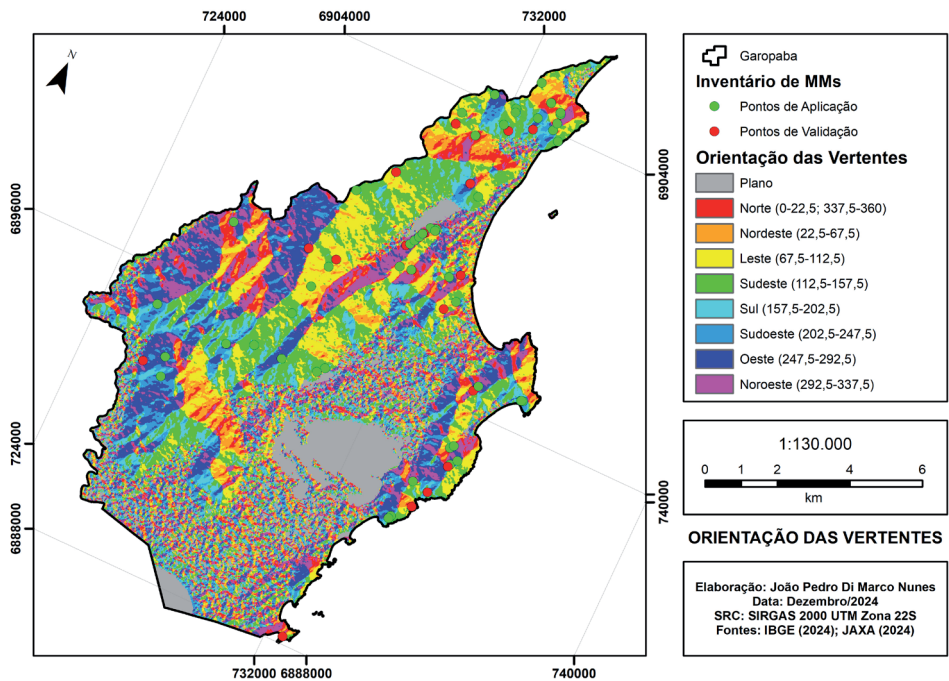


Figura 8. Mapa das classes de orientação das vertentes e os pontos mapeados para o inventário.

3.3 Integração e validação dos dados

A partir dos resultados apresentados anteriormente, foram gerados três mapas (um para cada valor de *gamma*) de suscetibilidade (Figura 9), cada um dividido em cinco classes que variam de muito baixa a muito alta. Ao analisar a dominância de cada classe em relação a área territorial, a classe de suscetibilidade muito baixa predomi-

nou em todos os três mapas, variando entre 54,77 e 61,34%. As classes baixa, moderada e alta apresentaram uma intercalação de dominância entre si, com valores entre 9,38 e 19,23%, 15,56 e 18,94% e 3,34 e 14,64% respectivamente. Já a classe de suscetibilidade muito alta representou, em todos os mapas, a quinta classe mais presente, com valores de ocupação do território entre 0,53 e 2,27%, respectivamente.

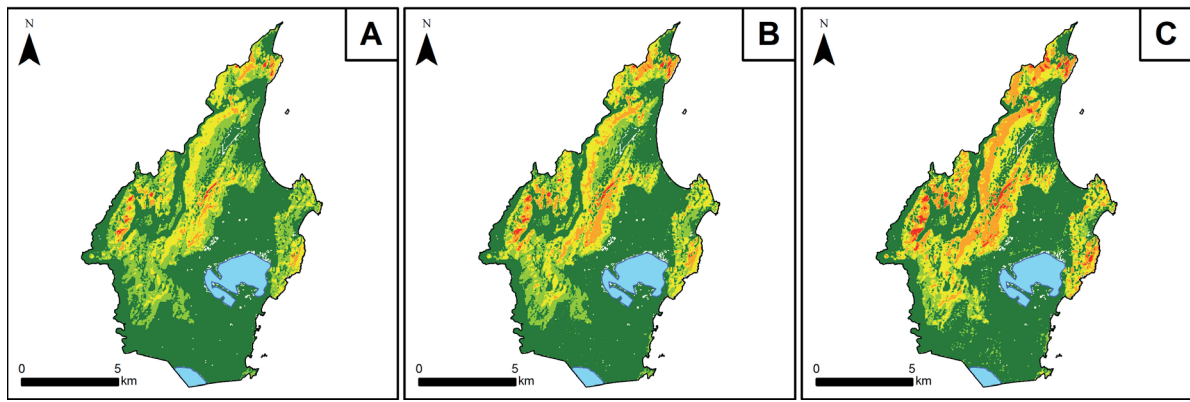
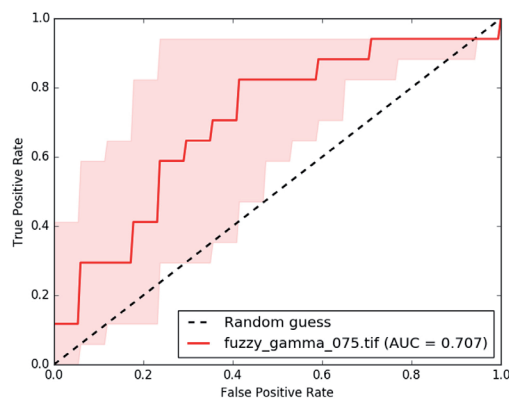


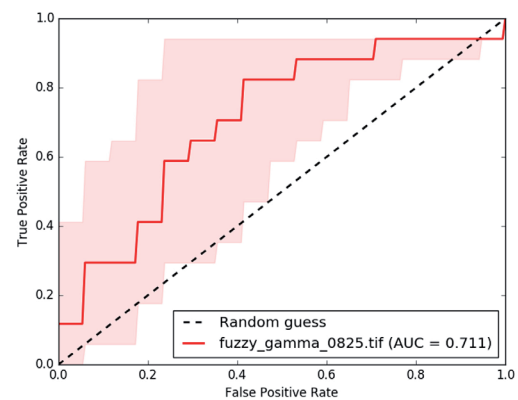
Figura 9. A) espacialização das classes de suscetibilidade obtidas com $\gamma = 0,75$; B) espacialização das classes de suscetibilidade obtidas com $\gamma = 0,825$; C) espacialização das classes de suscetibilidade obtidas com $\gamma = 0,9$.

Os três produtos gerados foram validados através dos métodos ROC e AUC, gerando valores de AUC entre 0,707 e 0,711 (Figura 10). O maior valor (0,711) foi obtido a partir do mapa elabora-

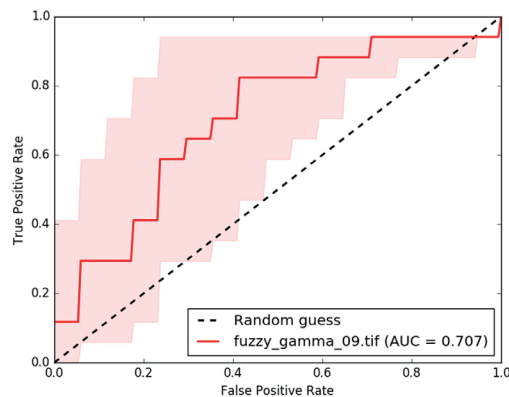
do com valor de *gamma* igual a 0,825 e corresponde a uma conformidade de 71,1% na predição de áreas maior probabilidade futura de ocorrência de movimentos de massa.



A) curva ROC para $\gamma = 0,75$



B) curva ROC para $\gamma = 0,825$



C) curva ROC para $\gamma = 0,9$

Figura 10. Gráficos de ROC e valores de AUC obtidos para cada valor de *gamma* utilizado.

Assim, com uma conformidade de 71,1% ($AUC = 0,711$), obtida a partir do valor de *gamma* de 0,825, elegeu-se o mapa em questão como re-

sultado mais representativo do presente trabalho, estando este apresentado a seguir (Figura 11).

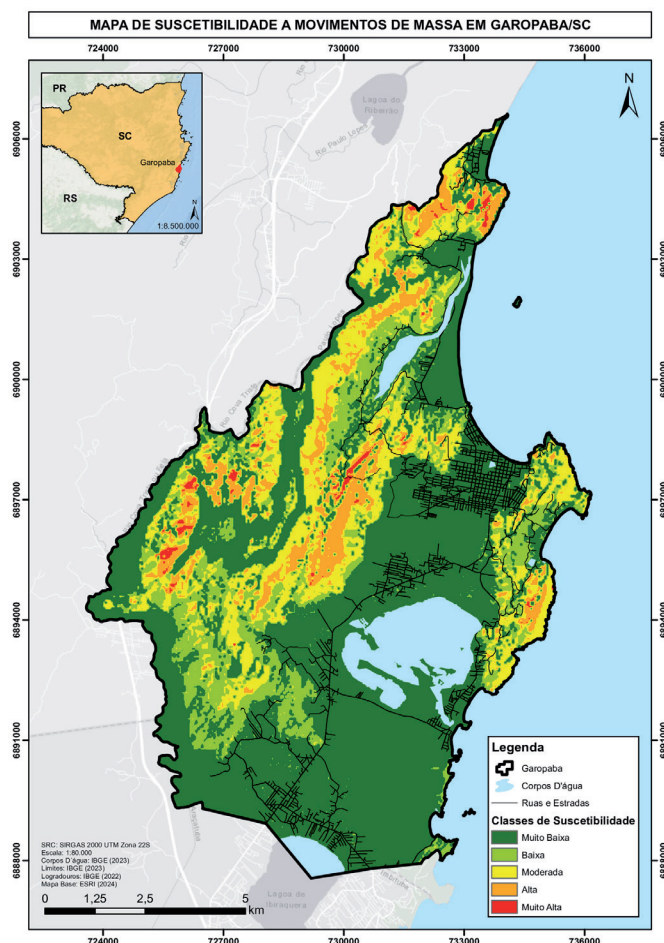


Figura 11. Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa em Garopaba/SC.

4. DISCUSSÕES

Para os pontos mapeados em campo, destacaram-se movimentos de massa ocorridos em áreas de vegetação nativa por causas naturais e deslizamentos desencadeados por cortes de estrada. No entanto, para os pontos mapeados remotamente (através de sensoriamento remoto), constatou-se um domínio da ocorrência de movimentos de massa em áreas destinadas à agropecuária e áreas de floresta, nesta ordem. Em relação às áreas de uso agropecuário, que contemplam terrenos com vegetação rasteira e/ou em estágio primário de crescimento, a maior ocorrência se relaciona com a evolução de rastejos ao longo do tempo, movimento que também pode ser potencializado por conta do caminhar dos animais em áreas de criação bo-

vina. Já nas áreas de floresta, tais movimentos tem maior ocorrência em áreas de maior declividade, favorecendo a ocorrência de movimentos de massa devido à força gravitacional mesmo em áreas com vegetação densa e bem desenvolvida. As demais classes de uso do solo não apresentaram ocorrências e consequentemente obtiveram graus de pertinência zerados. Contudo, é importante destacar que a base de dados de uso e ocupação do solo utilizada (Projeto MapBiomas) apresenta limitações para classificar áreas antrópicas, principalmente às margens de rodovias e em zona rural, sendo estas incluídas em outras classes. Assim, o grau de pertinência zerado obtido para a classe de “Áreas não Vegetadas”, que compreende as áreas urbanizadas, representa um valor incoerente com a reali-

dade, tendo em vista que diversos movimentos de massa foram mapeados em cortes de rodovias, em áreas que estão classificadas como “Agropecuária” e “Floresta”.

A declividade, por sua vez, foi o fator de maior influência entre os analisados, onde os resultados obtidos apontam que quanto maior for a declividade em um ponto, maior será sua suscetibilidade a movimentos de massa, tal fato vai de encontro ao documentado na literatura (Sbroglia e Higashi, 2013; Lima, 2013; Schramm, 2019; Maccari, 2022; Wetter, 2023; Fontoura *et al.* 2023).

Acerca da hipsometria, registrou-se que as classes altimétricas intermediárias (entre 50 e 350 m) apresentaram os maiores valores de grau de pertinência, fato que se relaciona com a maior densidade de declives acentuados nos terrenos situados nessas cotas.

Em relação à geologia, todas as seis unidades litoestratigráficas de origem ígnea (diorito, granitos e granitoides) apresentaram ocorrência de movimentos de massa, enquanto apenas duas das seis unidades sedimentares registraram ocorrências. Tal domínio, evidenciado também pelos maiores graus de pertinência nessas unidades, provavelmente se deve por conta de suas localizações em áreas declivosas e de maior altitude. Além disso, por se tratar de rochas estabelecidas ao longo do Neoproterozoico, encontram-se muitas vezes cobertas por mantos de alteração intempérica que favorecem o descolamento de material e o consequente movimento de massa. Para as litologias sedimentares, todas datadas do Quaternário, a constante modificação dos depósitos eólicos e praias atuais torna a identificação de movimentos de massa mais difícil, tanto em campo como em imagens de satélite, por conta da volatilidade de formas destes ambientes. Assim como o ocorrido com a declividade, a predileção dos movimentos de massa para as litologias ígneas e seus solos oriundos (frente às sedimentares) também se encontra documentada na literatura (Sbroglia e Higashi, 2013; Mallmann, 2018; Maccari, 2022; Fontoura *et al.* 2023). Contudo, destaca-se que as unidades litoestratigráficas mapeadas pela CPRM (Wildner *et al.* 2014) e utilizadas como parâmetro para o presente trabalho apresentam escala de 1:500.000, valor insuficiente para representar em detalhe aspectos importantes

da geologia local como ocorrências de corpos plutônicos influenciadores do relevo (Maccari, 2022).

No que se refere à geomorfologia, a exemplo do ocorrido com a declividade e a geologia, a unidade das Serras do Leste Catarinense representa a classe com maior valor de pertinência, justamente por apresentar relação intrínseca com os terrenos mais declivosos e as rochas Neoproterozoicas que ali afloram.

A orientação das encostas como fator de risco se explica por conta a insolação ali atuante, responsável por interferir nas taxas de evapotranspiração e no teor de água do solo (Baum e Godt, 2010). Com isso, Wetter (2023) sugere que, em regiões subtropicais, as encostas voltadas para as faces de menor insolação (no caso da área de estudo, W e SW) apresentam maiores teores de umidade no solo, fazendo com que a quantidade de água a ser infiltrada no solo também seja maior do que nas faces de maior insolação (voltadas para E, NE). Neste estudo, as faces voltadas para NW, S e NE foram as que apresentam maiores graus de pertinência, sendo a face voltada para NE a única das três que contraria a afirmação acima. Contudo, Silveira *et al.* (2012) definem que os ventos provenientes de NE representam o segundo vento mais frequente em dez dos doze meses do ano na região do litoral sul catarinense. Neste caso, os ventos oriundos do quadrante NE trazem consigo maiores teores de umidade advindos do oceano Atlântico, o que contribui para o aumento da saturação do solo nas encostas voltadas para NE (Wetter, 2023).

A respeito da distribuição dos movimentos de massa mapeados e sua relação com a divisão espacial dos bairros de Garopaba, nota-se que o bairro Siriú é o bairro com mais movimentos de massa registrados (treze). Os bairros Macacu, Areias de Macacu e Prainha do Silveira, apresentaram entre seis e dez movimentos de massa cada, enquanto os bairros Capão, Encantada, Quilombo Morro do Fortunato e Gamboa apresentaram entre três e cinco movimentos cada. Os bairros Grama, Ressaca-da, Canto da Penha, Cova Triste, Ambrósio, Ferraz e Costa do Macacu registraram um ou dois movimentos de massa cada. Por outro lado, seis bairros não apresentaram registros de movimento de massa, são eles: Campo D’una, Limpa, Areias da Palhocinha, Palhocinha, Pinguirito e Centro, conforme registrado no mapa a seguir (Figura 12).

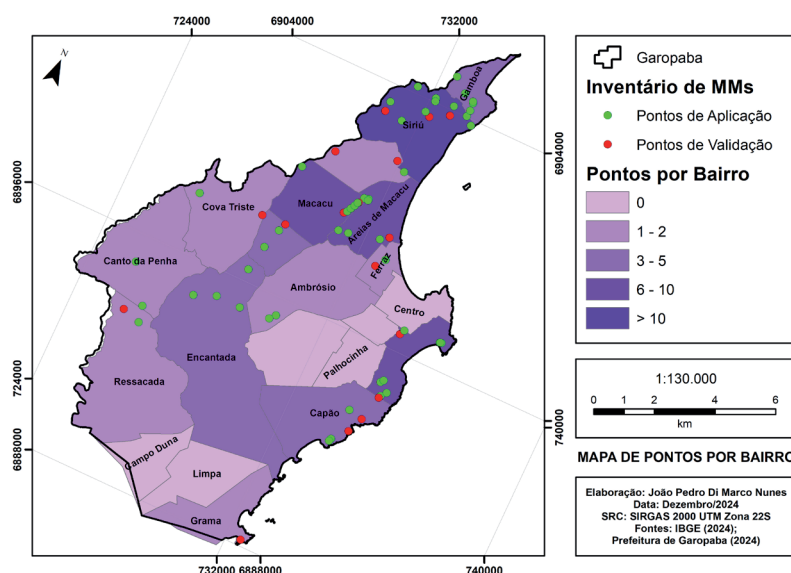


Figura 12. Mapa da distribuição de movimentos de massa por bairro em Garopaba/SC.

A partir disso, e considerando-se as classes de suscetibilidade Alta e Muito Alta como indicativos de alerta, verifica-se que os bairros Gamboa e Quilombo do Fortunato apresentam mais de 20% de seus territórios nestas respectivas classes. Em complemento, os bairros Ambrósio, Costa do Macacu, Cova Triste e Siriú apresentam pelo menos 15% de seus territórios compreendidos por áreas em locais de classes mais agravantes (suscetibilidade Alta e Muito Alta). Ao incluir

também a classe de suscetibilidade moderada na análise verifica-se que os bairros Quilombo Morro do Fortunato (62,09%), Gamboa (53,40%) e Costa do Macacu (50,45%) apresentam mais da metade de seus respectivos territórios em áreas de risco agravado. Por outro lado, bairros como Areias da Palhocinha (0%), Campo D'uma (0%), Grama (0,18%) e Limpa (0%) não apresentam áreas de risco agravado em seus territórios (Figura 13).

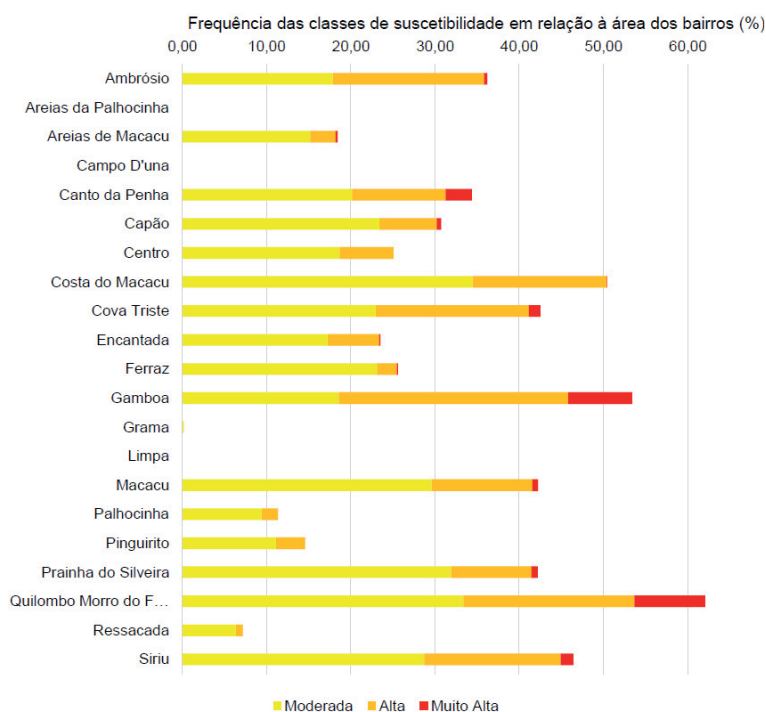


Figura 13. Frequência das classes de suscetibilidade em relação à área dos bairros.

5. CONCLUSÕES

A partir do inventário elaborado, conclui-se que existe uma maior ocorrência de deflagração dos movimentos de massa em cortes de estradas recentemente construídas e em áreas de morro com declividades visivelmente altas e ocupadas por vegetação nativa.

Após a aplicação da metodologia e a análise dos resultados, constatou-se que as áreas mais suscetíveis à ocorrência de movimentos de massa em Garopaba estão localizadas nos morros das Serras do Leste Catarinense, constituídos por rochas ígneas Neoproterozoicas do Batólito Florianópolis, em terrenos com alta declividade, cujo uso do solo seja representado por florestas nativas ou áreas de pastagem (agropecuária).

O mapa de suscetibilidade gerado apresentou acurácia de 71,1% e possibilita, de maneira satisfatória, a identificação e análise acerca da localização das áreas mais propensas à ocorrência de movimentos de massa. Contudo, a utilização de bases de dados com maior escala de detalhe (principalmente para os mapeamentos geológico e de uso e ocupação do solo) e o acréscimo de mais fatores na análise (como pedologia e distância dos pontos em relação aos cursos hídricos) podem aprimorar o mapa e tornar o modelo mais robusto. Ainda, o mapa de suscetibilidade gerado fornece uma visão abrangente das regiões mais propensas a esses movimentos. Com tal ferramenta, é possível identificar áreas críticas que requerem atenção e estudos mais detalhados, incluindo estudos sobre a mecânica de rochas e solos por meio de ensaios geotécnicos. Além disso, o mapa pode ser utilizado para a elaboração de mapas de risco e serve como recurso para o planejamento urbano por parte dos órgãos municipais responsáveis.

De acordo com os resultados, os bairros com maior quantidade de áreas de suscetibilidade alta e muito alta são os bairros Gamboa, Quilombo Morro do Fortunato, Cova Triste e Siriú. Assim, registra-se que os bairros em questão merecem estudos mais detalhados para a criação de mapas de risco específicos, não somente em áreas mais suscetíveis, visando um planejamento ocupacional mais eficiente nessas regiões. Ainda, faz-se necessário o monitoramento constante, por parte da Defesa Civil e órgãos municipais, das encostas

dessas áreas, especialmente em períodos de chuvas intensas e/ou prolongadas.

Por fim, os arquivos digitais vetoriais e matriciais gerados, bem como o inventário de movimentos de massa, os mapas apresentados ao longo do presente trabalho e demais materiais suplementares, encontram-se disponíveis à comunidade acadêmica, sendo possível obtê-los através de contato com o autor pelo e-mail: <joaopdimarco@hotmail.com>.

REFERÊNCIAS

- BAUM, R. L.; GODT, J. W. Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in USA. **Landslides**, v. 7, p. 259-272, 2010.
- BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; PASSOS, E. **Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais e Subtropicais**. 3. ed. Florianópolis: Ed. UFSC, 2003. 422 p.
- CORREIA, M. R. D. **Avaliação de Diferentes Técnicas de Modelagem e de Dados Espaciais Aplicadas à Análise de Risco a Deslizamentos no Baixo Vale da Bacia do Rio Itajaí-Açu SC**. Tese (Doutorado em Geografia) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Súmula da 10ª Reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1979. 83 p.
- FONTOURA, G. M.; SOARES, D. T.; OSAKO, L. S. **Análise de Susceptibilidade a Deslizamentos na Região Centro-Sul no Município de Gaspar, Santa Catarina**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 20., 2023, Florianópolis. Anais [...]. Florianópolis: 2023, p. 2819-2822.
- GUNTHER, A. Mass-Movement Geomorphology: An Introduction. In: SHRODER, J. F (ed.). **Treatise on Geomorphology**. 5. ed. San Diego: American Press, 2022. p. 1-3.

HOELZEL, M. **Ação emergencial para reconhecimento de áreas de alto e muito alto risco a movimentos de massa e enchentes: Garopaba, SC.** CPRM: Porto Alegre, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Banco de Dados e Informações Ambientais.** 2023. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/geomorfologia>. Acesso em: 21 abr. 2024.

JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA). Tsukuba: JAXA, 2011. 1 modelo digital de terreno. Satélite ALOS-2. Disponível em: <https://search.asf.alaska.edu/>. Acesso em: 19 abr. 2024.

LIMA, G. M. A. **Análise da suscetibilidade a deslizamentos por critérios topográficos: um estudo no alto da Bacia do Ribeirão Belchior, Gaspar-SC.** 2013. 114 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MACCARI, G. **Análise de Suscetibilidade a Movimentos de Massa no Município de Ascurra – SC.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

MALLMANN, P. **Mapeamento da Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa no Bairro Nova Esperança (Blumenau/SC).** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

PROJETO MAPBIOMAS. **Coleção 8 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil.** <https://storage.googleapis.com/mapbiomas> 2024. Disponível public/initiatives/brasil/collection_8/lcluc/coverage/brasil_coverage_2022.tif. em: 21 abr. 2024.

SBROGLIA, R. M.; HIGASHI, R. A. R. **Mapeamento geotécnico preliminar de áreas suscetíveis a movimentos de massa na microbacia do Ribeirão Baú, Ilhota/SC.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16.,

2013, Foz do Iguaçu. Anais [...]. Foz do Iguaçu: 2013. p. 9300-9307.

SCHRAMM, L. F. P. **Análise de Suscetibilidade a Movimentos de Massa da Microbacia do Córrego Gebien, Bairro Valparaíso, Blumenau (SC).** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Centro de Filosofias e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

SEMA, H. V; GURU, B; VEERAPPAN, R. Fuzzy gamma operator model for preparing landslide susceptibility zonation mapping in parts of Kohima Town, Nagaland, India. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 3, n. 2, p. 449-514, 2017.

SILVEIRA, R. B; ALVES, M. P. A; MURARA, P. Estudo de caracterização da direção predominante dos ventos no litoral de Santa Catarina. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA, 10., 2012, Manaus. **Anais [...].** Manaus: 2012. p. 380-392.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R.; **Desastres Naturais: conhecer para prevenir.** São Paulo: Instituto Geológico, 2009, 197 p.

WETTER, V. H. F. **Estudo de Suscetibilidade a Movimento Gravitacional de Massa da Sub-bacia do Rio Encano, Indaial, Santa Catarina.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

WILDNER, W.; CAMOZZATO, E.; TONIOLO, J. A.; BINOTTO, R. B.; IGLESIAS, C. M. F.; LAUX, J. H, Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM). **Mapa geológico do estado de Santa Catarina.** Porto Alegre: CPRM, 2014. 1 mapa. Escala 1:500.000.

ZUCHERATO, B; FREITAS, M. I. C. A determinação de um método de classificação para a elaboração de um atlas escolar. In: COLÓQUIO DE CARTOGRAFIA PARA CRIANÇAS E ESCOLARES, 1., 2011, Vitória. **Anais [...].** Vitória: 2011. p. 66-83.