

A Geoinformática para identificação de áreas suscetíveis a movimentos de massa em São Sebastião-SP.

Gustavo Sartori Pöttker¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
Caixa Postal: 515 - Av. dos Astronautas, 1758 - Jardim da Granja - CEP: 12227-010

gustavo.pottker@inpe.br

Abstract. *Mass movements are recurrent tragic events during periods of high precipitation intensity in the Serra do Mar. Utilizing publicly available geospatial information, an adaptation of the AHP method was adopted, combining various layers to generate a Susceptibility Map for these events. The visualization and the use of a kernel density estimation function allowed for the validation of the mapping, enabling the formulation of hypotheses for underlying causes and possible mitigating measures.*

Resumo. *Movimentos de massa são eventos trágicos recorrentes durante períodos de alta intensidade de precipitação na Serra do Mar. Com o uso de informações geoespaciais disponíveis publicamente, adotou-se uma adaptação do método AHP, combinando várias camadas para gerar um Mapa de Suscetibilidade a esses eventos. A visualização e a utilização de uma função de estimativa de densidade por kernel permitiram validar o mapeamento, permitindo levantar hipóteses para as causas subjacentes e possíveis medidas mitigadoras.*

1. Introdução

Os movimentos de massa (MM), como deslizamentos e escorregamentos, representam um grave problema socioambiental, especialmente em regiões com características geomorfológicas acentuadas, histórico de precipitação intensa e ocupação humana desordenada. O município de São Sebastião, localizado no litoral norte do estado de São Paulo, Brasil, é particularmente vulnerável a esses eventos devido à sua topografia íngreme da Serra do Mar, ao clima tropical úmido e à expansão urbana em áreas de risco (IPT, 2020). Em fevereiro de 2023, chuvas intensas atingiram o Município e região, causando diversos deslizamentos e provocando perdas humanas e materiais. A interface entre ocupação do espaço geográfico, infraestrutura, além de características como declividade e solos, e meteorologia pode explicar parte do risco materializado nesse evento e latente em outras regiões.

A geoinformática, reconhecida como uma ciência interdisciplinar que utiliza dados digitais para analisar fenômenos geográficos, permite combinar essas informações espaciais de vários tipos e fontes para facilitar o entendimento dos fatores de risco, das

suscetibilidades a eventos extremos, bem como oportunidades para o desenvolvimento urbano, etc.

Nesse contexto, propõe-se a utilização da Geoinformática para identificar e mapear as áreas suscetíveis a MM no município de São Sebastião-SP. Foi empregada a metodologia da Análise Hierárquica de Processos (AHP) dentro de um ambiente SIG para ponderar e combinar diferentes fatores condicionantes de instabilidade, gerando um mapa de suscetibilidade para subsidiar ações de gestão territorial e redução de riscos.

O projeto se justifica pois a região de São Sebastião apresenta riscos elevados de deslizamento, especialmente em eventos de chuvas intensas, como ocorreram nos anos de 1967 e 2023. Tais eventos incentivaram o estudo geoespacial de movimentos de massa em São Sebastião por vários autores (VEDOVELLO et al. 1995; MAGALHÃES et al., 2005; BISPO et al., 2011; ALCÂNTARA et al., 2024). O aprimoramento das técnicas de geoprocessamento, aliado a dados e informações mais recentes, enseja a revisita da temática de mapeamento da suscetibilidade a MM, buscando um melhor entendimento sobre os fatores condicionantes específicos daquela região.

2. Metodologia

2.1. Área de estudo

A área de estudo é o Município de São Sebastião - SP, localizado no litoral norte do Estado de São Paulo, que dispõe de uma população de 81.595 habitantes, distribuídos em uma área de 402,395km² (IBGE, 2023).

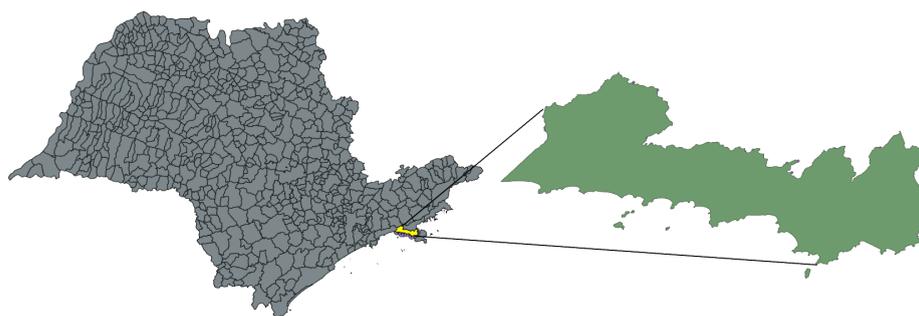
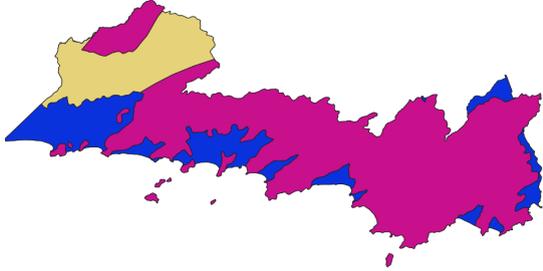
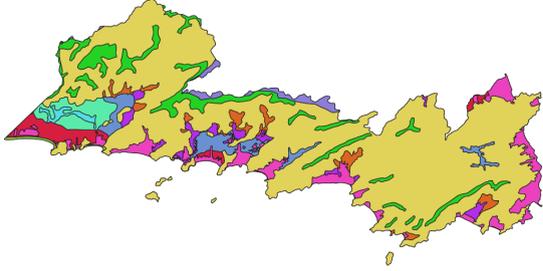
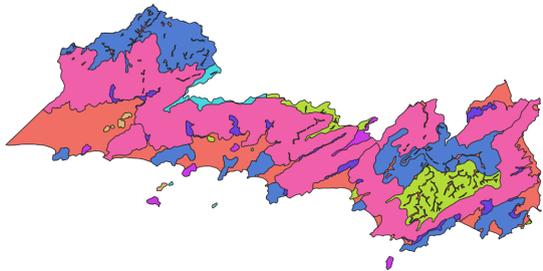
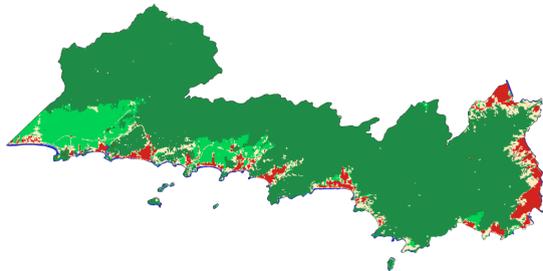
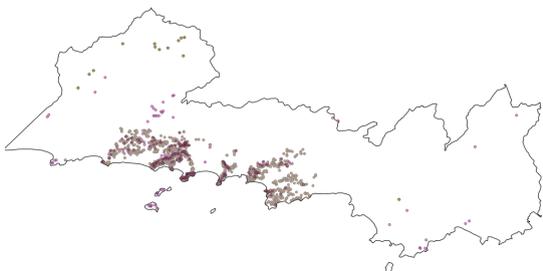
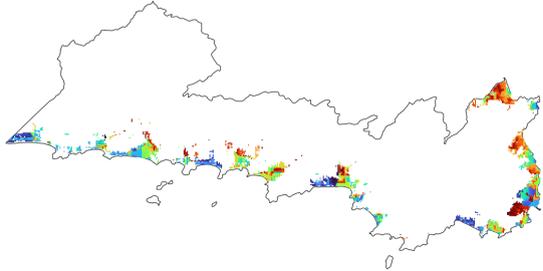


Figura 1. Estado de São Paulo e Município de São Sebastião.

2.2. Base de Dados

Os dados a serem utilizados consistem em um banco de dados geográfico composto por dados vetoriais e matriciais, conforme a tabela 1. Outros dados podem ser incorporados caso haja necessidade.

Tabela 1. Camadas de dados utilizados.

 <p>1. Geologia - vetorial - polígonos (CREPANI; MEDEIROS, 2000)</p>	 <p>2. Pedologia (CREPANI; MEDEIROS, 2000)</p>
 <p>3. Relevo (CREPANI; MEDEIROS, 2000)</p>	 <p>4. Uso e cobertura da terra (MapBiomias, 2023)</p>
 <p>5. Pontos de cicatrizes Pré-2023 (ALMEIDA, C. M.). De 2023 (COELHO et al. 2024).</p>	 <p>6. População 2020 (BONDARENKO et al., 2020)</p>
 <p>7. Imagens CBERS-4A (WPM)</p>	<p>Tipo de dados: 1 ao 4 - vetorial-polígonos 5 - vetorial - pontos 6 e 7 - Raster 100 m e 8 m, respectivamente.</p>

2.3. Métodos

Para relacionamento entre as informações disponíveis e consequente mapeamento das áreas suscetíveis à movimentos de massa, tais informações foram carregadas em um Sistema de Informações Geográficas (QGIS 3.42.1-Münster), momento em que foi verificada a consistência dos dados e eventuais problemas foram corrigidos (ex.: polígonos inválidos).

2.3.1. Análise Hierárquica de Processos

Para gerar o mapa de suscetibilidade, foi utilizado um método de inferência espacial conhecido como Análise Hierárquica de Processos (AHP), descrito originalmente por Saaty (1980), que consiste em um método multicritério que estrutura problemas complexos em uma hierarquia de critérios e alternativas. Através de comparações pareadas, especialistas avaliam a importância relativa desses critérios, permitindo a ponderação de critérios e subcritérios em relação a um objetivo geral. O método também quantifica a consistência dessas avaliações por meio de uma razão que varia de 0 a 1, onde valores próximos a 0 indicam maior confiabilidade no processo de julgamento (CÂMARA et al., 2001).

Com as camadas Geologia, Pedologia, Relevo e Uso e Cobertura da Terra, adotou-se a hierarquia descrita em Crepani & Medeiros (2001) (vide a tabela 3), para ponderar o valor relativo de contribuição de cada classe de legenda para a suscetibilidade a MM, sendo 1 quando a classe indica locais de menor suscetibilidade e 3 quando indica maior suscetibilidade. O valor 0 é atribuído para classes de legenda desconsideradas no cálculo da AHP, tal como “áreas urbanas” dentro da camada “Pedologia”, a qual já está contemplada por “Uso e Cobertura da Terra”.

Tabela 2 - Valores de vulnerabilidade das classes temáticas.

Tema	Classe	Valores
Geologia	Corpos granitóides folheados	3,0
	Migmatitos, biotita gnáisses, granitóides e granitos gnáissicos	1,3
	Sedimentos marinhos e lagunares	1,1
Pedologia	Neossolo litólico ou quartzarênico	3,0
	Espodossolo	2,4
	Organossolo + Gleissolo	2,4
	Cambissolo háplico + Latossolo	2,0
	Cambissolo háplico + Argissolo	2,0
	Cambissolo háplico + Neossolo flúvico+ Gleissolo háp.	2,0
	Gleissolo + Cambissolo Háplico	1,9

Relevo	Colinas	3,0
	Depósitos	3,0
	Escarpas	3,0
	Morros e morrotes	3,0
	Planícies e terraços fluviais e marinhos	1,0
Uso e Cobertura da Terra	Pastagem	3,0
	Praia, Duna e Área de Areia	3,0
	Outras Áreas não Vegetadas	3,0
	Afloramento Rochoso	3,0
	Outras Culturas Temporária	3,0
	Mosaico de Usos	2,6
	Formação Florestal	1,5
	Plantio Florestal	1,0
	Rio, Lago e Oceano (neutro)	0
	Área Urbana (neutro)	0

2.3.2. Análise visual de pontos de cicatrizes e estimativa de densidade por kernel

Com base em mapeamentos de cicatrizes de movimentos de massa anteriores a 2020 (cedidos pela Dr^a. Cláudia Maria de Almeida) e de 2023, realizado no trabalho de Coelho et al. (2024), foi possível validar preliminarmente o mapeamento de suscetibilidade.

Em seguida, visando facilitar a interpretação, foi realizada a estimativa da densidade pontual por kernel. O kernel utiliza uma janela móvel (figura 2) com objetivo de verificar como a intensidade de um processo pontual varia na área de estudo, conferindo uma estimativa da densidade de probabilidade univariada ou multivariada a partir das observações, em outras palavras, um histograma suavizado (BAILEY e GATRELL, 1995).

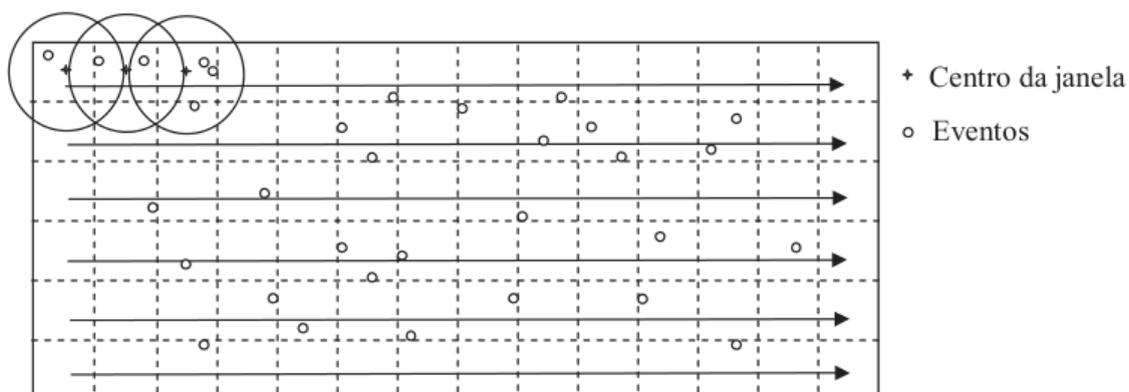


Figura 2. Funcionamento de uma janela móvel sobre uma área de estudo.

O estimador de intensidade por kernel verifica, para cada localidade da área de estudo, o número e disposição dos indivíduos que ocorrem em um raio previamente estabelecido pelo pesquisador. A formulação matemática é dada por:

$$\hat{\lambda}(s) = \frac{1}{\delta\tau} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau^2} k\left(\frac{(s-s_i)}{\tau}\right)$$

Aqui, $\hat{\lambda}(s)$ é a densidade de eventos por unidade de área; n é o número de eventos observados; s representa uma localidade qualquer da área de estudo; s_i é a localidade dos n eventos observados; $k(\cdot)$ é uma função de densidade de probabilidade bivariada, simétrica em relação à origem; O parâmetro τ é chamado de raio de influência (bandwidth) e é essencialmente o raio do círculo que terá como centro cada localidade; por último, o fator $\delta\tau$ corrige distorções de bordadura (DIGGLE, 1985). A contribuição de cada evento no valor obtido é função apenas da distância do evento em relação à localidade de interesse.

2.3.3. Comparação da suscetibilidade com a ocupação humana

É importante contextualizar a suscetibilidade aos MM no âmbito da ocupação humana. Para tanto, utilizou-se o dado raster da WorldPop Hub (WorldPop Hub), que contém dados de população por unidade de área (pixel de aproximadamente 100 metros). Tais informações são fundamentadas no Censo de 2020 do IBGE.

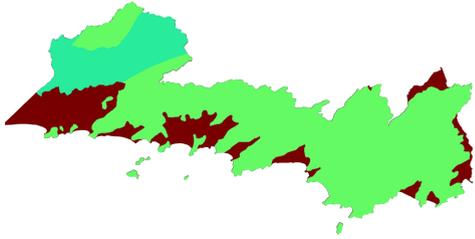
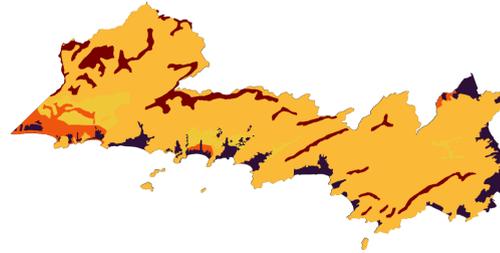
Para melhor visualização da intersecção entre áreas suscetíveis e dados populacionais, foi realizada o produto entre as camadas de população e mapa de suscetibilidade

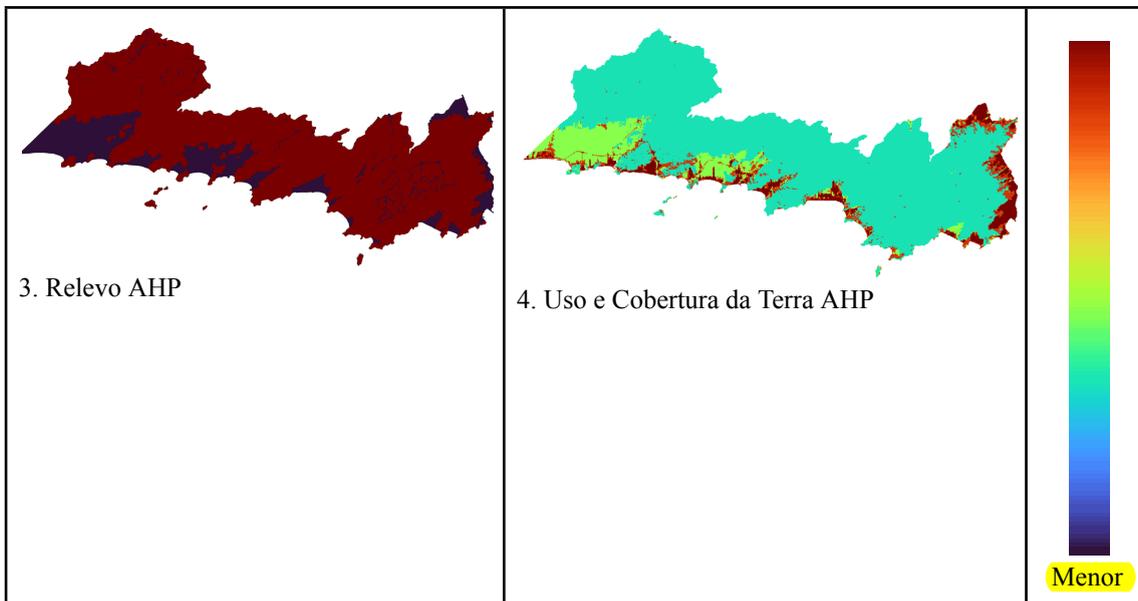
3. Resultados e Discussão

3.1. AHP

A seguir é apresentada a transformação das camadas Geologia, Pedologia, Relevo e Uso e Cobertura da Terra, pelo valor ponderado de suas classes:

Tabela 3. Camadas transformadas por AHP.

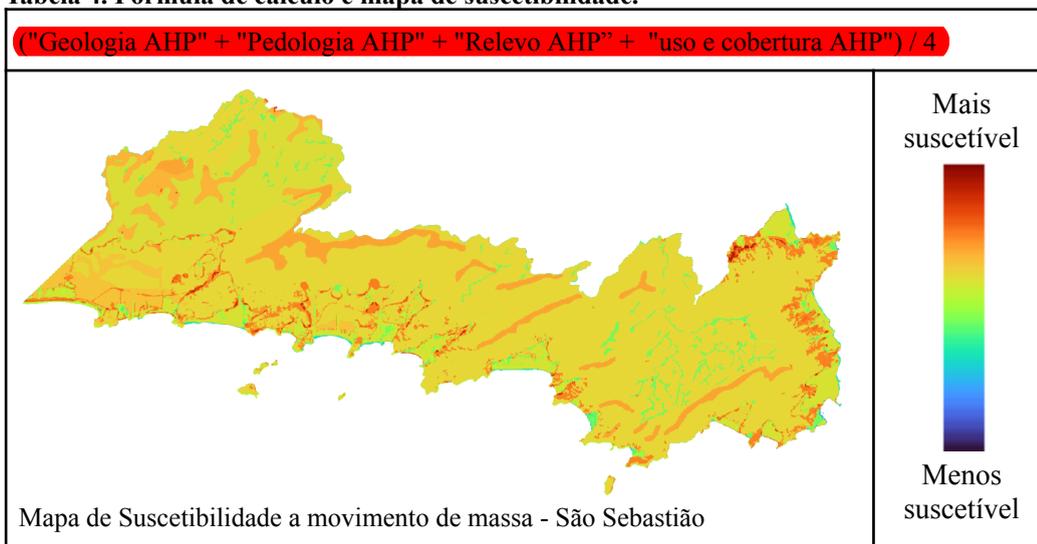
 <p>1. Geologia AHP</p>	 <p>2. Pedologia AHP</p>	<p>Maior</p>
--	--	--------------



Pode-se perceber que o Relevo e a Pedologia possuem valores **mais altos** em regiões elevadas, predominantemente em regiões de floresta, ao passo que Geologia e Uso e Cobertura da Terra apresentam menores valores nessas regiões.

O resultado da combinação das camadas (por álgebra de mapas) resulta no Mapa de Suscetibilidade a movimentos de massa:

Tabela 4. Fórmula de cálculo e mapa de suscetibilidade.



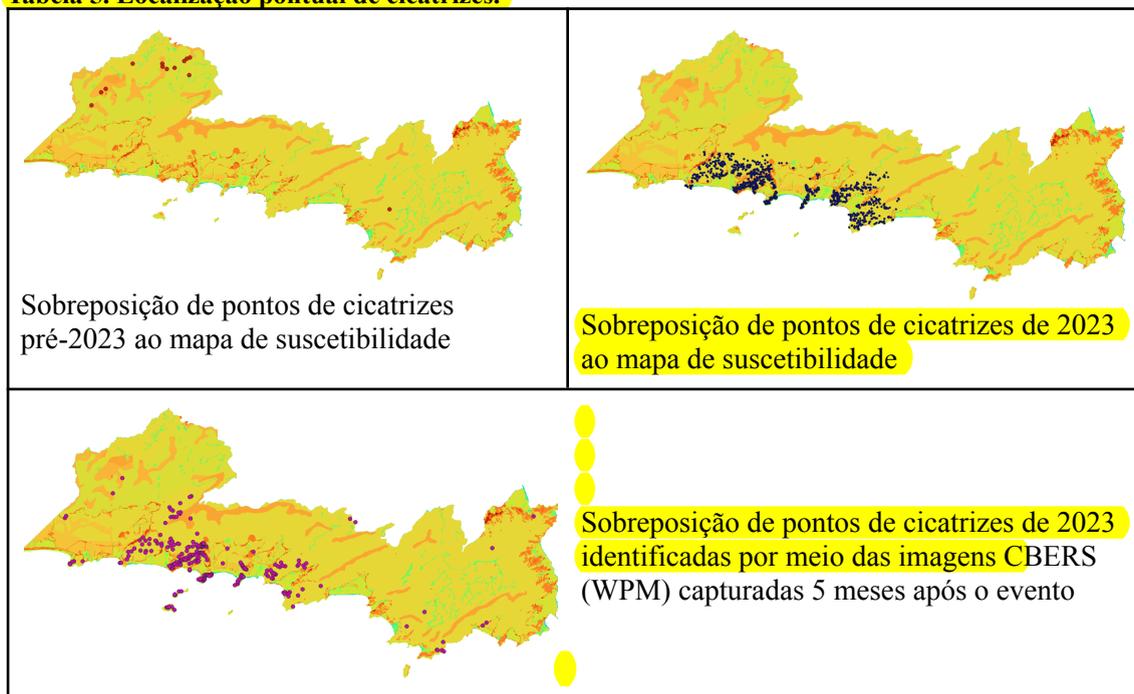
Observa-se que áreas suscetíveis estão localizadas em regiões serranas e encostas íngremes, onde há uma forte concentração de áreas de alta suscetibilidade nas porções mais elevadas e de relevo mais acidentado, especialmente na parte leste do município e nas encostas voltadas para o litoral. Essas áreas são características da Serra do Mar,

onde a combinação de altas declividades, geologia complexa e solos rasos favorece a instabilidade das encostas.

3.2. Validação da classificação - visualização e função kernel

A seguir, apresenta-se a sobreposição dos pontos de cicatrizes ao mapa de suscetibilidade:

Tabela 5. Localização pontual de cicatrizes.



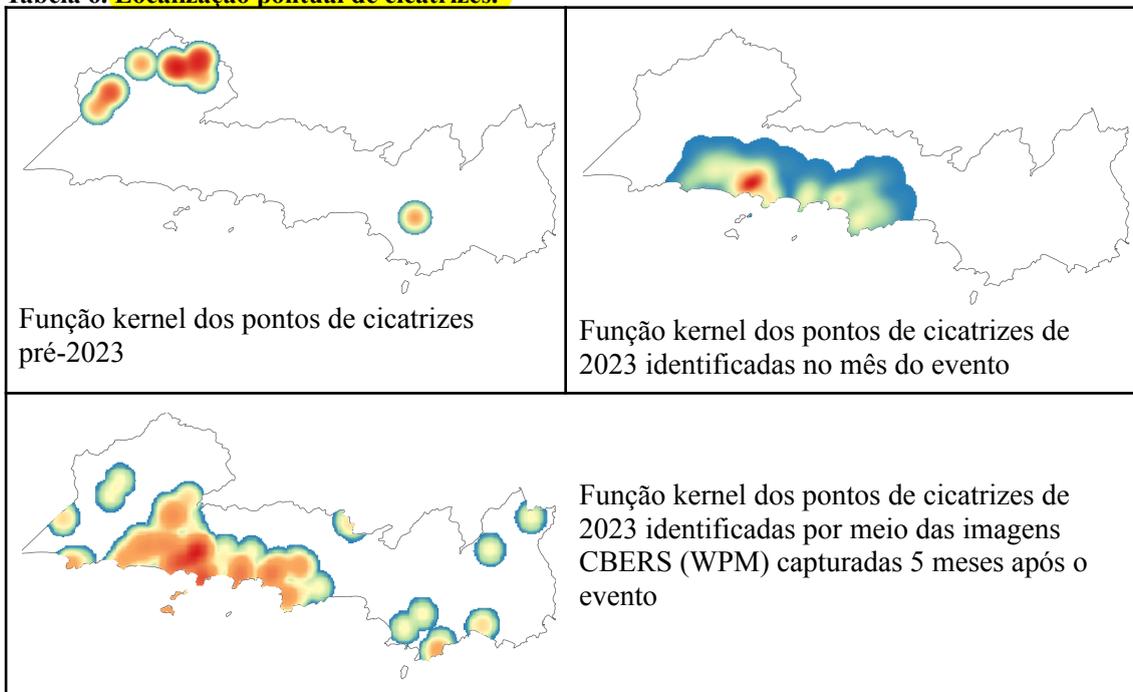
Com relação à distribuição das cicatrizes, percebe-se grande correspondência com o mapa de suscetibilidade, em especial, próximas à área litorânea central (figura 2).



Figura 2. Epicentro dos deslizamentos de 2023. Imagem CBERS-4A (WPM) - composição RGB.

A estimativa de densidade por kernel auxilia na visualização de áreas de maior densidade de eventos.

Tabela 6. Localização pontual de cicatrizes.



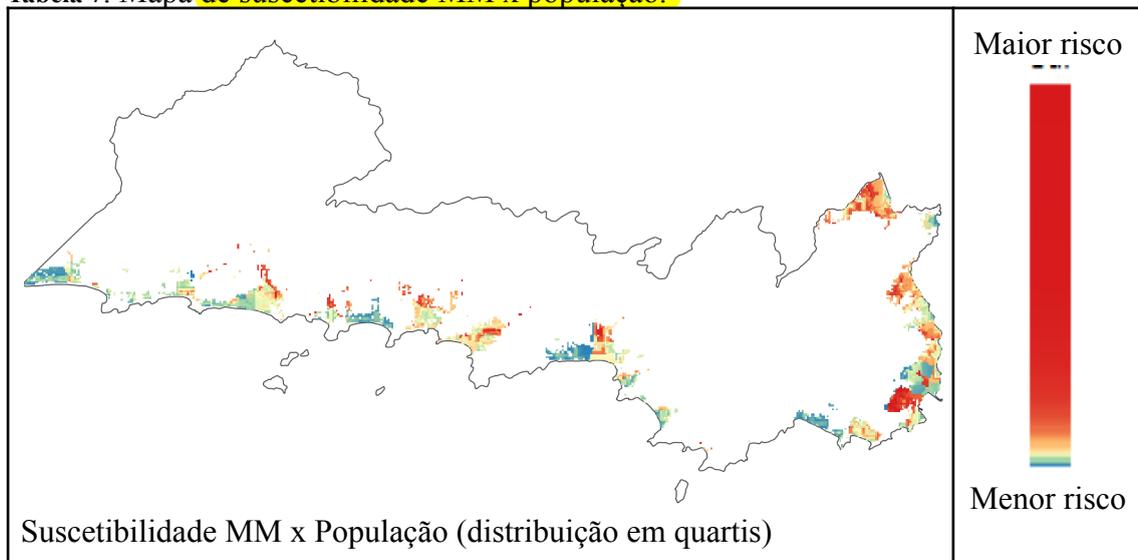
As funções kernel evidenciaram diferenças importantes entre os eventos pré-2023 e 2023, talvez explicadas pela maior intensidade de chuvas nas localidades. Entre os mapeamentos durante o mês do evento e após 5 meses, a identificação das cicatrizes

foram significativamente diferentes, o que pode ser explicado pela morte da vegetação e regeneração ocorridas no período.

3.3. Contextualização com a população

A seguir é apresentado o produto do mapeamento da suscetibilidade a MM e raster de população (Tabela 7).

Tabela 7. Mapa de suscetibilidade MM x população.



Ao considerar que a suscetibilidade a movimento de massa se refere a um tipo de perigo ou ameaça, e que a proximidade está vinculada à exposição a esse perigo, então, a combinação das informações fornecem parte do risco existente, restando conhecer a vulnerabilidade das populações a MM.

4. Conclusões

Dado o exposto, torna-se evidente a capacidade de identificação de áreas suscetíveis ao combinar informações disponíveis em bases nacionais, estaduais e municipais de dados geográficos, o que contribui para um melhor planejamento urbano e habilidade para discernir locais prioritários para atuação de sistemas de alerta precoce, tais como o Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais - CEMADEN, tem implantado.

Informações mais detalhadas, como Modelos Digitais de Terreno e informações georreferenciadas sobre precipitação acumulada podem aumentar a capacidade de explicar a ocorrência de MM, o que reforça a necessidade dos sistemas de monitoramento ambientais.

Por fim, a combinação de informações de suscetibilidade e exposição da população à ameaça é um indicativo do risco, restando uma análise mais detida sobre os fatores de vulnerabilidade da população aos eventos extremos.

5. Referências

Alcântara, E. et al. Machine learning approaches for mapping and predicting landslide-prone areas in São Sebastião (Southeast Brazil), *Natural Hazards Research*, <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2024.10.003>

Bailey, T.C.; Gatrell, A.C. *Interactive Spatial Data Analysis*. Harlow: Longman Scientific & Technical, 1995.

Bispo, P. C. ; Almeida C. M. ; Valeriano, M. M. ; Medeiros, J. S. Crepani, E. Análise da suscetibilidade aos movimentos de massa em São Sebastião (SP) com o uso de métodos de inferência espacial. *São Paulo, UNESP, Geociências*, v. 30, n. 3, p. 467-478, 2011.

Bondarenko, M., Kerr, D., Sorichetta, A., and Tatem, A.J. 2020. Census/projection-disaggregated gridded population datasets, adjusted to match the corresponding UNPD 2020 estimates, for 183 countries in 2020 using Built-Settlement Growth Model (BSGM) outputs. *WorldPop*, University of Southampton, UK. doi:10.5258/SOTON/WP00685

Câmara, G.; Davis, C.; Monteiro, A. M. V. (Eds e orgs). *Introdução à ciência da geoinformação*, INPE, São Paulo, 2001.

Coelho, R. D., Grohmann, C. H., Viana, C. D., & Dias, V. (2024). Landslides of the 2023 summer event of São Sebastião, southeastern Brazil [Data set]. *Zenodo*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11120078>

Crepani, E. E DE Medeiros, J. S. *Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Estudo da Vulnerabilidade aos Movimentos de Massa no Município de São Sebastião - SP*, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil, 2002.

Diggle, P.J. A kernel method for smoothing point process data. *Applied Statistics (Journal of the Royal Statistical Society, Series C)*, 34(2), 138–147. 1985.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Censo Demográfico 2022: população e domicílios: primeiros resultados*. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=102011>. Acesso em: 07 maio 2025.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. *Mapeamento de áreas de risco de escorregamento e inundação – Município de São Sebastião*. São Paulo, 2020. (Relatório nº 57.721).

Magalhães, F. S. et al. Avaliação da potencialidade a movimentos de massa na Serra do Mar, entre São Sebastião e Cubatão, com vistas ao duto OSBAT. In: Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, 4., 2005, Salvador, BA. Anais... Salvador: ABMS, 2005. v. 1, p. 227-241.

Saaty, T.L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. McGraw-Hill. 1980.

Souza et al. (2020) – Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine – Remote Sensing, Volume 12, Issue 17, 10.3390/rs12172735

Vedovello, R. et al. Avaliação da suscetibilidade aos processos potencializadores de risco a escorregamentos e inundações do município de São Sebastião - SP. In: Seminário Anual do Instituto Geológico (SAIG), 2., 1995, São Paulo. Resumos Expandidos. São Paulo: Instituto Geológico - SMA, 1995. p. 38-41.