



Imagem gerada por IA, meramente ilustrativa.



Corpo de Bombeiros
Militar do Estado do
Rio de Janeiro

2 de julho de 2026

Análise Geoestatística das Ocorrências de Defesa Civil Associadas a Movimentos de Massa em Niterói (RJ): Estimativa Probabilística e Mapeamento de Suscetibilidade

Autor:

Luciano Salviano de Sales

Mestrado em Geotecnia

ORCID: [0009-0002-7728-7102](https://orcid.org/0009-0002-7728-7102)

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

E-mail: lucian.salviano@gmail.com



SECRETARIA DE ESTADO DE DEFESA CIVIL
CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
REVISTA CIENTÍFICA SOLDADO DO FOGO

ANÁLISE GEOESTATÍSTICA DAS OCORRÊNCIAS DE DEFESA CIVIL
ASSOCIADAS A MOVIMENTOS DE MASSA EM NITERÓI (RJ):
ESTIMATIVA PROBABILÍSTICA E MAPEAMENTO DE
SUSCETIBILIDADE

Luciano Salviano de Sales^{1,2*}

¹ Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

² Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

*Autor correspondente. E-mail: lucian.salviano@gmail.com

RESUMO: Introdução: Os movimentos de massa constituem um dos principais processos responsáveis por desastres naturais em áreas urbanas ocupadas por encostas. No município de Niterói (RJ), eventos pluviométricos intensos associados à elevada declividade do terreno têm contribuído para a recorrência de deslizamentos, exigindo ferramentas capazes de subsidiar ações preventivas de gestão de riscos. Objetivo: Avaliar o potencial da aplicação de técnicas geoestatísticas na modelagem espacial de ocorrências de Defesa Civil associadas a movimentos de massa, visando à construção de superfícies probabilísticas de suscetibilidade. Métodos: Foram analisados aproximadamente 1.200 registros históricos disponibilizados pela Defesa Civil Municipal. Após validação, georreferenciamento e tratamento de inconsistências espaciais, foram selecionadas 725 ocorrências associadas a dados pluviométricos e 475 associadas à declividade. Os dados foram modelados em ambiente SIG por meio de variogramas experimentais e krigagem ordinária utilizando o software SGeMS. Resultados: Os variogramas evidenciaram dependência espacial significativa, com alcances entre 6 km e 8 km. A krigagem anisotrópica apresentou menor variância média de estimativa em comparação à abordagem omnidirecional, indicando melhor representação da estrutura espacial do fenômeno. As superfícies geradas identificaram áreas espacialmente compatíveis com setores historicamente afetados por movimentos de massa no município. Conclusão: Os resultados sugerem que a geoestatística constitui ferramenta promissora para o mapeamento de suscetibilidade a movimentos de massa, permitindo incorporar explicitamente a variabilidade espacial e a incerteza associada às estimativas. A metodologia pode contribuir para o planejamento territorial e para as ações preventivas da Defesa Civil.

Palavras-chave: Geoestatística, Krigagem, Defesa Civil, Movimentos de Massa, Suscetibilidade.

ABSTRACT: Introduction: Mass movements are among the main natural hazards affecting urbanized hillside environments. In Niterói (RJ), intense rainfall events combined with steep terrain conditions contribute to recurrent landslide occurrences. Objective: To evaluate the potential of geostatistical techniques for modeling Civil Defense records associated with mass movements and generating probabilistic susceptibility surfaces. Methods: Approximately 1200 historical records were analyzed. After validation, georeferencing and spatial consistency assessment, 725 rainfall-related records and 475 slope-related records were selected. Experimental variograms and ordinary kriging were applied using SGeMS software. Results: Significant spatial dependence was identified, with variogram ranges between 6 and 8 km. Anisotropic kriging produced lower estimation variances than isotropic kriging. The generated surfaces highlighted areas spatially consistent with historically affected sectors of the municipality. Conclusion: The results suggest that geostatistical approaches represent a promising tool for susceptibility assessment and may support Civil Defense risk management and preventive planning activities.

Keywords: Geostatistics, Kriging, Civil Defense, Landslides, Susceptibility.





1. INTRODUÇÃO

Os movimentos de massa constituem importantes processos geomorfológicos responsáveis por perdas humanas, danos materiais e impactos ambientais em diversas regiões do mundo. No Brasil, tais eventos estão frequentemente associados à ocorrência de chuvas intensas, à ocupação inadequada de encostas e às características geológicas e geotécnicas dos terrenos.

No estado do Rio de Janeiro, eventos extremos ocorridos em 2010 e 2011 evidenciaram a vulnerabilidade de áreas urbanizadas implantadas em encostas. Em Niterói, o desastre do Morro do Bumba tornou-se um marco na gestão de riscos geológicos, impulsionando investimentos em monitoramento pluviométrico e sistemas de alerta.

Tradicionalmente, estudos de estabilidade de encostas utilizam métodos determinísticos fundamentados em parâmetros geotécnicos. Embora eficientes em escala local, tais métodos apresentam limitações quando aplicados em áreas extensas, devido à dificuldade de obtenção de parâmetros representativos. Modelos empíricos baseados em limiares pluviométricos também são amplamente utilizados, porém frequentemente não incorporam explicitamente a variabilidade espacial dos fatores condicionantes.

Nesse contexto, a geoestatística apresenta-se como alternativa capaz de modelar a dependência espacial de variáveis regionalizadas por meio de funções de correlação espacial e estimadores de mínima variância.

Embora diversos estudos utilizem inventários de escorregamentos para elaboração de mapas de suscetibilidade, muitos municípios brasileiros dispõem apenas de registros operacionais produzidos pelos órgãos de Defesa Civil. Ainda são limitadas as pesquisas que investigam o potencial dessas bases para a construção de modelos espaciais probabilísticos.

Dessa forma, o presente estudo busca responder à seguinte questão:

Em que medida registros históricos de ocorrências da Defesa Civil associados a movimentos de massa podem contribuir para a modelagem espacial da suscetibilidade quando integrados a variáveis condicionantes como precipitação e declividade?

O objetivo consiste em avaliar a aplicação de técnicas geoestatísticas na análise espacial dessas ocorrências, visando à geração de superfícies probabilísticas de suscetibilidade para o município de Niterói.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Movimentos de massa e suscetibilidade

Diversos autores propuseram sistemas de classificação para movimentos de massa, considerando a natureza do material envolvido, o tipo de movimento e outros fatores. As classificações



de Varnes¹ e sua versão expandida por Cruden e Varnes² estão entre as mais utilizadas globalmente. De acordo com Varnes¹, podem ser reconhecidos cinco tipos básicos de movimento: quedas (*falls*), tombamentos (*topples*), deslizamentos (*slides*), espalhamentos (*spreads*) e escoamentos ou corridas (*flows*), combinados a dois tipos principais de material (rocha ou solo). Cruden e Varnes (1996) mantiveram essa estrutura, adicionando subcategorias relativas ao teor de água (seco, úmido, molhado, muito molhado) e à velocidade de movimentação para qualificar melhor cada evento.

Guidicini e Nieble³ sugeriram a distinção entre agentes predisponentes e agentes efetivos na deflagração de movimentos de massa. Os agentes predisponentes correspondem às características intrínsecas do ambiente que deixam a encosta naturalmente propensa à instabilização – por exemplo, a geologia (tipo de rocha/solo e grau de intemperismo), a geomorfologia (declividade, forma e altura da encosta), a cobertura vegetal, entre outros. Tais fatores pré-existent determinam o potencial de instabilidade latente de um terreno. Por sua vez, os agentes efetivos são aqueles que atuam imediatamente para “desencadear” o deslizamento. Eles se subdividem em efetivos preparatórios, que gradualmente enfraquecem a encosta (chuvas prolongadas, erosão lenta, ressecamento e trincas causados por variações climáticas, vibrações, ações antrópicas como cortes e desmatamentos), e efetivos imediatos, que são o gatilho final do evento (uma chuva extrema de curto período, um terremoto, etc.).

Em suma, uma encosta pode já estar fragilizada por condições predisponentes, mas é normalmente um agente efetivo imediato (gatilho) que precipita o movimento de massa observado.

No caso de Niterói e regiões similares, os principais agentes predisponentes incluem a presença de solos residuais profundos e pouco coesivos cobrindo encostas íngremes do embasamento gnáissico-granítico, além do histórico de ocupação desordenada que remove vegetação protetora e sobrecarrega os taludes com moradias precárias, na visão de Chaves⁴.

2.2 Ocorrências de Defesa Civil

Ocorrência de Defesa Civil corresponde ao registro operacional de atendimento relacionado a uma ameaça, desastre ou situação de risco reportada pela população ou identificada pelos agentes públicos.

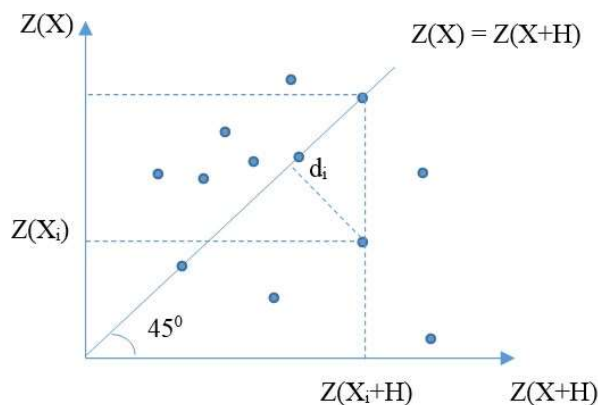
Importa destacar que ocorrência, suscetibilidade e risco são conceitos distintos. Enquanto a suscetibilidade representa a propensão natural do terreno à ocorrência de determinado processo, o risco incorpora também os elementos expostos e suas vulnerabilidades.

2.3 Geoestatística aplicada a movimentos de massa

A análise de movimentos de massa em encostas tem evoluído ao longo das últimas décadas, incorporando diferentes abordagens metodológicas que buscam compreender a complexidade desses fenômenos. Tradicionalmente, os estudos concentram-se em métodos determinísticos baseados em parâmetros geotécnicos, bem como em modelos empíricos, como os limiares pluviométricos, amplamente utilizados em sistemas de alerta⁵. No entanto, tais abordagens apresentam limitações, sobretudo em análises regionais, por não considerarem de forma integrada a variabilidade espacial e a natureza multivariada dos processos envolvidos.

Nesse contexto, a geoestatística surge como uma alternativa robusta para a análise de fenômenos espacialmente distribuídos, permitindo modelar a dependência espacial por meio do conceito de variáveis regionalizadas, conforme proposto por Matheron⁶, como mostrado na Figura 1. Essa abordagem considera que os valores de uma variável no espaço não são independentes, mas apresentam correlação em função da distância e da direção, característica fundamental na análise de ocorrências de deslizamentos.

Figura 1 – Gráfico $Z(X)$ x $Z(X+H)$



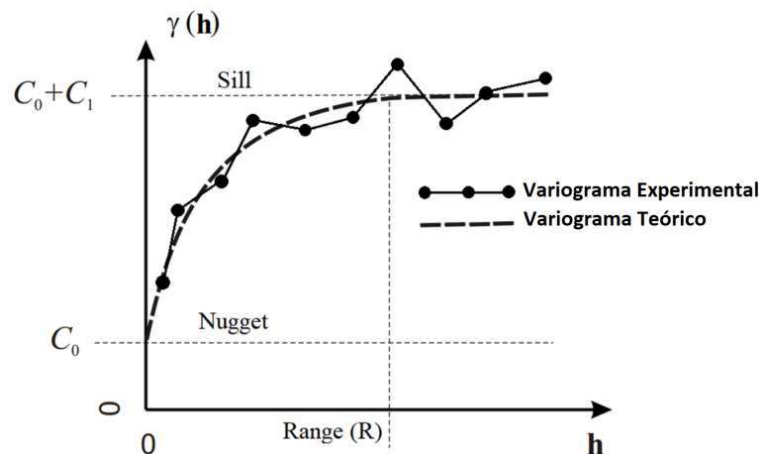
Fonte: Journel e Huijbregts⁷

O variograma constitui o principal instrumento da geoestatística, sendo utilizado para quantificar a variabilidade espacial dos dados⁸, conforme equação 1, onde n representa o número de pares de pontos separado de H e Z a variável regionalizada nos pontos X e $X+H$. A partir do variograma experimental, ajustam-se modelos teóricos (como esférico, exponencial e gaussiano), que permitem identificar parâmetros fundamentais, como o alcance, o patamar e o efeito pepita, os quais descrevem a estrutura de continuidade espacial da variável analisada⁹, como ilustrado na Figura 2, onde C_0 representa o efeito pepita, C_0+C_1 a variância máxima e Range a amplitude até onde os pares apresentam dependência espacial. Além disso, aspectos como a estacionaridade e a

anisotropia devem ser considerados, uma vez que a variabilidade espacial pode diferir conforme a direção¹⁰.

$$\overline{d^2} = \gamma(H) = \frac{1}{2N(H)} \sum_{i=1}^{N(H)} [Z(X_i + H) - Z(X_i)]^2 \quad (1)$$

Figura 2 – Exemplo de um modelo final de variograma.



Fonte: Wackernagel⁹

A partir da modelagem variográfica, aplica-se a krigagem, de acordo com equação 2, que consiste em um estimador linear não enviesado e de variância mínima, capaz de estimar valores em locais não amostrados com base na correlação espacial dos dados¹¹. Diferentes variantes, como a krigagem ordinária, simples e indicativa, permitem adaptar o método às características do problema analisado, sendo esta última especialmente relevante para a estimativa probabilística de ocorrência de eventos, como deslizamentos¹².

$$Z^*(X_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i^{KO} Z(X_i) \quad (2)$$

O λ_i é o coeficiente de krigagem, que representa os pesos atribuídos a cada ponto de dado amostrado $Z(X_i)$ (conhecido) ao redor do local que se deseja estimar $Z^*(X_0)$ (desconhecido). Além disso, técnicas como validação cruzada são empregadas para avaliar o desempenho dos modelos adotados, enquanto a cokrigagem possibilita a integração de variáveis correlacionadas, como precipitação e declividade, ampliando a capacidade de análise em cenários com dados limitados¹³. Essas abordagens permitem superar limitações dos modelos empíricos tradicionais, ao incorporar explicitamente a estrutura de dependência espacial dos dados.

Aplicações recentes demonstram o potencial da geoestatística na análise de suscetibilidade a movimentos de massa, especialmente quando integrada a Sistemas de Informações Geográficas



(SIG) e a dados georreferenciados¹². No contexto urbano de Niterói, caracterizado por relevo acidentado e ocupação desordenada, essa abordagem mostra-se particularmente promissora, pois possibilita a geração de mapas probabilísticos contínuos, com quantificação das incertezas associadas, contribuindo para o aprimoramento das estratégias de prevenção e gestão de riscos geotécnicos.

Dessa forma, a literatura indica que a integração de métodos geoestatísticos com abordagens probabilísticas representa um avanço significativo na análise de deslizamentos, alinhando-se à proposta deste trabalho de utilizar a correlação espacial como elemento central para o mapeamento de suscetibilidade no município de Niterói.

3. MÉTODOS

3.1 Área de estudo

O município de Niterói com uma área territorial de 129,4 Km², está localizado na porção leste da Baía de Guanabara, na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, e apresenta características geológicas e geomorfológicas que favorecem a ocorrência de movimentos de massa. A geologia local é composta predominantemente por rochas cristalinas do embasamento gnáissico-granítico, recobertas por espessas camadas de solos residuais formados pelo intenso intemperismo tropical.

Do ponto de vista geomorfológico, o município possui relevo acidentado, com morros, maciços costeiros e encostas íngremes, destacando-se a Serra da Tiririca e diversos morros urbanos. Essas características, associadas às elevadas declividades, contribuem para o aumento da suscetibilidade a escorregamentos.

O clima é tropical úmido, com chuvas concentradas principalmente nos meses de primavera e verão. Eventos pluviométricos intensos e acumulados elevados em curtos períodos atuam como importantes agentes deflagradores de movimentos de massa, especialmente em encostas previamente fragilizadas.

Historicamente, Niterói registra diversos episódios de deslizamentos, destacando-se a tragédia do Morro do Bumba, em 2010, que evidenciou a vulnerabilidade das áreas ocupadas em encostas. Estudos recentes do Plano Municipal de Redução de Riscos (PMRR) identificam elevada concentração de ocorrências em bairros como Fonseca, Caramujo e Santa Rosa, reforçando a necessidade de aprimorar as ações de monitoramento, prevenção e mapeamento de suscetibilidade no município.

3.2 Banco de dados

Foram analisados aproximadamente 1.200 registros históricos associados a movimentos de massa disponibilizados pela Defesa Civil Municipal.



Tais registros não continham classificação padronizada da tipologia dos movimentos de massa. Dessa forma, as ocorrências foram tratadas de maneira agregada, representando uma limitação do estudo, uma vez que diferentes mecanismos de ruptura podem apresentar condicionantes espaciais distintos.

Crítérios de inclusão

- ocorrências associadas a movimentos de massa;
- registros dentro do limite municipal;
- coordenadas válidas;
- informações mínimas para georreferenciamento.

Crítérios de exclusão

- registros duplicados;
- inconsistências espaciais;
- ausência de localização;
- impossibilidade de associação às variáveis analisadas.

Após os procedimentos de validação, georreferenciamento e tratamento das inconsistências espaciais, foram selecionados 725 registros de ocorrências associados à precipitação e 475 registros relacionados à declividade, constituindo a base de dados utilizada nas análises geoestatísticas e na construção das superfícies de suscetibilidade a movimentos de massa.

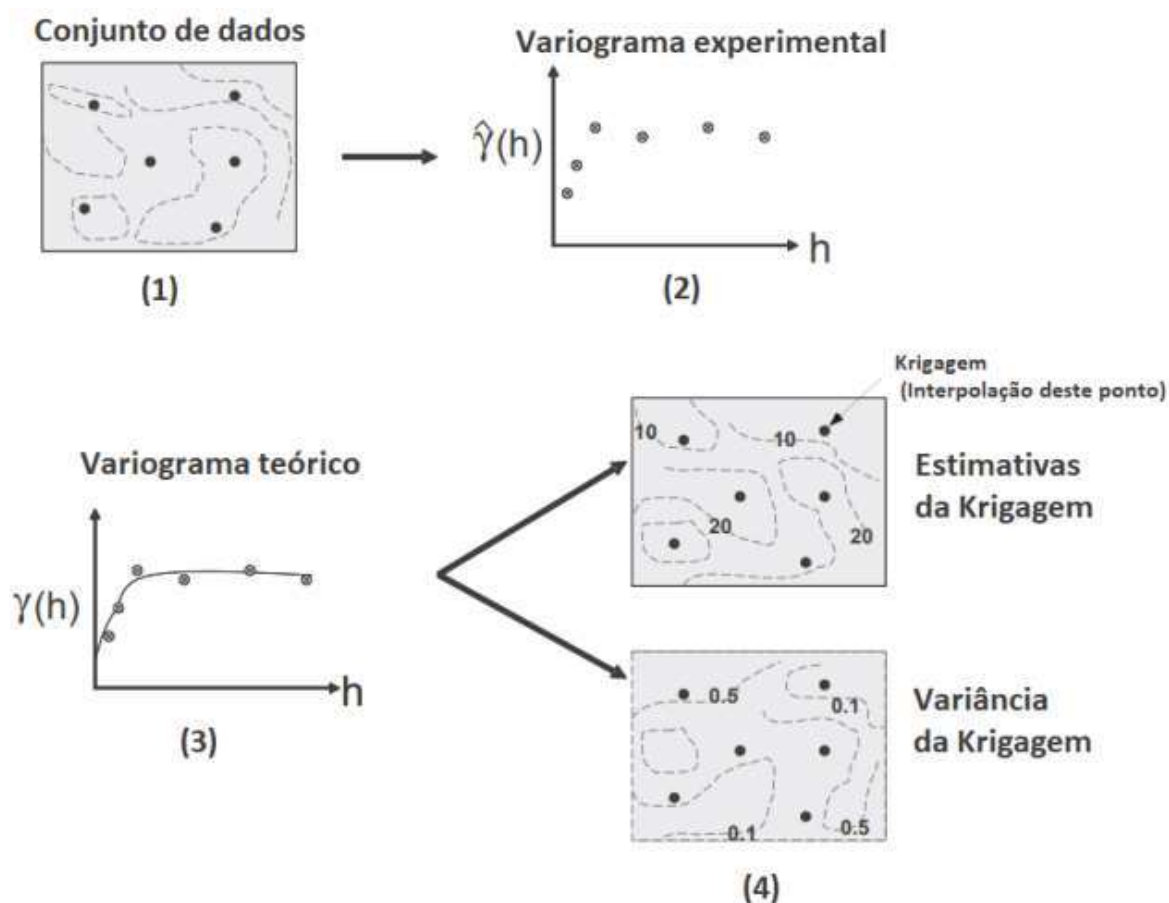
3.3 Modelagem Geoestatística

No contexto deste trabalho, pode-se definir a variável de interesse como uma medida de ocorrência de movimentos de massa em uma localização – por exemplo, as declividades e os acumulados de chuvas dos eventos registrados em uma certa célula de malha durante o período de análise. A partir dos dados pontuais coletados (deslizamentos georreferenciados), calcula-se o variograma experimental, que usualmente revela um aumento da dissimilaridade (semivariância) com o aumento da distância até atingir um platô (patamar). Esse comportamento indica que distâncias, em média, as ocorrências guardam correlação: distâncias menores que o alcance crítico apresenta valores mais similares (ou seja, presença de autocorrelação espacial entre as declividades e acumulados de chuvas nas ocorrências de deslizamentos), enquanto em distâncias maiores a ocorrência de um evento já não “influencia” a de outro. Ajustando-se um modelo teórico a esse variograma (por exemplo, modelos exponencial, esférico ou gaussiano), obtêm-se parâmetros importantes: o alcance (distância além da qual os dados deixam de estar correlacionados), o patamar (valor da semivariância correspondente à variância inerente dos dados) e o efeito pepita (dispersão

aparentemente aleatória em distâncias muito curtas, devida a erros de amostragem ou variabilidade micro-escala não capturada).

Com um variograma modelado, aplica-se então a técnica de krigagem (kriging), que é um estimador linear ponderado ótimo no sentido dos mínimos quadrados. Simplificadamente, a krigagem permite estimar o valor da variável em qualquer local não amostrado como uma média ponderada dos valores observados em torno, cujos pesos são determinados segundo a estrutura de correlação espacial (variograma) previamente identificada¹⁰. Em outras palavras Krigagem é uma técnica de interpolação que aproveita a correlação espacial entre amostras para prever valores em locais não amostrados. Mas a principal diferença é que pode-se construí-lo usando a função matemática obtida do semivariograma. Essa técnica tem duas grandes vantagens no contexto de suscetibilidade:

Figura 3 – Fluxo do processo de krigagem.



Fonte: Jakob e Young¹⁶



(I) produz estimativas com variância mínima não-viesada, incorporando a redundância de informação trazida pela proximidade dos pontos (ou seja, considera que pontos vizinhos trazem informações similares); e

(II) fornece, junto com a estimativa, uma medida da incerteza (variância de krigagem) para cada local estimado, permitindo mapear onde as predições são mais ou menos confiáveis. No caso de variável binária (ocorreu ou não ocorreu deslizamento), pode-se empregar a krigagem indicativa, que gera diretamente estimativas entre 0 e 1 interpretáveis como a probabilidade de ocorrência do fenômeno naquele local¹². Essa probabilidade estimada por krigagem indicativa é condicional aos dados observados e à estrutura de correlação espacial inferida, equivalendo em certo sentido a aplicar o Teorema de Bayes no espaço, onde os dados vizinhos atuam como evidências que alteram a probabilidade a priori de ocorrência em um dado ponto.

O variograma experimental pode ser considerado como uma representação gráfica da distribuição de dados, além de mostrar a variância com o incremento da distância das amostras coletadas. O variograma é a base para a aplicação do método de Krigagem. Assim, pode-se dividir o processo de krigagem em três etapas fundamentais¹⁵: (1) Examinar a similaridade entre um conjunto de amostras coletadas via análise do variograma experimental; (2) Ajustar uma função matemática (modelo) ao variograma experimental, chamado de variograma teórico; (3) Aplicar a interpolação por krigagem com base na função definida no passo 2. Este fluxo do processo da krigagem é ilustrado na Figura 3.

3.4 Análise estatística

Todos os 1200 registros de deslizamentos compilados foram inseridos em um SIG (Sistema de Informações Geográficas), como banco de dados espacial de pontos de ocorrência para trabalhar com o software SGEMS (Geostatistical Modelling Software), desenvolvido pela universidade de Stanford, utilizado para solucionar problemas que envolvem variáveis espacialmente relacionadas.

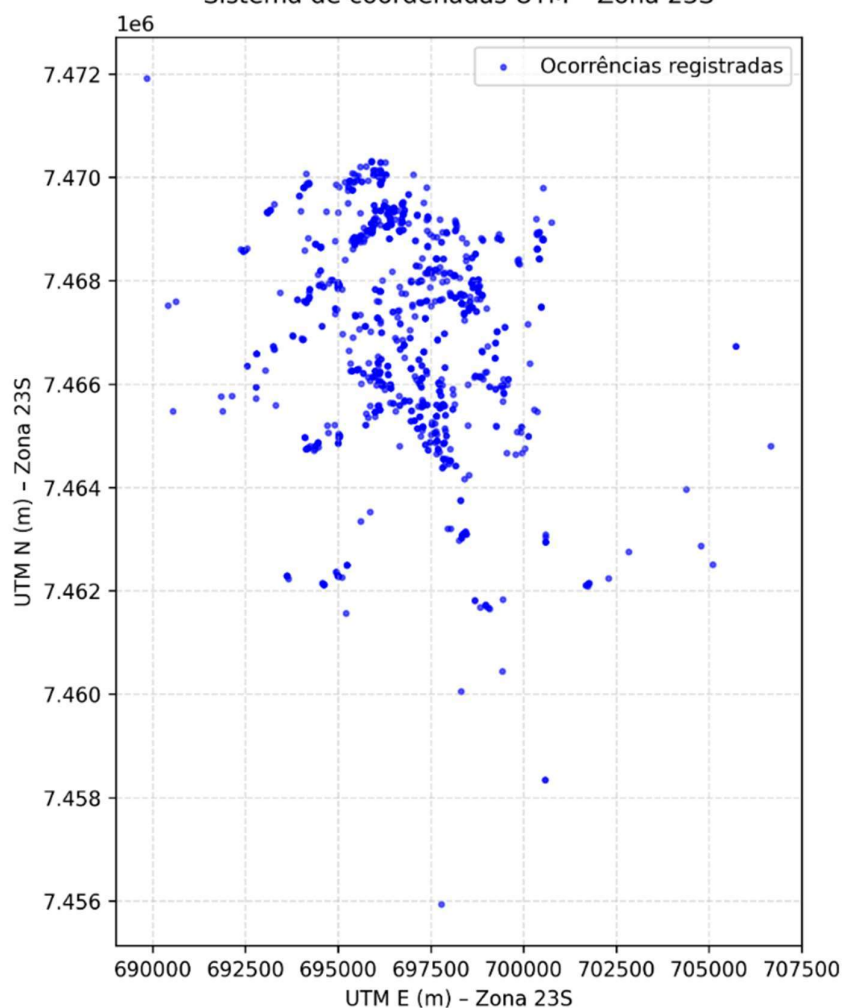
A compilação e integração de dados de movimentos de massa no município de Niterói, a partir de relatórios técnicos da Defesa Civil. Tais dados foram organizados em ambiente SIG, permitindo sua espacialização em coordenadas UTM (Universal Transverso de Mercator), como mostrado na Figura 4.

Para a realização das análises geoestatísticas no SGeMS, foi configurado e gerado um grid bidimensional (2D) com resolução espacial de 50 m, definido a partir da extensão real dos pontos amostrais previamente convertidos para o sistema de coordenadas UTM. A escolha dessa resolução buscou-se um equilíbrio entre o nível de detalhamento espacial e a estabilidade dos resultados, sendo compatível com a densidade amostral disponível.



Figura 4 – Grid gerado no SGEMS com 1200 ocorrências de movimentos de massa.

Distribuição espacial das ocorrências – Município de Niterói (RJ)
Sistema de coordenadas UTM – Zona 23S

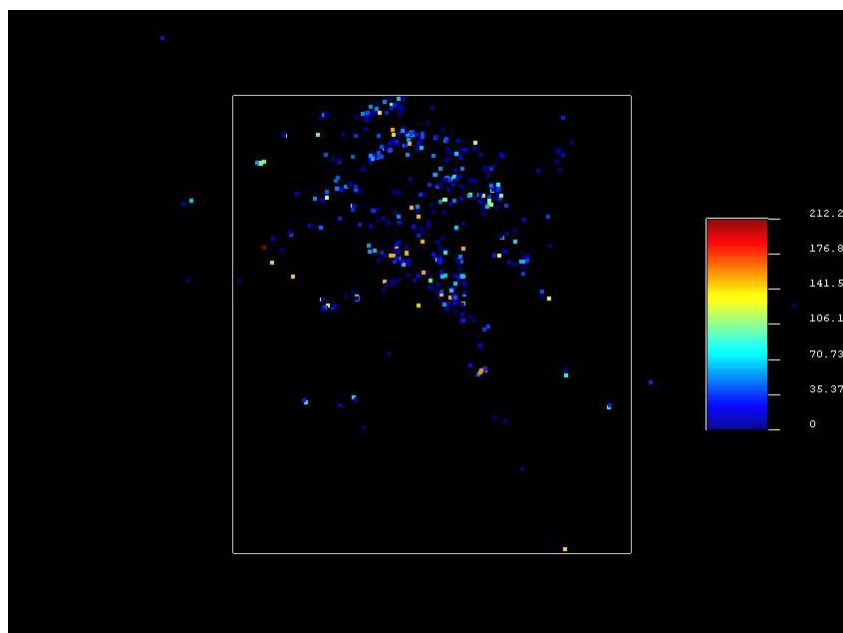


Fonte: O autor, 2026

O grid foi configurado com 212 células na direção X (nx) e 243 células na direção Y (ny), totalizando uma única camada na direção vertical (nz = 1), uma vez que a análise foi conduzida em duas dimensões. O tamanho das células foi definido como 50 m × 50 m (sx = sy = 50 m), enquanto o espaçamento vertical (sz) foi mantido igual a 1, por não haver variação na direção Z. As coordenadas de origem do grid foram fixadas em $x_0 = 691.750$ m e $y_0 = 7.458.250$ m, garantindo o correto posicionamento espacial da malha em relação à área de estudo.

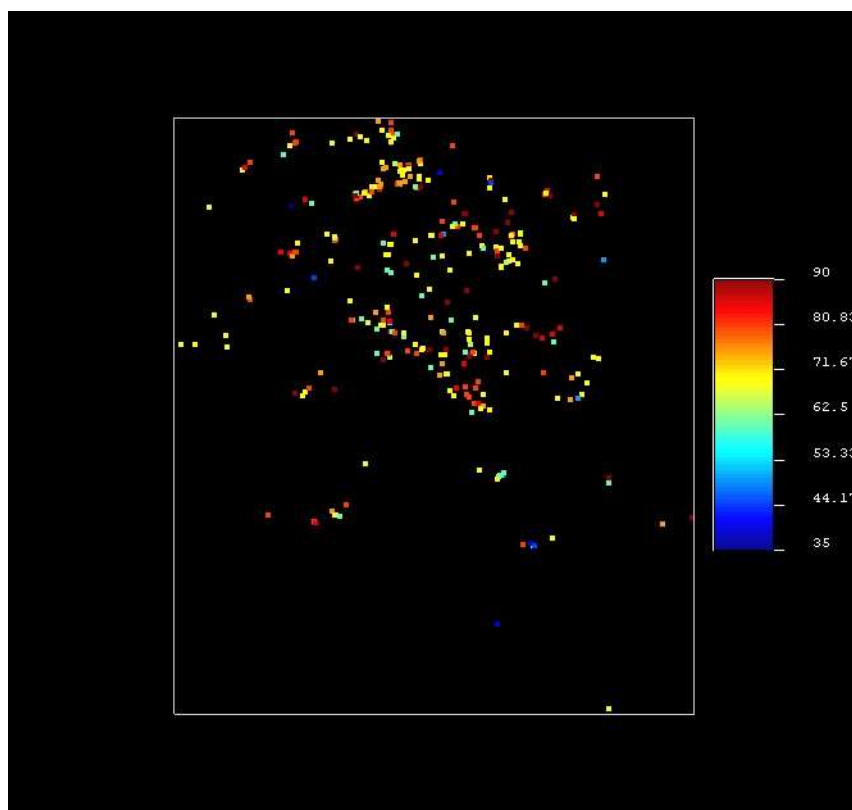
Com essa configuração, o grid cobre uma área aproximada de 10,6 km × 12,15 km, correspondendo a cerca de 129 km², valor compatível com a área total analisada, estimada em aproximadamente 130 km².

Figura 5 – Grid gerado no SGEMS com os 725 movimentos de massa no município de Niterói com escala de cores de acumulados de chuva em 24h (2019-2022) para krigagem.



Fonte: O autor, 2026

Figura 6 – Grid gerado no SGEMS das declividades nos locais de ocorrência de 475 movimentos de massa para krigagem



Fonte: O autor, 2026

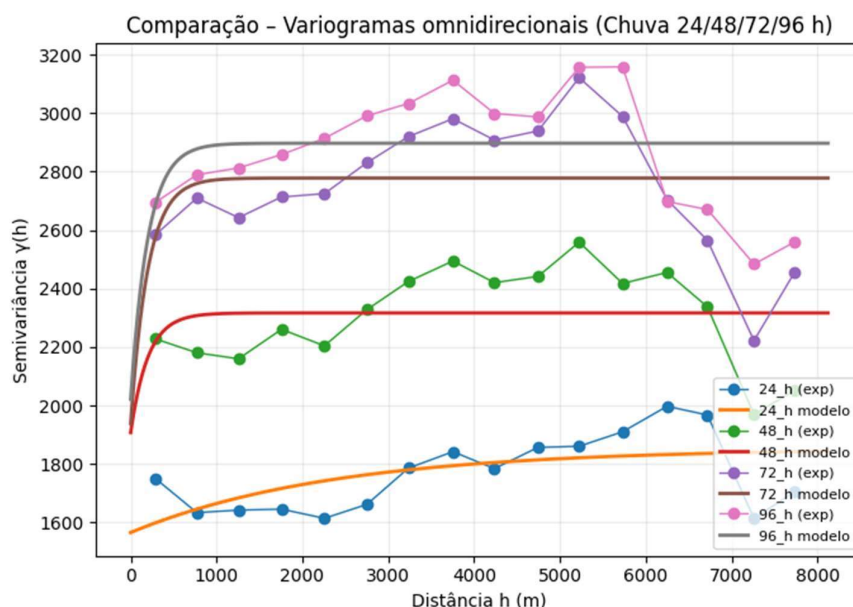
Após os procedimentos de tratamento, validação e estruturação das 1.200 ocorrências, sendo 725 associadas a dados de precipitação e 475 relacionadas à declividade. Essas informações foram organizadas em grids espaciais, conforme ilustrado nas Figuras 5 e 6, os quais se mostraram adequados para a aplicação da krigagem e para a representação contínua da distribuição espacial das variáveis analisadas.

4. RESULTADOS

Com base nos grids gerados anteriormente foi adotado um modelo de variograma omnidirecional para a modelagem global da continuidade espacial para os acumulados de chuva (Figura 7) enquanto a krigagem anisotrópica foi aplicada para incorporar variações direcionais identificadas por meio de variogramas direcionais em função das declividades (Figura 8). Em ambas as abordagens, utilizou-se o modelo exponencial, conforme equação 3, com parâmetros ajustados a partir do variograma experimental, com uma tolerância angular ($\pm 22,5^\circ$).

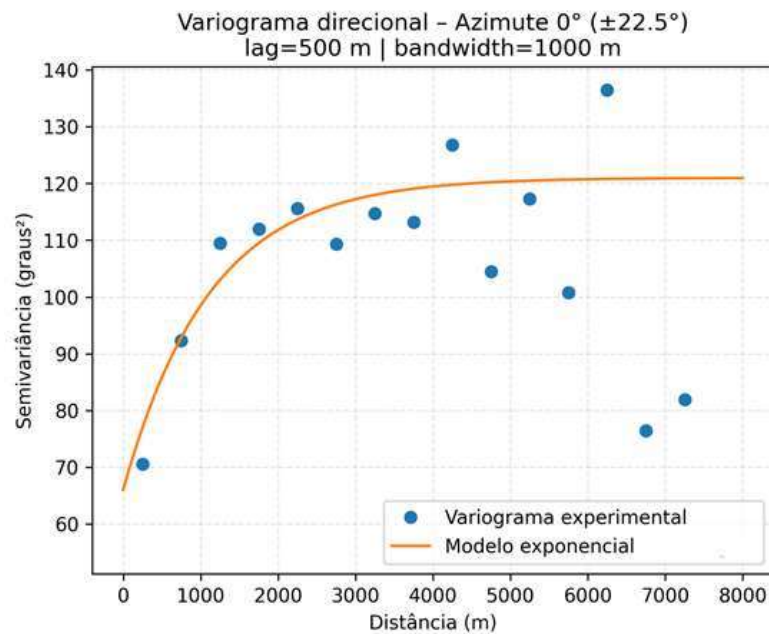
$$\gamma(H) = C_0 + C(1 - e^{-\frac{|H|}{a}}) \quad (3)$$

Figura 7 – Variogramas omnidirecional experimental ajustados ao modelo exponencial dos acumulados de Chuva 24h, 48h, 72h e 96h.



Fonte: O autor, 2026

Figura 8 – Variograma direcional na Norte-Sul.



Fonte: O autor, 2026

A escolha do modelo exponencial baseou-se na forma observada dos variogramas experimentais, que apresentaram crescimento rápido próximo à origem e aproximação assintótica ao patamar. Esse comportamento é frequentemente observado em fenômenos ambientais e geotécnicos caracterizados por continuidade espacial gradual, sendo amplamente empregado em estudos geoestatísticos aplicados a processos naturais.

Nesse contexto, além do variograma na direção 0°, foram também ajustados variogramas teóricos nas direções 45°, 90°, 135° e na condição omnidirecional (isotrópica), cujas equações resultaram nos respectivos valores de efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C$) e alcance (range), conforme apresentados na Tabela 1.

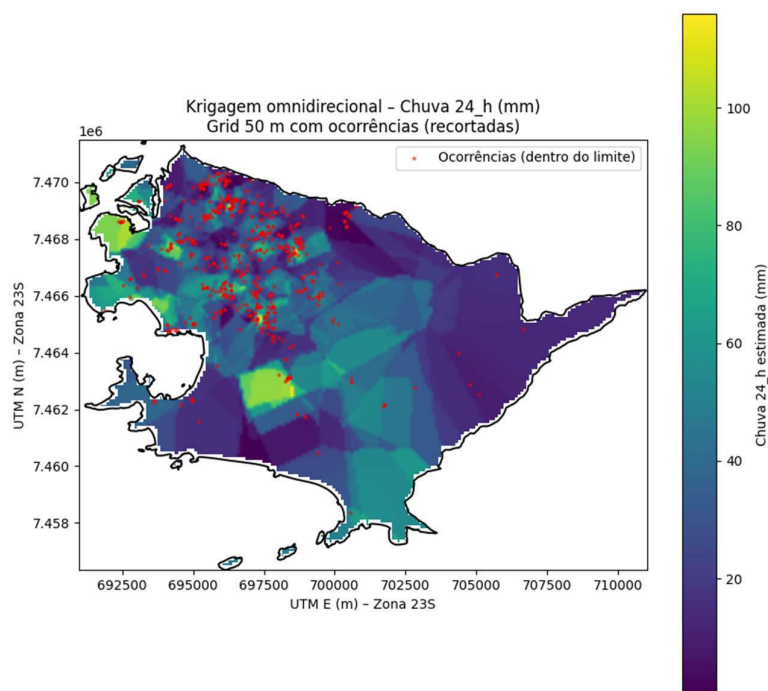
Tabela 1 – Equações do semivariograma para declividades

$\gamma(H) = C_0 + C \left[1 - e^{-\frac{ H }{a}} \right]$	0°	45°	90°	135°	Omnidirecional
C_0	66°	66°	66°	66°	76°
C	55°	55°	55°	55°	50°
$C_0 + C$	121°	121°	121°	121°	126°
a (alcance)	6000m	8000 m	8000 m	8000 m	7000m

Fonte: O autor, 2026

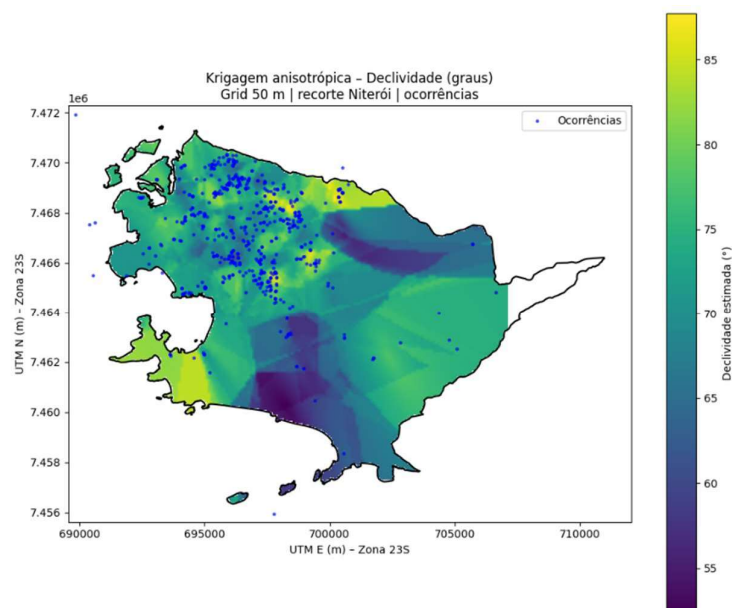
Com base na modelagem variográfica, foram aplicadas técnicas de krigagem com o objetivo de estimar a distribuição espacial das variáveis analisadas e inferir áreas suscetíveis a movimentos de massa, considerando os acumulados de chuva (Figura 9) e as declividades do terreno (Figura 10). Essa abordagem possibilitou a geração de superfícies contínuas e a análise da dependência espacial dos fenômenos.

Figura 9 – Krigagem omnidirecional de acumulados de chuva em 24h x ocorrências



Fonte: O autor, 2026

Figura 10 – Krigagem anisotrópica = declividade

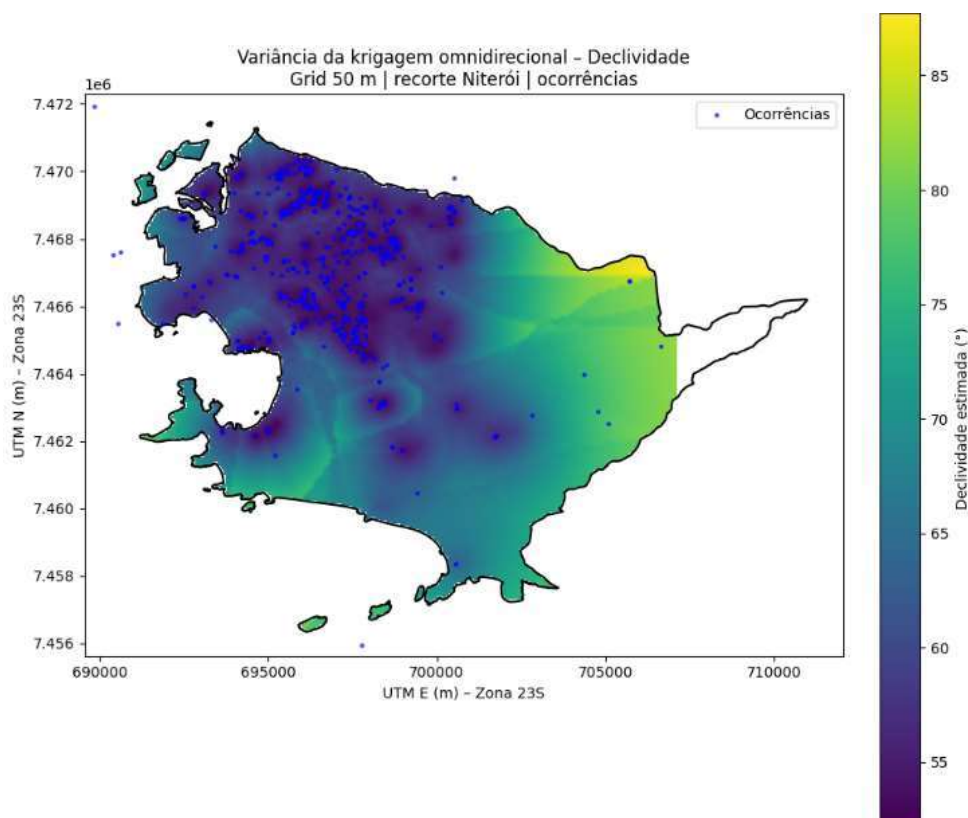


Fonte: O autor, 2026

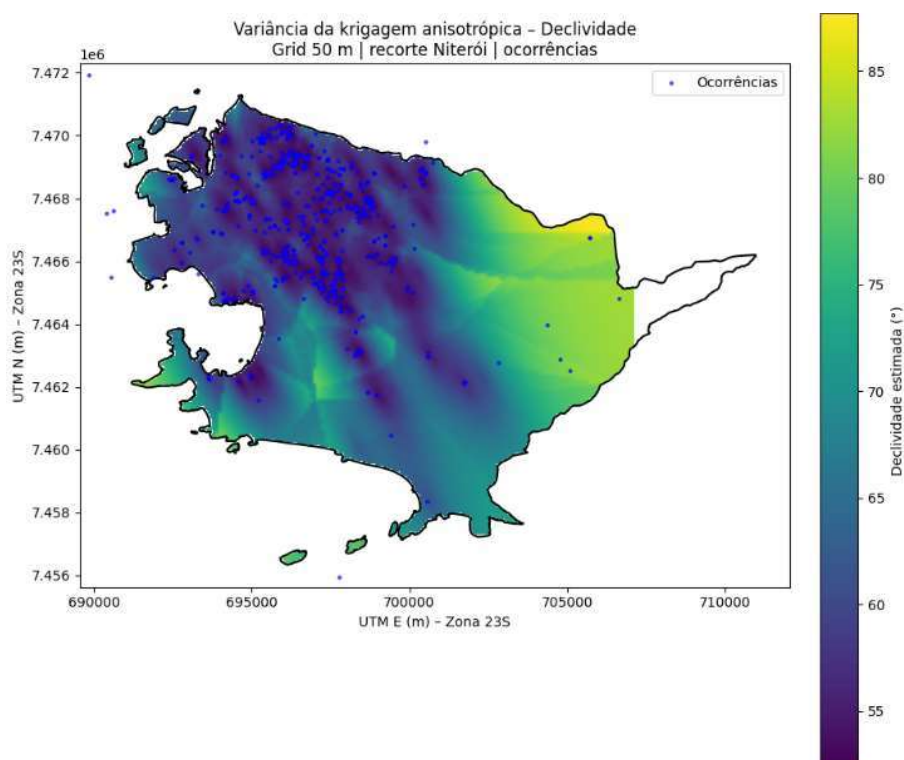
Na sequência, foram avaliadas duas abordagens distintas de krigagem aplicadas à variável declividade: a krigagem omnidirecional, fundamentada em um modelo de variograma isotrópico, e a krigagem anisotrópica, que incorpora variações na continuidade espacial em função da direção, identificadas por meio da análise de variogramas direcionais.

A análise da variância de krigagem permite avaliar a incerteza associada às estimativas espaciais geradas. Essa variância independe dos valores observados da variável, sendo influenciada principalmente pela distribuição espacial das amostras, pelo modelo de variograma adotado e pela configuração da vizinhança de busca. De modo geral, os menores valores de variância concentram-se nas regiões com maior densidade amostral, enquanto os maiores valores ocorrem nas áreas periféricas e menos amostradas, evidenciando a influência direta da cobertura espacial dos dados na confiabilidade das estimativas.

Figura 11 –Variância da krigagem omnidirecional = declividade



Fonte: O autor, 2026

Figura 12 – Variância da krigagem anisotrópica = declividade

Fonte: O autor, 2026

Adicionalmente, verificou-se que a krigagem anisotrópica (Figura 12) apresentou desempenho superior em relação à abordagem omnidirecional, com valores médios de variância da ordem de 66 graus, inferiores aos aproximadamente 76 graus obtidos na krigagem isotrópica (Figura 11). Esse resultado demonstra que a incorporação da anisotropia, ao considerar direções preferenciais de continuidade espacial, contribui para a redução da incerteza e para a geração de estimativas mais consistentes com a estrutura espacial do fenômeno.

5. DISCUSSÃO

Os resultados indicam a existência de dependência espacial significativa nas ocorrências analisadas, sugerindo que a geoestatística pode representar ferramenta útil para modelagem espacial de suscetibilidade.

Os alcances observados encontram-se compatíveis com estudos realizados por Lima¹² e outros autores que aplicaram técnicas geoestatísticas a processos de instabilidade de encostas.

A influência da precipitação observada no presente estudo é consistente com trabalhos clássicos desenvolvidos por Tatizana et al.⁵, que identificaram correlação entre acumulados pluviométricos e escorregamentos.



Entretanto, a metodologia empregada não permite estabelecer relações causais diretas, devendo os resultados ser interpretados como indicadores espaciais de suscetibilidade relativa.

Limitações:

- ausência de tipologia dos escorregamentos;
- possibilidade de subnotificação;
- maior concentração de registros em áreas urbanizadas;
- ausência de validação cruzada completa.

6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos sugerem a existência de dependência espacial nas ocorrências analisadas, permitindo a aplicação de técnicas geoestatísticas para construção de superfícies de suscetibilidade relativa.

A incorporação da anisotropia mostrou-se capaz de reduzir as incertezas associadas às estimativas, produzindo resultados espacialmente mais consistentes.

A integração entre registros históricos da Defesa Civil, precipitação e declividade permitiu identificar áreas potencialmente suscetíveis a movimentos de massa no município de Niterói.

Embora existam limitações inerentes à base de dados utilizada, a metodologia apresenta potencial para apoiar ações de monitoramento, planejamento territorial e gestão preventiva de riscos.

REFERÊNCIAS

1. Varnes DJ. Slope movement types and processes. In: Schuster RL, Krizek RJ, editors. Landslides: analysis and control. Washington: Transportation Research Board; 1978. p. 11-33.
2. Cruden DM, Varnes DJ. Landslide types and processes. In: Turner AK, Schuster RL, editors. Landslides: investigation and mitigation. Washington: National Academy Press; 1996. p. 36-75.
3. Guidicini G, Nieble CM. Estabilidade de taludes naturais e de escavação. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher; 1983.
4. Chaves APM. Análise espacial de movimentos de massa no município de Niterói-RJ [dissertação]. Niterói: Universidade Federal Fluminense; 2016.
5. Tatizana C, Ogura AT, Cerri LES, Rocha MCM. Análise de correlação entre chuvas e escorregamentos – Serra do Mar, Município de Cubatão. In: Anais do V Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia; 1987; São Paulo. São Paulo: ABGE; 1987.
6. Matheron G. The theory of regionalized variables and its applications. Fontainebleau: École Nationale Supérieure des Mines de Paris; 1971.
7. Journel AG, Huijbregts CJ. Mining geostatistics. London: Academic Press; 1978.





8. Yamamoto JK. Geoestatística: conceitos e aplicações. São Paulo: Oficina de Textos; 2001.
9. Wackernagel H. Multivariate geostatistics: an introduction with applications. 3rd ed. Berlin: Springer; 2012.
10. Yamamoto JK, Landim PMB. Geoestatística: conceitos e aplicações. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos; 2013.
11. Olea RA. Geostatistics for engineers and earth scientists. Boston: Kluwer Academic Publishers; 1999.
12. Lima GA. Aplicação de modelagem geoestatística na análise de suscetibilidade a deslizamentos na comunidade da Rocinha, Rio de Janeiro [dissertação]. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2017.
13. Carr JR. Numerical analysis for the geological sciences. Englewood Cliffs: Prentice Hall; 1990.
14. Universidade Federal Fluminense. Plano Municipal de Redução de Riscos do Município de Niterói. Niterói: UFF; 2024.
15. Zhang C. Fundamentals of spatial interpolation methods in environmental sciences: a review. Environmental Modelling & Software. 2011;26(7):134-145.
16. Jakob AAE, Young SD. Geostatistical modelling and kriging applications for environmental data. Environmental Earth Sciences. 2016;75(3):1-15.

