



Caracterização da Pluviometria Deflagradora de Deslizamentos com Abordagem Multimetodológica em Áreas Suscetíveis a Deslizamentos

Amanda Alves da Silva

Doutoranda em Eng. Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil | amandaalves@poli.ufrj.br

Marcos Barreto de Mendonça

Professor Associado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil | mbm@poli.ufrj.br

André de Souza Avelar

Professor Associado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil | andreavelar@acd.ufrj.br

RESUMO: Este trabalho explora a aplicação integrada de técnicas estatísticas e algoritmos de aprendizado de máquina com o objetivo de identificar padrões pluviométricos associados à deflagração de deslizamentos na região central de Angra dos Reis – RJ. A estratégia metodológica adotada combina a análise da relação entre a precipitação antecedente e a ocorrência de deslizamentos, utilizando o teste do Qui-Quadrado, com a modelagem de suscetibilidade por meio do algoritmo Random Forest. Foram examinados diferentes intervalos de acumulação de chuva em até 10 dias, tanto de forma individual quanto combinada, a fim de identificar os períodos mais influentes na deflagração dos eventos. Os resultados revelaram dependência estatística significativa entre precipitação e deslizamentos, com destaque para o período isolado de 48 horas e a combinação entre 24h e 96h, que apresentaram os maiores coeficientes de associação. Observou-se ainda que áreas com baixa e moderada suscetibilidade, definidas com base em variáveis geoambientais locais, demandam volumes de chuva mais elevados para a ocorrência de deslizamentos, enquanto regiões classificadas com alta e muito alta suscetibilidade apresentam maior sensibilidade a acumulados menores. Esses resultados reforçam o papel dos fatores geotécnicos e ambientais na dinâmica da instabilidade de encostas, evidenciando que a resistência dos solos pode atenuar ou acentuar os efeitos da chuva crítica. A integração de técnicas de aprendizado de máquina com ferramentas estatísticas mostra-se, assim, promissora para o aperfeiçoamento de sistemas de alerta e para a gestão de riscos em áreas urbanas sujeitas a desastres naturais.

PALAVRAS-CHAVE: Deslizamentos, Pluviometria, Qui-Quadrado, Aprendizado de Máquina, Suscetibilidade a Deslizamentos.

ABSTRACT: This research explores the integrated application of statistical techniques and machine learning algorithms with the aim of identifying rainfall patterns associated with the outbreak of landslides in the central region of Angra dos Reis - RJ. The methodological strategy adopted combines the analysis of the relationship between antecedent rainfall and the occurrence of landslides, using the Chi-Square test, with susceptibility modeling using the Random Forest algorithm. Different rainfall accumulation intervals of up to 10 days were examined, both individually and combined, in order to identify the most influential periods in triggering events. The results revealed significant statistical dependence between rainfall and landslides, with the 48-hour period in isolation and the combination of 24 and 96 hours showing the highest association coefficients. It was also observed that areas with low and moderate susceptibility, defined on the basis of local geoenvironmental variables, require higher volumes of rainfall for landslides to occur, while regions classified as having high and very high susceptibility are more sensitive to lower accumulations. These results reinforce the role of geotechnical and environmental factors in the dynamics of slope instability, showing that soil resistance can attenuate or accentuate the effects of critical rainfall. The integration of machine learning techniques with statistical tools is therefore promising for improving warning systems and risk management in urban areas subject to natural disasters.

KEYWORDS: Landslides, Rainfall, Chi-Square, Machine Learning, Landslide Susceptibility.

1 INTRODUÇÃO

A previsão de deslizamentos com base em critérios relacionados à chuva acumulada representa uma ferramenta estratégica nas ações de prevenção e resposta a impactos sociais, econômicos e ambientais. Contudo, a definição precisa desses limiares pluviométricos ainda enfrenta diversos entraves, especialmente pela carência de séries históricas confiáveis e pela limitada densidade das redes de monitoramento, que dificulta a representação adequada da variabilidade espacial e temporal das chuvas. Além disso, a instabilidade do terreno não depende apenas da precipitação, mas de um conjunto de fatores geotécnicos e geomorfológicos, como características do solo, declividade e cobertura vegetal, que interagem de forma complexa e não linear. Diante disso, torna-se essencial o uso de metodologias integradas, capazes de captar tais interações e aumentar a confiabilidade dos modelos preditivos.

Historicamente, análises estatísticas vêm sendo aplicadas para investigar a associação entre precipitação e deslizamentos, e em localidades fluminenses como Petrópolis, essa abordagem tem possibilitado o estabelecimento de limites críticos baseados em pares de chuvas acumuladas, calculadas a partir de dados pluviométricos (Mendonça, Gonzalez e Coelho, 2021). Embora eficazes sob o ponto de vista probabilístico, esses métodos simplificam a complexidade dos processos envolvidos, desconsiderando aspectos fundamentais como a infiltração hídrica, o tipo de material superficial e a resistência mecânica do solo. Assim, a carência de modelos que consigam incorporar essas variáveis constitui uma lacuna importante na previsão de movimentos de massa.

Nos últimos anos, o uso de técnicas de aprendizado de máquina no mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos tem mostrado resultados promissores, ao permitir a identificação de padrões ocultos nos dados e ao melhorar a capacidade de modelar relações não lineares entre os fatores condicionantes e a instabilidade das encostas (Canavesi et al., 2020). Modelos baseados em árvores de decisão têm sido eficazes nesse contexto, reduzindo as incertezas associadas às variabilidades dos dados e permitindo a formulação de critérios mais condizentes com a realidade geotécnica local (Silva, Mendonça e Avelar, 2024).

Nesse cenário, o presente estudo propõe avaliar a integração entre um método estatístico aplicado à análise da precipitação e um modelo de suscetibilidade baseado em técnicas de aprendizado de máquina. O objetivo é identificar os volumes de chuva mais relacionados ao início de deslizamentos em distintas categorias de suscetibilidade, considerando os atributos geoambientais da área. A pesquisa realiza uma análise comparativa entre diferentes abordagens, com o intuito de verificar suas limitações e contribuições para a melhoria de modelos preditivos. O estudo tem como área de foco a região central de Angra dos Reis – RJ.

A relevância desta investigação está na necessidade de aprimorar os critérios de alerta para deslizamentos, contribuindo tanto para o planejamento territorial mais seguro quanto para a formulação de políticas públicas de gestão de risco mais eficazes. Os resultados gerados podem apoiar instituições públicas e equipes de defesa civil na tomada de decisões em situações críticas, além de enriquecer o debate técnico-científico sobre os mecanismos que controlam a estabilidade de encostas e os avanços na modelagem preditiva desses eventos.

2 METODOLOGIA

2.1. Área de Estudo

Situado na porção sul do litoral do estado do Rio de Janeiro, a Região Central do município de Angra dos Reis - RJ (Fig. 1) é frequentemente atingido por desastres naturais associados a movimentos de massa, fenômenos geralmente desencadeados por episódios de chuva intensa. A combinação entre a elevada suscetibilidade natural da região e a ocupação urbana desordenada resulta em altos níveis de risco para comunidades vulneráveis, com impactos significativos sobre a segurança da população, a infraestrutura urbana e os sistemas de saúde pública durante eventos extremos. De acordo com Guerra et al. (2013), a posição geográfica de Angra dos Reis em relação ao Oceano Atlântico, aliada à presença da Serra do Mar, exerce forte influência no comportamento climático local. A serra funciona como uma barreira orográfica que favorece a concentração de umidade trazida por frentes frias, intensificando as precipitações — sobretudo no verão. Esse padrão climático recorrente contribui diretamente para a frequência dos deslizamentos na região, conforme registrado em inúmeros episódios ao longo dos anos, o que consolida o município como uma das áreas mais afetadas por esse tipo de desastre no estado do Rio de Janeiro.

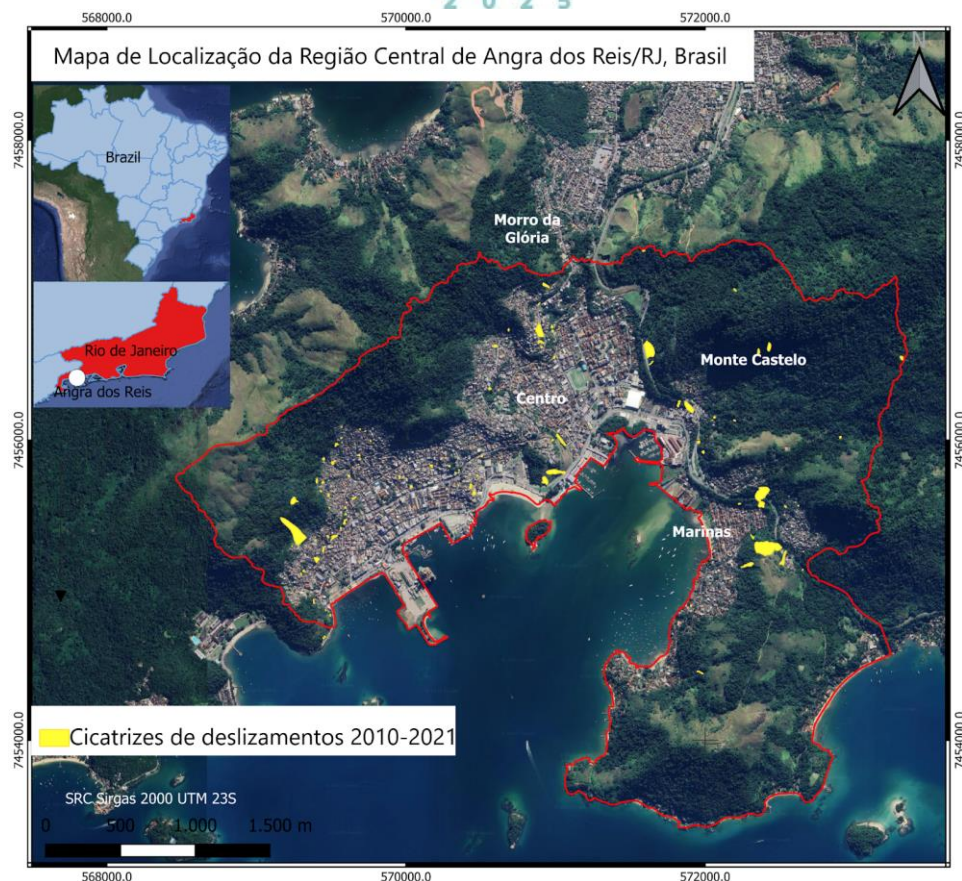


Figura 1: Localização da Área de Estudo e Cicatrizes de Deslizamentos na área de estudo

2.2. Inventário de Deslizamentos

A investigação dos deslizamentos na Região Central de Angra dos Reis foi realizada por meio de um mapeamento multitemporal, utilizando imagens de satélite históricas, capturadas no intervalo de 2010 a 2021 (Silva, Mendonça e Avelar, 2024; Leal et al., 2022). Informações fornecidas pela Defesa Civil Municipal de Angra dos Reis serviram como base para a identificação preliminar das áreas afetadas, a partir de registros de coordenadas geográficas reportadas pela população local. Vale destacar que tais coordenadas não representam necessariamente o ponto exato dos deslizamentos, mas sim as regiões atingidas, sendo úteis como referência para a análise e delineamento das cicatrizes. A partir desses pontos de referência, procedeu-se a interpretação visual de feições associadas à dinâmica de encostas em imagens orbitais, como sinais de remoção de material, alterações na cobertura vegetal, presença de sulcos erosivos e demais evidências indicativas de instabilidade.

A identificação das cicatrizes de deslizamentos foi conduzida a partir da análise multitemporal de imagens de satélite, com destaque para a ferramenta de visualização histórica do Google Earth®, que permitiu a observação de alterações morfodinâmicas ao longo do período de 2010 a 2021. Para complementar essa abordagem e ampliar a robustez da interpretação visual, também foram utilizadas imagens dos satélites Sentinel, Landsat e Planet, cujas resoluções e frequências de aquisição contribuíram para uma análise mais abrangente. A delimitação das cicatrizes foi realizada no ambiente do QGIS, com base em padrões geomorfológicos, mudanças na cobertura vegetal e demais evidências associadas à ocorrência de movimentos de massa.

2.3. Fatores Condicionantes

Os fatores condicionantes representam as variáveis geoambientais que condicionam a ocorrência de deslizamentos, e por conseguinte, a suscetibilidade aos deslizamentos (Silveira et al., 2014). Para tal análise, foram mapeados e integrados ao modelo de suscetibilidade adotado neste estudo nove fatores condicionantes (Figura 2). Para isso, foram utilizados dados derivados do Modelo Digital de Elevação (ASTER GDEM), índices espectrais obtidos a partir de imagens LANDSAT 8 — como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Construção por Diferença Normalizada (NDBI) — além de informações



geotécnicas e geológicas oriundas da Carta Geotécnica de Aptidão Urbana (NADE/DRM, 2015) e de mapeamentos da UFRJ (2014). A análise morfométrica do terreno a partir do ASTER GDEM permitiu extrair outros fatores condicionantes como a declividade, curvatura padrão, aspecto e o Índice Topográfico de Umidade (TWI), fundamentais para compreender a influência do relevo nos processos de instabilidade. Os índices NDVI e NDBI contribuíram para a caracterização da cobertura vegetal e do grau de urbanização, respectivamente — aspectos diretamente relacionados à capacidade de infiltração da água e à estabilidade superficial do solo. As informações geotécnicas, por sua vez, forneceram uma classificação detalhada dos materiais presentes, incluindo afloramentos rochosos, solos rasos sobre rocha, solos residuais espessos, zonas de blocos em matriz fina, depósitos de corrida de massa e depósitos de talus.

2.4. Levantamento de Dados Pluviométricos

A avaliação de dependência entre dados pluviométricos e de deslizamentos foi conduzida a partir dos dados fornecidos pela Estação Meteorológica São Bento (CEMADEN), selecionada por sua confiabilidade e pelo alinhamento temporal com o inventário de cicatrizes referente ao período de 2010 a 2021. Foram analisadas séries diárias de precipitação, permitindo o cálculo de volumes acumulados de chuva em janelas temporais variadas, abrangendo até 10 dias antes dos eventos (intervalos de 24h, 48h, 72h, 96h, estendendo-se até 240h). Os dados foram organizados em três categorias principais para a análise: (i) número de dias com ocorrência de deslizamentos e dias sem eventos, classificados segundo faixas de precipitação (a cada 20 mm) em períodos isolados (24h, 48h, 72h, 96h, ... , 240h); (ii) número de dias com ocorrência de deslizamentos e dias sem eventos, classificados segundo faixas de precipitação (a cada 20 mm), combinados em pares de períodos (24h x 48h, 24h x 72h, 24h x 96h, ... , 24h x 240h); (iii) estrutura similar à anterior, porém utilizando o acumulado de 72 horas como parâmetro de referência para as combinações (72h x 24h, 72h x 48h, 72h x 96h, ... , 72h x 240h).

2.5. Modelagem da Suscetibilidade a Deslizamentos

O mapeamento da suscetibilidade a deslizamentos foi realizado com base no modelo proposto por Silva, Mendonça e Avelar (2024), o qual integrou mapas de um inventário de cicatrizes e dos fatores condicionantes obtidos para área de estudo. O processo de aprendizado e predição utilizou o algoritmo Random Forest, calibrado para prever deslizamentos a partir de amostras representativas de áreas com cicatrizes e regiões planas. Neste modelo, os autores empregaram um modelo baseado Random para gerar um mapa de suscetibilidade a deslizamentos, implementado com os seguintes hiperparâmetros: $n_estimators = 300$, $max_depth = 15$, $min_samples_split = 5$, $min_samples_leaf = 2$, $max_features = 'sqrt'$, $bootstrap = True$ e $random_state = 42$ (para garantir reprodutibilidade). Estes hiper parâmetros foram definidos com o objetivo de garantir uma boa capacidade de generalização do modelo, evitando o sobreajuste e assegurando estabilidade nos resultados.

Para treinamento do modelo foi realizada uma estratégia de amostragem em grade regular de pontos, sobre o compilado de mapas supracitados, na escala 5x5 metros, para capturar um número máximo e igual de amostras correspondentes à áreas com cicatrizes de deslizamentos (classe positiva), quanto áreas planas e estáveis (classe negativa). Por conseguinte, sobre o mesmo compilado de mapas, foi feita uma mesma amostragem, desta vez na escala 30x30 metros, igual à escala de pixel dos fatores condicionantes mapeados. Esta amostragem menos adensada foi destinada à etapa preditiva do modelo de suscetibilidade, sendo validada por meio de curvas ROC-AUC e verificação da taxa de valores falsos negativos, para avaliar a performance do modelo. Por fim, foi realizada uma krigagem ordinária com os resultados do modelo, dada a necessidade de espacializar os dados probabilísticos da suscetibilidade, já que a estrutura dos dados de saída de são iguais aos de entrada: uma malha regular de pontos georreferenciados na escala 30x30 metros.

2.6. Relação Estatística Entre a Ocorrência de Deslizamento e Dados Pluviométricos

A relação estatística entre a ocorrência de deslizamentos e dados pluviométricos pode ser avaliada pelo método do qui-quadrado (χ^2), conforme proposto por Cramér (1946) e aplicado em Petrópolis (Mendonça, Gonzalez e Coelho, 2021). Este teste quantifica a discrepância entre as frequências observadas de deslizamentos para diferentes condições pluviométricas (combinações de faixas de chuva em períodos antecedentes) e as frequências esperadas (e) caso não houvesse associação (independência) entre chuva e deslizamentos. A estatística χ^2 é calculada pela equação (1), somando-se sobre todas as categorias

(combinações de faixas de chuva e ocorrência/não ocorrência de deslizamento). Um valor elevado de χ^2 indica forte dependência. A partir dele, calcula-se o coeficiente de contingência (C) para comparar a força da associação entre diferentes pares de períodos de chuva, identificando o período isolado ou o par mais relevante para definir limiares deflagradores.

$$\chi^2 = \sum [(o - e)^2 / e] \quad (1)$$

onde:

o = valores observados

v = valores esperados

Por fim, os períodos de chuva acumulada com maior coeficiente de contingência foram selecionados para o cálculo da chuva deflagradora. Em seguida, todos os deslizamentos mapeados no Inventário de Cicatrizes, munidos dos respectivos dados pluviométricos disponíveis, foram segmentados de acordo com os níveis de suscetibilidade. Para cada nível, foram calculados os valores médios de chuva acumulada nos diferentes períodos analisados.

3. RESULTADOS

A partir do compilado de mapas do Inventário de Deslizamentos e dos Mapas de Fatores Condicionantes, os resultados demonstram que o modelo baseado em Random Forest apresentou boa capacidade de discriminar entre áreas suscetíveis e não suscetíveis a deslizamentos, dado o valor de ROC-AUC de 0,88 e Acurácia de 61%. Estes resultados denotam uma performance robusta, mesmo em cenários com classes desbalanceadas — ou seja, nos dados de teste utilizados para validação, há uma quantidade significativamente maior de amostras referentes a áreas onde não ocorreram deslizamentos em comparação com aquelas onde os eventos foram registrados. Contudo, a boa performance obtida reforçou a confiabilidade do Random Forest para ordenar espacialmente as unidades analisadas segundo seu nível de suscetibilidade. As métricas de krigagem mostraram um RMSE de 0,174 e R^2 de 0,76, denotando uma performance considerada boa para a interpolação dos resultados, sem suavização dos dados ou superdimensionamento no mapa final da suscetibilidade, cujas classes foram determinadas segundo o método de intervalo geométrico da distribuição de frequência dos resultados (Fig. 2).

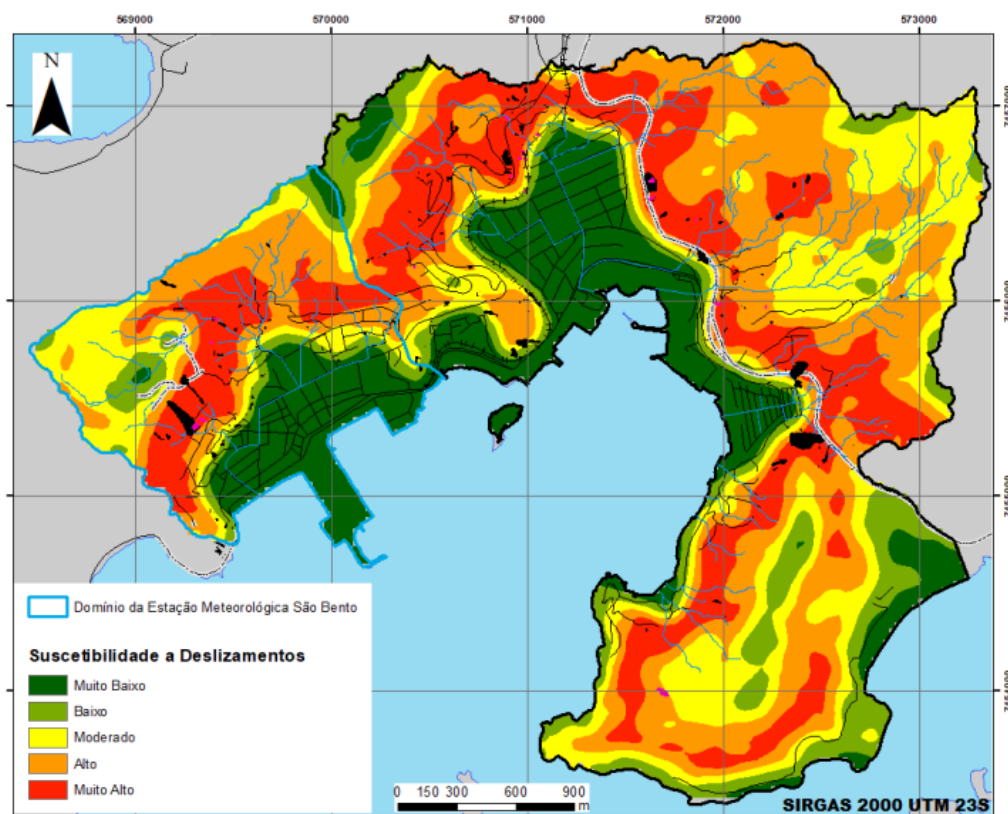


Figura 2: Mapa de Suscetibilidade a Deslizamentos na área de estudo. Em preto, as cicatrizes de novos deslizamentos, identificados no período de 2022-2023



2025

A análise dos coeficientes de contingência para os três grupos de dados pluviométricos definidos na seção 2.4 revelou que, no grupo (i) – que relaciona dias com e sem deslizamentos a partir dos acumulados pluviométricos – o maior grau de dependência estatística foi observado nos acumulados de 24h e 48h, sendo o menor registrado para o período de 192h (Tabela 1). A análise de períodos isolados após a data do evento justifica-se pela forte correlação entre precipitação recente e alterações nas propriedades geotécnicas do solo, como a saturação, o aumento da pressão nos poros e a redução da coesão. Esses processos são decisivos na perda de estabilidade das encostas, tornando as janelas de 24h e 48h particularmente relevantes para a identificação de eventos deflagradores.

Tabela 1. Valores de Coeficientes de Contingência para Períodos Isolados de Antecedentes Pluviométricos

	24h	48h	72h	96h	120h	144h	168h	192h	216h	240h
C	0,963	0,977	0,975	0,968	0,947	0,936	0,920	0,905	0,90	0,91
p-valor	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

A adoção de pares de períodos pluviométricos permitiu uma análise mais abrangente da relação entre precipitação e deslizamentos. A combinação de períodos curtos e longos, como o acumulado das últimas 24h em relação aos 10 dias antecedentes, possibilitou distinguir os efeitos de chuvas intensas e de precipitações contínuas. Essa abordagem se mostrou especialmente útil em contextos onde a saturação do solo é um processo gradual, influenciado por diferentes padrões de precipitação. Os dados do grupo (ii) indicaram que as combinações entre 24h e 96h apresentaram os maiores coeficientes de contingência, variando entre 0,93 e 0,94 (Tabela 2), enquanto a combinação 24h x 48h não demonstrou dependência estatisticamente significativa ($p > 0.05$). De forma semelhante, o grupo (iii), que analisa a chuva acumulada em 72h combinada com os demais períodos antecedentes, demonstrou forte dependência entre os acumulados de 72h e 96h (Tabela 3), assim como, a combinação 72h x 48h também não apresentou significância estatística ($p > 0.05$). Foi notado, ainda, um padrão oscilatório nos coeficientes a cada 3 a 4 dias, sugerindo a existência de ciclos de precipitação que conectam as chuvas recentes com as anteriores, influenciando diretamente na deflagração dos deslizamentos. Embora os coeficientes de contingência apresentem aumento após as 96 horas, esse crescimento reflete apenas um efeito matemático do acúmulo pluviométrico ao longo do tempo, não representando, necessariamente, um comportamento físico real das chuvas na área de estudo.

Tabela 2. Valores de Coeficientes de Contingência entre Pares de Períodos (24h x Antecedentes Pluviométricos)

	24h x 48h	24h x 72h	24h x 96h	24h x 120h	24h x 144h	24h x 168h	24h x 192h	24h x 216h	24h x 240h
C	0,880	0,922	0,933	0,930	0,929	0,933	0,920	0,939	0,942
p-valor	5,877	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabela 3. Valores de Coeficientes de Contingência entre Pares de Períodos (72h x Antecedentes Pluviométricos)

	72h x 24h	72h x 48h	72h x 96h	72h x 120h	72h x 144h	72h x 168h	72h x 192h	72h x 216h	72h x 240h
C	0,889	0,892	0,900	0,897	0,906	0,913	0,911	0,923	0,928
p-valor	0,000	5,201	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Por fim, a relação entre foi analisada precipitação e deslizamentos a partir da associação entre as cicatrizes de deslizamento e os dados pluviométricos correspondentes aos acumulados pluviométricos em 24h, 48h e 96h. Essa associação permitiu compatibilizar os dados observados com o mapa de suscetibilidade gerado pelo modelo Random Forest, além de calcular as médias de precipitação acumulada para cada classe de suscetibilidade. Os resultados mostraram que, no intervalo de 24h, as médias variaram entre 58,6 mm e 113,6 mm; em 48h, entre 108,4 mm e 132,1 mm; e em 96h, entre 136,6 mm e 196,6 mm. Foi observado ainda que

as áreas de baixa e moderada suscetibilidade exigiram volumes pluviométricos mais elevados para a deflagração dos eventos, quando comparadas às áreas de alta e muito alta suscetibilidade (Fig. 3).

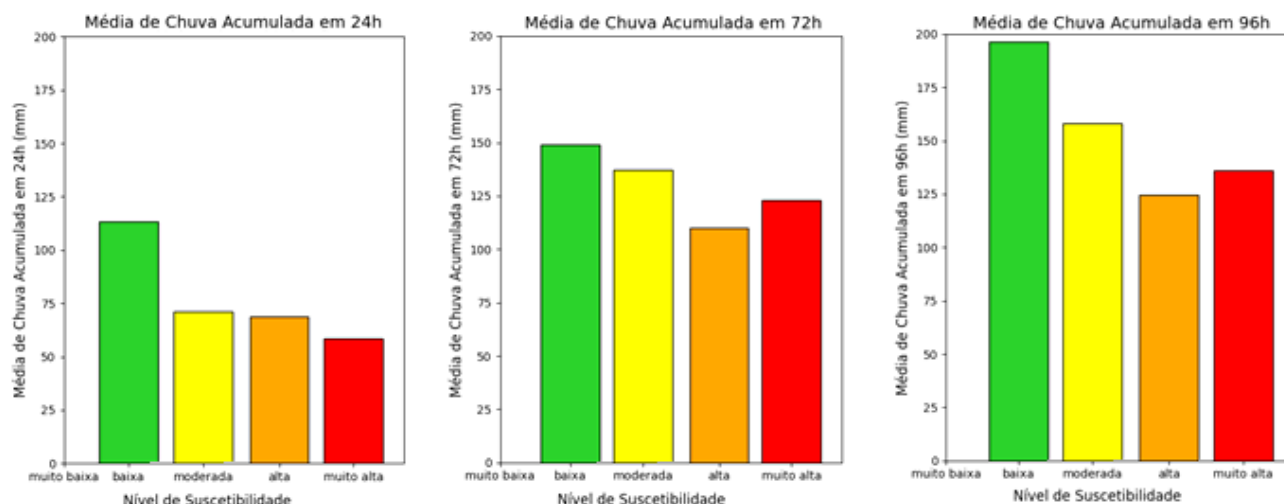


Figura 3: Médias de Precipitação Acumulada Deflagraadora por Classe de Suscetibilidade

4. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Os achados desta pesquisa reforçam a importância da precipitação antecedente como fator decisivo na ocorrência de deslizamentos na região central de Angra dos Reis, evidenciada pela correlação estatística entre os eventos de movimento de massa e os acumulados pluviométricos nos intervalos de 24, 48 e 96 horas anteriores.

A análise estatística dos períodos isolados de precipitação indicou que o maior grau de associação entre a chuva e os deslizamentos ocorreu no intervalo de 48 horas, sugerindo que a infiltração da água neste prazo exerce um papel crucial na diminuição da resistência ao cisalhamento do solo. Em solos residuais ou coluvionares, típicos da área estudada, essa redução da resistência pode provocar a ruptura de planos de fraqueza existentes, desencadeando deslizamentos translacionais ou rotacionais.

Ao avaliar as combinações de dois períodos pluviométricos, evidenciou-se uma relação mais clara entre as precipitações acumuladas nas últimas 24 e 96 horas, corroborando os protocolos adotados pela Defesa Civil Municipal de Angra dos Reis para os sistemas de alerta. Essa interação entre chuvas recentes e saturação prévia do solo configura um cenário crítico, ampliando o risco de deslizamentos nas áreas vulneráveis. Adicionalmente, o estudo mostrou que terrenos classificados como de baixa a moderada suscetibilidade exigem volumes pluviométricos mais elevados para o desencadeamento dos eventos, indicando que aspectos geomorfológicos e geotécnicos desempenham papel significativo na estabilidade das encostas.

As médias pluviométricas calculadas para cada classe de deslizamento auxiliaram na definição de parâmetros deflagraadores. Para o acumulado em 48 horas, os valores variaram entre 108,4 mm e 132,1 mm, sendo este intervalo considerado como critério aplicável quando associado à ocorrência de deslizamentos e à chuva mais recente. Por sua vez, a análise das combinações de períodos evidenciou padrões pluviométricos distintos, que se adequam melhor à avaliação de chuvas em curto e médio prazo. Especificamente, a precipitação nas últimas 24 horas oscilou entre 58,6 mm e 113,6 mm, enquanto a acumulada em 96 horas atingiu valores entre 136,6 mm e 196,6 mm. Destaca-se que o valor máximo acumulado nas últimas 24 horas é consideravelmente elevado em comparação ao acumulado nas 96 horas, sugerindo que os deslizamentos registrados nas últimas 24 horas estão fortemente associados a chuvas intensas ocorridas no mesmo dia. Já a precipitação acumulada em períodos mais longos tende a refletir chuvas regulares que atingem seu pico nas 96 horas anteriores ao evento.

Embora os resultados sejam expressivos, o estudo enfrenta limitações relacionadas à variabilidade espacial e temporal dos dados, como atrasos na notificação dos deslizamentos e ausência pontual de informações pluviométricas. Essas limitações podem comprometer a exatidão das correlações, demandando investigações adicionais para fortalecer a robustez das conclusões. Ademais, a definição de critérios pluviométricos por classe de suscetibilidade exige uma abordagem regionalizada, incluindo dados oriundos de pluviômetros distribuídos na área de interesse.



Para trabalhos futuros, recomenda-se a análise da influência de outros parâmetros hidrológicos, como a umidade do solo e sua capacidade de infiltração, para aprofundar a compreensão dos mecanismos que levam à instabilidade das encostas. A integração de técnicas de aprendizado de máquina com modelos estatísticos tradicionais de instabilidade pode representar um avanço significativo, aprimorando a precisão e a adaptabilidade dos sistemas de alerta precoce a diferentes contextos geológicos e climáticos regionais.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à CAPES/Brasil - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior do Brasil pelo financiamento desta pesquisa (código de financiamento 001), CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio à pesquisa e à toda a equipe responsável por executar o Plano Municipal de Redução de Riscos da Cidade de Angra dos Reis, que forneceu dados substanciais para execução deste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Canavesi, V. et al. (2020) Diferentes abordagens para uso de atributos morfométricos no mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos com base em unidades espaciais de mesoescala: Um estudo de caso no Rio de Janeiro (Brasil). *Sensoriamento Remoto*, v. 12, n. 11, p. 1826.
- COPPE/UFRJ E GEOHECO/LABORATÓRIO DE GEO-HIDROECOLOGIA (2014) *Carta de Risco e de Suscetibilidade a Movimentos de Massa 1:5.000*. Rio de Janeiro: Instituto Estadual do Ambiente.
- Cramér, H. (1946). Uma contribuição para a teoria da estimativa estatística. *Scandinavian Actuarial Journal*, 1946 (1), 85-94.
- Leal, P. J. V.; Silva, P. O.; Pires, F. J. S.; Oliveira, M. S. (2022) Relação entre declividade e forma de encostas e ocorrência de deslizamentos no município de Angra dos Reis, RJ. In: *Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada*. Rio de Janeiro.
- Mendonça, M. B.; Gonzalez, F. C. G.; Coelho, G. V. da S. (2021) Likelihood of landslide occurrences for definition of rainfall thresholds applied to the Quitandinha river basin, Petrópolis, Brazil. *Landslides*, v. 18, p. 583-593.
- Núcleo de Apoio ao Desenvolvimento Estadual (Nade); Departamento de Recursos Minerais (Drm) (2015) *Carta Geotécnica de Aptidão Urbana - CGU*. Rio de Janeiro: DRM/RJ.
- Silva, A. A. da; Mendonça, M. B. de; Avelar, A. de S. (2024) Investigação da deflagração e previsibilidade de deslizamentos em Angra dos Reis (RJ): uma abordagem utilizando redes neurais profundas. In: *Anais do 51º Congresso Brasileiro de Geologia*. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia, p. 258.
- Silva, A. A. da; Mendonça, M. B. de; Avelar, A. de S. (2024) Suscetibilidade a deslizamentos utilizando machine learning: um estudo de caso em Angra dos Reis - RJ. In: *Anais do COBRAMSEG 2024*. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos.
- Silveira, C. T.; Fiori, A. P.; Schilipack, P.; Dias, S. M. (2014) Mapeamento preliminar da suscetibilidade natural a movimentos de massa da Serra do Mar Paranaense apoiado na análise digital do relevo. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 15, n. 1, p. 3-22.