



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIAS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
ENGENHARIA CIVIL

ANA VITÓRIA PEREIRA DA CRUZ SANTOS

**ANÁLISE PREDITIVA DE TRAJETÓRIAS DE DESLIZAMENTOS OCASIONADOS
POR CHUVA**

São Luís, 2026

ANA VITÓRIA PEREIRA DA CRUZ SANTOS

**ANÁLISE PREDITIVA DE TRAJETÓRIAS DE DESLIZAMENTOS OCASIONADOS
POR CHUVA**

Trabalho de Conclusão de Curso II
apresentado à coordenação do curso de
Engenharia Civil da Universidade
Federal do Maranhão, como requisito
parcial à obtenção do grau de Bacharel
em Engenharia Civil.

Orientador: Prof.º Dr.: George
Fernandes Azevedo

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr.: George Fernandes Azevedo

Prof.º Dr. Ana Beatriz Pereira Segadilha dos Santos

Prof.º.: Fábio Dieguez Barreiro Mafra

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	2
METODOLOGIA	4
RESULTADOS E DISCUSSÕES	8
CONCLUSÃO	14
REFERÊNCIAS	15

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Pereira da Cruz Santos, Ana Vitoria.

ANÁLISE PREDITIVA DE TRAJETÓRIAS DE DESLIZAMENTOS
OCASIONADOS POR CHUVA / Ana Vitoria Pereira da Cruz
Santos. - 2026.
20 f.

Orientador(a): George Fernandes Azevedo.
Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do
Maranhão, São Luís, 2026.

1. Deslizamentos. 2. La Arenosa. 3. Monte Carlo. I.
Fernandes Azevedo, George. II. Título.

Análise preditiva de trajetórias de deslizamentos ocasionados por chuvas

Predictive analysis of landslide trajectories caused by rainfall.

Received: 10/07/2026 | Accepted: 00/00/2026 | Published: 00/00/2026

Ana Vitória Pereira da Cruz Santos

Universidade Federal do Maranhão, Brasil

ORCID ID: 0009-0008-5817-2899

E-mail: ana.vpcs@discente.ufma.br

George Fernandes Azevedo

Instituto de Ensino Superior, País

ORCID ID: 0000-0002-2207-7282

E-mail: gf.azevedo@ufma.br

RESUMO

Este estudo teve como objetivo desenvolver e aplicar um modelo computacional probabilístico para simular trajetórias de movimentos de massa com base em variáveis morfométricas derivadas de Modelos Digitais de Terreno. A área de estudo foi a bacia hidrográfica de La Arenosa, na Colômbia, afetada por um evento extremo em 1990. O modelo foi implementado no software MATLAB por meio de um algoritmo que usa o método de fluxo D8, permitindo a propagação estocástica a partir de múltiplas células-fonte. Os resultados demonstraram satisfatória concordância espacial entre trajetórias simuladas e cicatrizes mapeadas, evidenciando a capacidade do modelo em representar padrões de mobilização e deposição de massa. A integração com dados históricos possibilitou delimitar áreas de maior suscetibilidade geotécnica. A análise comparativa indicou a influência de condicionantes geomorfológicos e hidrológicos na dinâmica dos eventos. Conclui-se que o modelo é uma ferramenta robusta para avaliação de risco geotécnico e suporte ao zoneamento e à mitigação.

Palavras-chave: Deslizamentos; La Arenosa; Monte Carlo; Probabilidade.

ABSTRACT

The objective of this study was to develop and apply a probabilistic computational model to simulate mass movement trajectories based on morphometric variables derived from Digital Elevation Models. The study area was the La Arenosa watershed in Colombia, which was affected by an extreme event in 1990. The model was implemented in MATLAB software using an algorithm that employs the D8 flow method, allowing for stochastic propagation from multiple source cells. The results demonstrated satisfactory spatial agreement between simulated trajectories and mapped scars, highlighting the model's ability to represent patterns of mass mobilization and deposition. Integration with historical data made it possible to delineate areas of greater geotechnical susceptibility. The comparative analysis indicated the influence of geomorphological and hydrological factors on the dynamics of the events. It is concluded that the model is a robust tool for geotechnical risk assessment and for supporting zoning and mitigation efforts.

Keywords: Landslides; La Arenosa; Monte Carlo; Probability.

INTRODUÇÃO

A ocorrência de movimentos de massa tem se intensificado nas últimas décadas, impulsionada por mudanças climáticas, transformações no uso e cobertura do solo e pressões socioeconômicas que ampliam a exposição e a vulnerabilidade de populações em áreas suscetíveis. Conforme Novellino et al. (2024), os movimentos de massa apresentam impactos expressivos nos âmbitos social, econômico e ambiental, sendo agravados pelas alterações ambientais contemporâneas que intensificam sua frequência e magnitude. No contexto geotécnico, a estabilidade de taludes está condicionada ao equilíbrio entre as forças resistentes do solo e aquelas que induzem sua mobilização. A ruptura desse equilíbrio desencadeia movimentos de massa que podem variar desde deformações incipientes até escorregamentos de grande magnitude. Nesse contexto, destaca-se a atuação de múltiplos fatores interdependentes, entre os quais a infiltração de água desempenha papel central. Segundo VTB Engenharia (2026), a ocorrência de precipitações intensas promove o aumento do teor de umidade do solo, resultando na elevação da pressão de poros e na consequente redução da resistência ao cisalhamento. Esse efeito é significativamente intensificado em condições de baixa eficiência de drenagem, nas quais o acúmulo de água no interior do maciço favorece a perda progressiva de estabilidade. Assim, a compreensão integrada dos processos hidrológicos e geotécnicos torna-se essencial para a análise dos mecanismos de instabilidade e para a adequada avaliação dos fatores condicionantes e deflagrantes associados (VTB ENGENHARIA, 2026).

Sob a perspectiva econômica global, os desastres naturais representam perdas significativas. Estimativas do Banco Mundial indicam custos anuais da ordem de US\$520 bilhões à economia mundial (WORLD BANK; GFDRR, 2016). Embora os movimentos de massa não sejam isoladamente quantificados em escala global com precisão, sua contribuição é relevante, sobretudo em regiões tropicais montanhosas e áreas urbanizadas em encostas. Dados recentes indicam um aumento expressivo de deslocamentos populacionais associados a desastres naturais. Em 2024, a ONU reportou um recorde de aproximadamente 45,8 milhões de deslocados internos em decorrência desses eventos (IDMC, 2024). Na Colômbia, entre 2008 e 2025, foram registrados cerca de 187 mil deslocamentos, refletindo os impactos diretos da destruição de moradias e

infraestrutura causada por eventos hidrometeorológicos extremos e evidenciando a elevada suscetibilidade do território (IDMC, 2025).

A compreensão dos mecanismos de instabilidade requer a distinção entre fatores preparatórios e agentes deflagrantes. Entre os fatores preparatórios, destacam-se as características geológicas e geomorfológicas, como litologia, estrutura, descontinuidades, declividade e morfologia do terreno, além de intervenções antrópicas, incluindo desmatamento, cortes inadequados e ocupação desordenada. Desastres naturais, especialmente aqueles de origem hidrológica, resultam em expressivos impactos socioeconômicos em escala global. Dados do EM-DAT (Guha-Sapir et al., 2015) indicam que eventos como inundações e movimentos de massa estão entre os principais responsáveis por perdas humanas e danos à infraestrutura. Embora condicionantes naturais, como regime pluviométrico e características geomorfológicas, exerçam papel determinante, parte significativa desses impactos pode ser mitigada por meio de estratégias eficazes de gestão de risco. Nesse contexto, instrumentos como o Plano Nacional de Gestão de Risco de Desastres (PNGRD) de 2012, evidenciam o potencial de redução da vulnerabilidade quando associados ao conhecimento técnico dos processos envolvidos.

Adicionalmente, as mudanças climáticas têm contribuído para o aumento da frequência e intensidade de eventos extremos, especialmente precipitações intensas, diretamente relacionadas à deflagração de movimentos de massa. Diante desse cenário, torna-se essencial o desenvolvimento de abordagens que permitam compreender e prever a dinâmica desses processos. A análise da trajetória de deslizamentos, desde as áreas-fonte até as zonas de deposição, possibilita a identificação de áreas potencialmente afetadas, subsidiando a elaboração de mapas de suscetibilidade e a implementação de medidas preventivas. Dessa forma, o estudo dessas trajetórias constitui não apenas um avanço no campo técnico-científico, mas também uma ferramenta estratégica para o planejamento territorial e a redução de riscos geotécnicos.

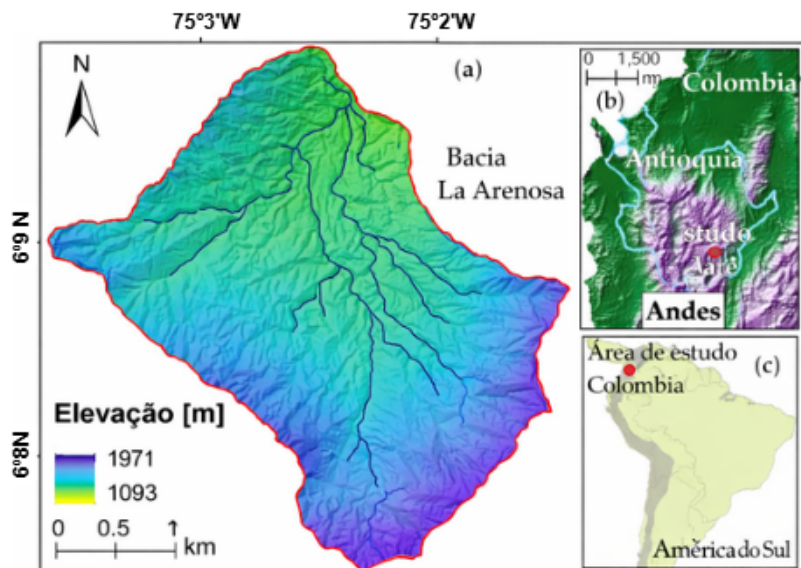
O presente trabalho buscou aplicar um modelo computacional probabilístico para a simulação de trajetórias de deslizamentos de terra, com base em variáveis morfométricas derivadas de Modelos Digitais de Terreno (MDT), visando à análise da propagação e das zonas de deposição de movimentos de massa. A pesquisa usou como área de estudo a bacia hidrográfica de La Arenosa, situada na Colômbia.

METODOLOGIA

O presente trabalho configura-se como um estudo de caso aplicado à bacia hidrográfica de La Arenosa, Colômbia, com foco nos movimentos de massa deflagrados pelo evento pluviométrico extremo de 21 de setembro de 1990. A escolha da área justifica-se pela elevada intensidade da precipitação e pelo grande número de deslizamentos registrados em curto intervalo de tempo. A caracterização inicial das instabilidades baseou-se em inventários obtidos por meio de fotografias aéreas pós-evento e levantamentos de campo realizados por Integral (1990) e Mejía e Velásquez (1991), os quais forneceram informações sobre localização, tipologia e extensão das cicatrizes.

A bacia hidrográfica de La Arenosa, localizada em Antioquia, Colômbia, apresenta-se como uma área de elevada suscetibilidade, conforme apresentado na Figura 1. Com relevo acidentado, declividades predominantes entre 20° e 40° e altitudes entre 1.000 e 1.900 m, a região apresenta condições propícias à ocorrência de movimentos de massa (Velásquez e Mejía, 1991; Aristizábal et al., 2016).

Figura 1 – Bacia La Arenosa

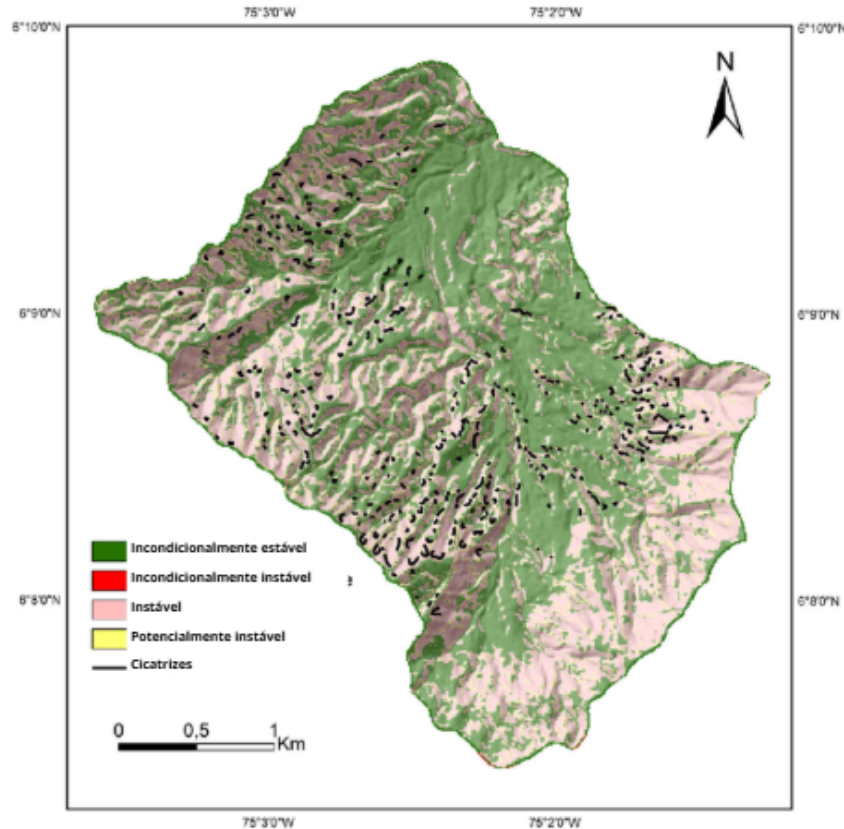


Fonte: Aristizábal et al. (2016)

Um evento extremo ocorrido em 21 de setembro de 1990, com precipitação de 208 mm em três horas, desencadeou numerosos deslizamentos, resultando em perdas humanas, danos à infraestrutura e prejuízos superiores a US\$6 milhões (Hermelin et al., 1992 apud Aristizábal et al., 2016). O inventário dessas ocorrências, apresentado na

Figura 2, constitui base fundamental para a análise e validação de modelos preditivos aplicados à região.

Figura 2 – Áreas com ocorrências de deslizamentos de terra desencadeada pela tempestade



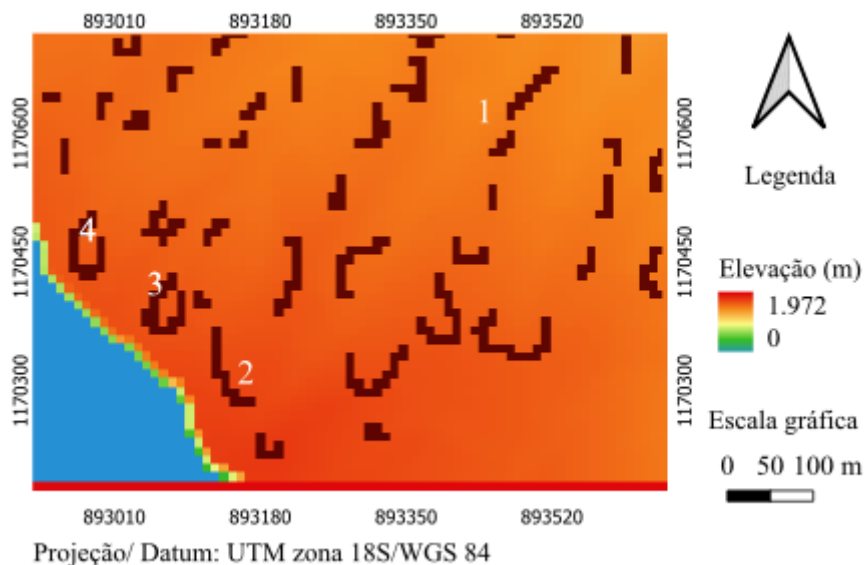
Fonte: Aristizábal et al. (2016)

A partir desses dados, foi estruturado um banco de informações georreferenciadas contendo variáveis morfométricas, como declividade e topografia, além da delimitação das cicatrizes iniciais. O processamento espacial foi realizado com o auxílio dos softwares Spring 5.4.3, permitindo a identificação de padrões de instabilidade associados ao relevo.

Conforme observado pela Figura 2, as cicatrizes concentram-se predominantemente nas porções sudoeste e central da área de estudo, evidenciando forte controle geomorfológico na distribuição dos movimentos de massa. Delimitou-se uma região da bacia de La Arenosa com maior incidência de cicatrizes de deslizamentos para avaliação de eventos específicos. Foram analisados quatro deslizamentos com distintas características geomorfológicas, a fim de verificar a capacidade preditiva do modelo em diferentes condições, conforme discutido nos resultados. A área delimitada e os eventos

de deslizamentos escolhidos para o desenvolvimento das simulações encontram-se na Figura 3.

Figura 3 – Identificação dos deslizamentos analisados



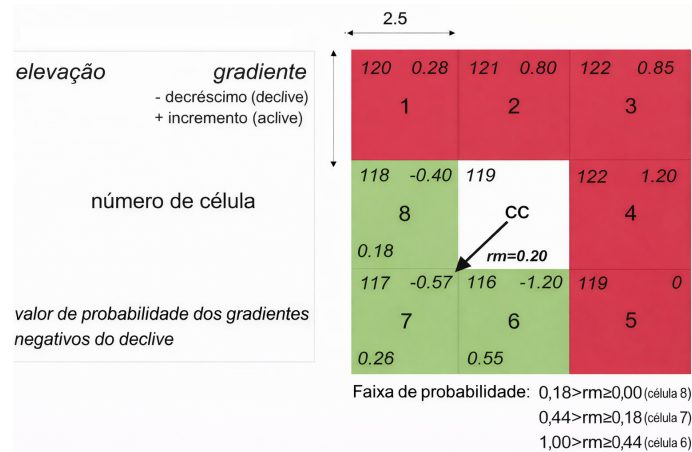
Fonte: produzida pelo autores

A modelagem das trajetórias foi implementada com o auxílio da linguagem MATLAB, sendo conduzida por meio do algoritmo D8, conforme proposto por O'Callaghan & Mark (1984), que calcula o escoamento com base na direção de máxima declividade em um Modelo Digital de Terreno (MDT). Nesse contexto, a célula central, previamente definida como célula-fonte a partir da análise das cicatrizes de ruptura, interage com suas oito células vizinhas, consideradas potenciais receptoras do fluxo. A partir dessa configuração, os gradientes de declividade são avaliados e o deslocamento é direcionado preferencialmente para as células situadas em cotas inferiores, em consonância com o princípio gravitacional.

Para incorporar a variabilidade e as incertezas inerentes ao processo, aplicou-se o método de Monte Carlo, conforme Hürlimann et al. (2008). Nesse procedimento, probabilidades proporcionais ao gradiente de declividade foram atribuídas às células descendentes e posteriormente normalizadas, definindo uma grade probabilística de fluxo. O número de simulações para cada evento de deslizamento avaliado foi crescente

no sentido de verificar a modificação das probabilidades de impacto alcançadas nas trajetórias. Em cada simulação, a propagação do fluxo é definida de forma estocástica, a partir da geração de um número aleatório de probabilidade ($rm \in [0,1]$), o qual determina a célula receptora com base nos intervalos probabilísticos previamente estabelecidos. Em cada passo da trajetória, todo o fluxo é direcionado integralmente para uma única célula adjacente, seguindo o princípio direcional do algoritmo D8. Esse procedimento é repetido de forma sucessiva ao longo da encosta, definindo um caminho completo de propagação por simulação. A repetição desse processo em múltiplas simulações permite estimar a frequência de ocorrência das trajetórias e, conseqüentemente, a probabilidade de cada célula ser atingida, resultando em um mapeamento probabilístico das áreas preferenciais de escoamento e deposição de massa, como exemplificado na Figura 4.

Figura 4 – Técnica de sorteio de Monte Carlo combinada com modelo D8



Fonte: Scheidl; Rickenmann, 2009.

O processo iterativo resultou na geração de mapas probabilísticos de deposição, nos quais cada célula do Modelo Digital de Terreno (MDT) é associada à frequência relativa de ocorrência do fluxo ao longo das simulações realizadas. A probabilidade de uma célula ser atingida é determinada pela razão entre o número de vezes em que ela foi percorrida pelas trajetórias simuladas e o número total de iterações do modelo, conforme a seguinte equação:

$$P_i = \frac{n_{afet}}{n_{sim}} \quad (1)$$

Onde P_i refere-se a probabilidade de uma dada célula ser impactada pelo deslizamento (chance da célula fazer parte da trajetória), n_{afet} corresponde ao número de trajetórias de

deslizamentos que alcançaram uma dada célula e n_{sim} relaciona-se ao número total de simulações realizadas para um dado deslizamento a partir da célula-fonte.

Esse procedimento permite a construção de uma matriz de propagação probabilística, na qual cada elemento representa a recorrência espacial do fluxo, possibilitando identificar trajetórias preferenciais e zonas de maior acúmulo de material ao longo da cicatriz do deslizamento. O algoritmo desenvolvido foi aplicado individualmente a cada evento, gerando matrizes de propagação desde as células-fonte até as áreas de deposição, as quais serviram de base para a análise espacial e interpretação dos resultados.

Posteriormente, os resultados foram integrados ao ambiente Spring 5.4.3, possibilitando a comparação entre as trajetórias simuladas e os limites observados das cicatrizes. Mapas temáticos foram elaborados com diferentes classes de probabilidade de impacto, favorecendo a análise espacial e a interpretação dos resultados. A sobreposição entre os dados simulados e os registros históricos permitiu avaliar a aderência do modelo.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da aplicação do modelo probabilístico proposto para geração de trajetórias de deslizamentos, com base na análise individual das cicatrizes de ruptura associadas ao evento pluviométrico extremo de 1990. As simulações realizadas no MATLAB, por meio da rotina computacional proposta, indicaram variação significativa nas probabilidades de impacto das células, com valores entre 2,8% e 73%, sendo mais elevadas nas proximidades das células-fonte e em setores de menor declividade.

Os resultados consolidados apresentados na Tabela 1 derivam de um conjunto superior a 1.900.000 simulações realizadas por meio do método de Monte Carlo, o que confere elevada robustez estatística às análises. Esse elevado número de iterações permite reduzir a influência de variabilidades aleatórias e possibilita a identificação de padrões consistentes nos processos de propagação e deposição dos deslizamentos.

A probabilidade associada à célula escolhida para análise corresponde à frequência relativa com que essa célula é solicitada (ou atingida) ao longo das simulações para um determinado cenário de deslizamento. Dessa forma, tal métrica pode ser interpretada como uma estimativa da suscetibilidade espacial à passagem da massa mobilizada. Observa-se que, à medida que o número de simulações aumenta, os

valores de probabilidade tendem à convergência, indicando estabilização estatística dos resultados. Esse comportamento é fundamental para garantir a confiabilidade das inferências, uma vez que demonstra que o modelo atingiu um regime em que novas simulações não alteram significativamente a distribuição probabilística obtida.

De modo geral, as trajetórias simuladas apresentam forte aderência às feições geomorfológicas da bacia hidrográfica, evidenciando controle topográfico no direcionamento dos fluxos. Nota-se uma tendência de concentração ao longo das vertentes associadas aos canais de drenagem e em zonas de menor energia potencial, o que está em consonância com os princípios físicos que regem o escoamento gravitacional de massas.

Tabela 1 – Resultados das simulações dos deslizamentos analisados

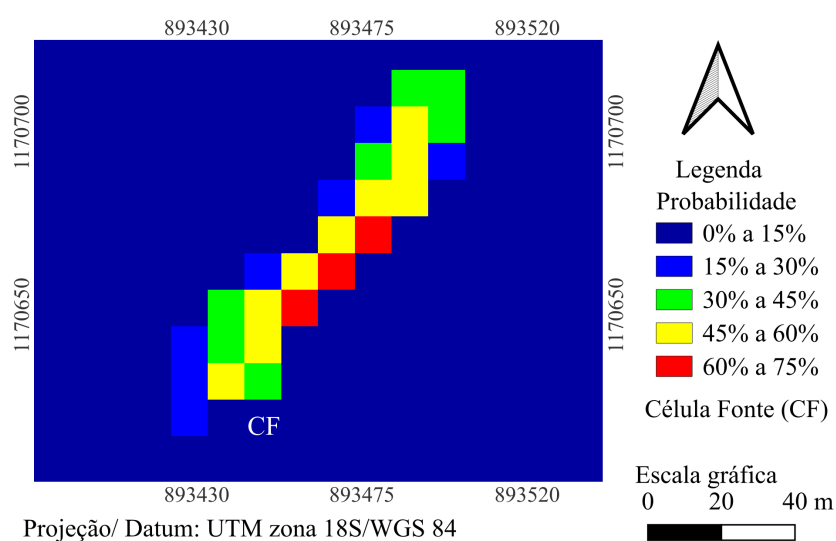
Deslizamento	Fonte	Simulação	Maior probabilidade alcançada na cicatriz
1	Linha 11 Coluna 53	25.000,00	73%
		260.000,00	73,26%
		580.000,00	72,47%
		940.000,00	73,34%
		1.020.000,00	73,34%
2	Linha 43 Coluna 22	4.000,00	43%
		20.000,00	43,4%
		70.000,00	43,2%
		1.995.000,00	42,9%
3	Linha 34 Coluna 12	30.000,00	45,77%
		95.000,00	45,41%
		189.000,00	45,32%
		600.000,00	45,47%
		850.000,00	45,40%
4	Linha 29 Coluna 05	45.000,00	2,87%
		136.000,00	2,86%
		520.000,00	2,79%

Deslizamento	Fonte	Simulação	Maior probabilidade alcançada na cicatriz
		890.000,00	2,77%
		1.050.000,00	2,8%

Fonte: Produzida pelo autores

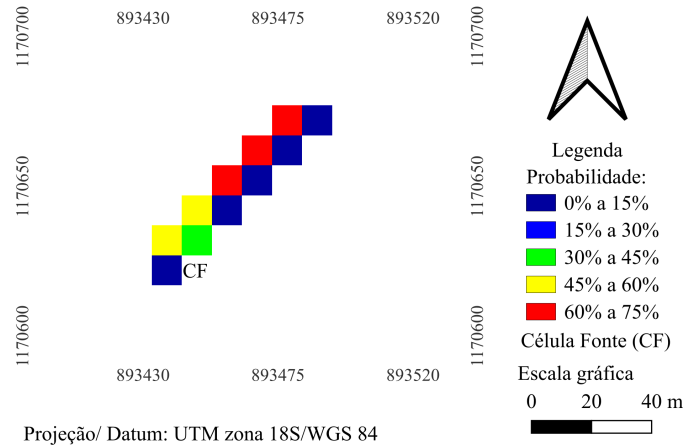
O deslizamento 1, localizado na região nordeste, apresentou rápida estabilização relativa das probabilidades com valores entre 73% e 73,3%, conforme mostrado na Tabela 1. A análise espacial (Figuras 5 e 6) evidenciou elevada correspondência entre a mancha simulada e a cicatriz observada, sobretudo na identificação da célula-fonte (11,53). A distribuição probabilística indicou forte concentração nas zonas iniciais de propagação, com rápida dissipação lateral, característica compatível com eventos de mobilidade moderada e controle topográfico bem definido.

Figura 5 – Trajetória temática com cicatriz do deslizamento 1



Fonte: produzida pelos autores

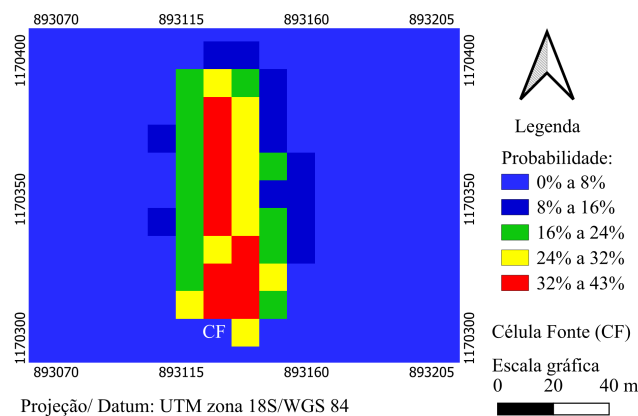
Figura 6 – Trajetória temática com recorte para deslizamento 1



Fonte: produzida pelo autores

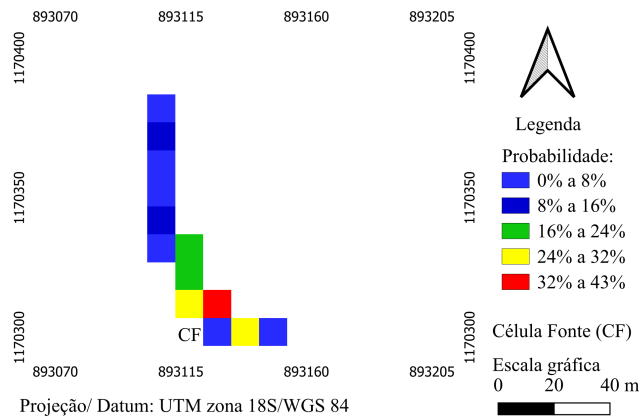
Para o deslizamento 2, situado na porção sudoeste, observou-se comportamento distinto, com estabilização precoce das probabilidades, variando entre 42,9% e 43,4% ao longo das simulações. As representações temáticas (Figuras 7 e 8) evidenciaram um padrão de fluxo canalizado, com elevada concentração ao longo de um corredor preferencial. Conforme a Figura 8, a célula mais impactada no interior da cicatriz real (41,21) apresentou valor máximo de 43%, enquanto as zonas periféricas mantiveram probabilidades reduzidas. Esse comportamento sugere forte controle geomorfológico e baixa dispersão lateral, típico de encostas com confinamento moderado.

Figura 7 – Trajetória temática com cicatriz do deslizamento 2



Fonte: produzida pelo autores

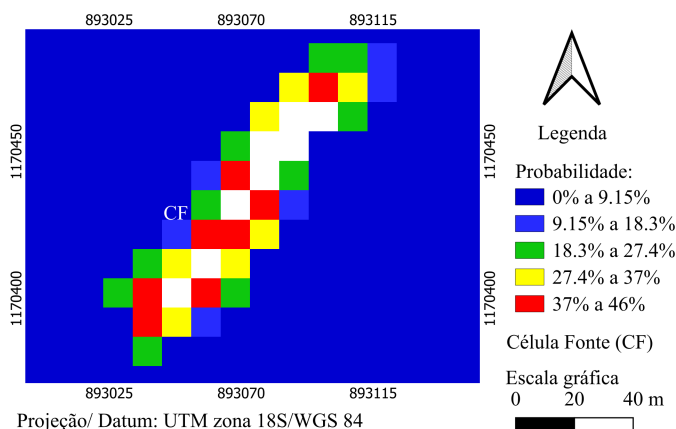
Figura 8 – Trajetória temática com recorte para deslizamento D2



Fonte: produzida pelo autores

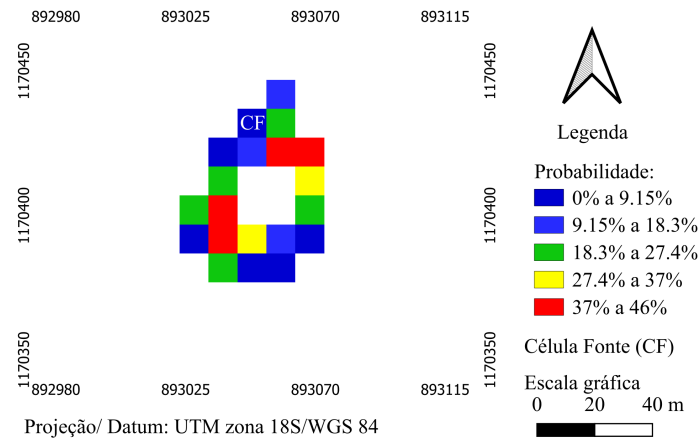
O deslizamento D3, com origem na célula (34,12), apresentou trajetória predominantemente direcionada para noroeste, com ramificações laterais evidentes, conforme Figura 9. As simulações indicaram estabilidade dos resultados, com variações inferiores a 0,5% entre diferentes números de iterações, segundo mostrado na Tabela 1. A célula (33,13) concentrou a maior probabilidade (45,77%), enquanto as bordas apresentaram valores mínimos (0,79%). A configuração espacial (Figura 10) revelou elevada compatibilidade com a cicatriz observada, além de indicar potencial de expansão lateral sob condições hidrológicas mais severas.

Figura 9 –Trajetória temática com cicatriz do deslizamento 3



Fonte: produzida pelo autores

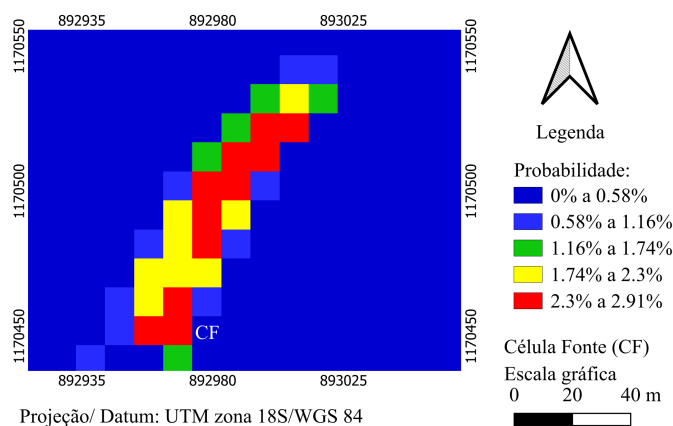
Figura 10 –Trajetória temática com recorte para deslizamento D3



Fonte: produzida pelo autores

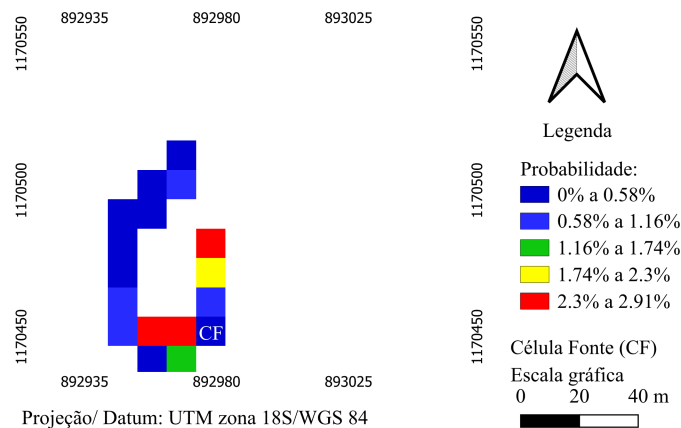
O deslizamento 4 apresentou comportamento singular, caracterizado por concentração probabilística no núcleo da mancha (Figura 11), diferentemente dos demais casos. As probabilidades variaram entre 0 e 2,91%, indicando menor recorrência relativa, porém com maior extensão espacial. A extrapolação parcial da mancha simulada em relação à cicatriz real sugere potencial de reativação ou expansão em cenários de maior saturação. O padrão linear observado indica a previsão de movimento translacional controlado pela declividade acentuada e baixa coesão superficial (Figura 12).

Figura 11 – Trajetória temática com cicatriz do deslizamento 4



Fonte: produzida pelo autores

Figura 12 – Trajetória temática com recorte para deslizamento D4



Fonte: produzida pelo autores

De forma geral, os resultados demonstram que o modelo probabilístico foi capaz de reproduzir, com consistência, os padrões espaciais de propagação dos deslizamentos analisados. A concordância entre trajetórias simuladas e cicatrizes observadas reforça a aplicabilidade da abordagem na análise de risco geotécnico. Adicionalmente, a identificação de áreas com probabilidade intermediária destaca zonas potencialmente suscetíveis à expansão e alcance dos eventos, especialmente sob condições pluviométricas mais intensas ou alterações antrópicas. De forma integrada, os resultados evidenciam a capacidade do modelo em capturar padrões espaciais consistentes de propagação, reforçando sua aplicabilidade em análises preditivas.

CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo implementar um modelo computacional probabilístico para a simulação de trajetórias de deslizamentos de terra, com base em variáveis morfométricas derivadas de modelos digitais de terreno. A bacia hidrográfica de La Arenosa, na Colômbia, foi adotada como área de aplicação em função do evento extremo ocorrido em 1990, que resultou em significativa mobilização de massa e impactos socioeconômicos expressivos. O modelo foi implementado no ambiente MATLAB, por meio de um algoritmo que aplica o método de direcionamento de fluxo D8, permitindo a simulação estocástica de trajetórias a partir de uma determinada célula-fonte.

Os resultados evidenciaram uma satisfatória concordância espacial entre as trajetórias simuladas e as cicatrizes reais dos deslizamentos, demonstrando a capacidade do modelo em reproduzir padrões de propagação e deposição de massa. A análise

comparativa dos quatro eventos de deslizamentos estudados indicou que a dinâmica dos movimentos está diretamente condicionada por fatores geomorfológicos, influenciando tanto a direção quanto a extensão das trajetórias. Verificou-se, ainda, que a avaliação do risco geotécnico deve considerar não apenas os valores máximos de probabilidade, mas também a distribuição espacial das áreas afetadas, a configuração topográfica e as interferências antrópicas.

Conclui-se que o modelo proposto constitui uma ferramenta robusta, consistente e potencialmente replicável para a análise de risco em áreas suscetíveis a movimentos de massa, podendo subsidiar a elaboração de mapas de ameaça e o planejamento territorial. Destaca-se que a incorporação de novos aspectos associados ao fenômeno (como séries temporais de dados pluviométricos, o uso de técnicas de sensoriamento remoto e a integração com dados de instrumentação geotécnica, além da aplicação do modelo em diferentes contextos geomorfológicos) pode ampliar a capacidade preditiva da abordagem e sua aplicabilidade em cenários distintos.

REFERÊNCIAS

ARISTIZÁBAL, E., García, E. & Martínez, C. Susceptibility assessment of shallow landslides triggered by rainfall in tropical basins and mountainous terrains. *Nat Hazards* 78, 621–634 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1736-4>. Acesso em: 13 jun. 2026

GUHA-SAPIR, D.; Below, R.; Hoyois, P. EM-DAT: International Disaster Database. Université catholique de Louvain – CRED, Brussels, Belgium, 2015. Dados acessíveis online em EM-DAT. Disponível em: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2149443>. Acesso em: 28 jun. 2026.

HÜRLIMANN M, Rickenmann D, Medina V, Bateman A. 2008. Evaluation of approaches to calculate debris-flow parameters for hazard assessment. *Engineering Geology* 102: 152–163. DOI. 10.1016/j.enggeo.2008.03.012. Acesso em: 28 jun. 2026.

INTERNAL DISPLACEMENT MONITORING CENTRE – IDMC. Global Report on Internal Displacement 2025. Genebra: IDMC, 2024. Disponível em: <https://www.internal-displacement.org/global-report/grid2024> . Acesso em: 06 jul. 2026.

INTERNAL DISPLACEMENT MONITORING CENTRE – IDMC. Global Report on Internal Displacement 2025. Genebra: IDMC, 2025. Disponível em: <https://www.internal-displacement.org/database/displacement-data/>. Acesso em: 06 jul. 2026.

NOVELLINO, Alessandro et al. Mapping landslides from space: a review. *Landslides*, v. 21, p. 1041–1052, fev. 2024. DOI: 10.1007/s10346-024-02215-x. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10346-024-02215-x>. Acesso em: 27 jun. 2026

O'CALLAGHAN, J.F.; Mark, D.M. (1984). *The extraction of drainage networks from digital elevation data*. Computer Vision, Graphics, and Image Processing. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0734189X84800110#preview-section-abstract> . Acesso em: 27 jun. 2026.

SCHEIDL, C.; RICKENMANN, D. Empirical prediction of debris-flow mobility and deposition on fans. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/esp.1897>. Acesso em: 27 jun. 2026.

VELÁSQUEZ, A. A.; Mejía, J. F. Estudio geomorfológico de la cuenca La Arenosa. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 1991.

VTB Engenharia - Principais causas de instabilidade em taludes. Disponível em: <https://www.vtbengenharia.com.br/principais-causas-de-instabilidade-em-taludes/>. Acesso: 10 jul. 2026

WORLD BANK; GFDRR – GLOBAL FACILITY FOR DISASTER REDUCTION AND RECOVERY. Natural disasters force 26 million people into poverty and cost \$520

bn in losses every year, new World Bank analysis finds. Press release, Washington, 14 Nov. 2016. Disponível em:
<https://www.worldbank.org/en/news/pressrelease/2016/11/14/natural-disasters-force-26-million-people-into-poverty-and-cost520bn-in-losses-every-year-new-world-bank-analysis-finds>. Acesso: 28 jun. 2026