

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

ELIZABETH SANTOS PENHA

APLICAÇÃO DE MODELO PROBABILÍSTICO NA SIMULAÇÃO DE TRAJETÓRIAS
DE DESLIZAMENTOS

SÃO LUÍS - MA
2026

ELIZABETH SANTOS PENHA

**APLICAÇÃO DE MODELO PROBABILÍSTICO NA SIMULAÇÃO DE TRAJETÓRIAS
DE DESLIZAMENTOS**

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

Orientador: Prof. Dr. George Fernandes Azevedo.

SÃO LUÍS – MA

2026

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

Penha, Elizabeth Santos.

Aplicação de modelo probabilístico na simulação de trajetórias de deslizamentos / Elizabeth Santos Penha. - 2026.

24 p.

Orientador(a): George Fernades Azevedo.

Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2026.

1. Deslizamento. 2. Chuva Intensa. 3. Modelagem Probabilística. 4. Sistema de Informação Geográfica. I. Fernades Azevedo, George. II. Título.

ELIZABETH SANTOS PENHA

**APLICAÇÃO DE MODELO PROBABILÍSTICO NA SIMULAÇÃO DE TRAJETÓRIAS
DE DESLIZAMENTOS**

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

Aprovado em 21 de janeiro de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. George Fernandes Azevedo (UFMA)

Prof.^a Dr.^a Solange da Silva Nunes Boni

Prof.^a Dr.^a Alice Jadneiza Guilherme de Albuquerque Almeida

*In memoriam dos meus avós Raimunda Nonata,
José Ribamar, Francisco das Chagas e Maria do
Carmo.*

AGRADECIMENTO

Agradeço em primeiro lugar a Deus por não me deixar desistir e por me tornar forte. Agradeço aos meus pais Ademir e Nívea que sempre foram os meus maiores apoiadores, meus irmãos Juan e Eliziane, meus sobrinhos Jorge Henrique e Maria Valentina, e minha tia Marinilde, vocês são o motivo pelo qual eu não desisti, amo vocês. Agradeço também a minha prima Delsuita e minha tia Maria de Jesus, obrigada pelo apoio.

Aos meus amigos que deixaram tudo mais leve, em especial, Karol, Letícia, Marina e Maysa que foram um suporte nos últimos anos, agradeço o carinho e incentivo.

Por fim, agradeço ao meu orientador professor George, por todo apoio ao longo desse trabalho, pela paciência e contribuição que foram fundamentais para realização deste trabalho.

SUMÁRIO

Introdução.....	7
Material e métodos.....	8
<i>Caracterização da área de estudo.....</i>	<i>8</i>
<i>Descrição do procedimento metodológico.....</i>	<i>10</i>
Conclusão.....	22
Referência	23

Aplicação de modelo probabilístico na simulação de trajetórias de deslizamentos

Elizabeth Santos Penha ¹, George Fernandes Azevedo²

¹Bacharel em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal do Maranhão e Graduada em Engenharia Civil pela mesma instituição – e-mail: elizabethpenha29@gmail.com

²Engenheiro Civil, Doutor em Geotecnia e professor adjunto do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Maranhão – e-mail: gf.azevedo@ufma.br

RESUMO

Eventos de chuvas intensas têm provocado, com maior frequência, deslizamentos de terra, resultando em impactos ambientais, sociais e econômicos significativos, especialmente em áreas com relevo íngreme e elevada vulnerabilidade. Diante desse cenário, a identificação e a simulação de áreas suscetíveis a deslizamentos tornam-se essenciais para o planejamento territorial e a redução de riscos. Este estudo tem como objetivo simular trajetórias de deslizamentos induzidos por eventos extremos de chuva na bacia hidrográfica de La Arenosa, localizada na Colômbia, comparando os resultados obtidos com registros reais do evento ocorrido em 21 de setembro de 1990. Esta área reúne condições naturais favoráveis à ocorrência de movimentos de massa, como clima tropical úmido, elevada pluviosidade anual, encostas íngremes e solos residuais arenosos, o que a torna representativa para análises desse tipo de fenômeno. A metodologia adotada baseou-se na integração de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) com um modelo computacional probabilístico implementado no software MATLAB, utilizando o algoritmo de direcionamento de fluxo D8 associado ao método de Monte Carlo. As simulações foram realizadas a partir de dados altimétricos e de declividade derivados de Modelos Digitais de Terreno, considerando células-fonte definidas nas áreas de maior altitude das cicatrizes reais. Os resultados demonstram boa correspondência espacial entre as trajetórias simuladas e os deslizamentos observados, com predominância de baixas probabilidades e concentrações pontuais de valores mais elevados próximas às áreas de origem. Conclui-se que o modelo apresenta potencial para apoiar estudos de suscetibilidade e gestão de riscos associados a deslizamentos.

Palavras-chave: Deslizamento. Chuva intensa. Modelagem probabilística. Sistema de Informação Geográfica.

Application of a model for defining landslide trajectories

ABSTRACT

Intense rainfall events more frequently cause soil penetration, resulting in significant environmental, social, and economic impacts, especially in areas of surface importance and high vulnerability. Given this scenario, the identification and simulation of areas susceptible to penetration become essential for territorial planning and risk reduction. This study aims to simulate penetration trajectories induced by extreme rainfall events in the La Arenosa watershed, located in Colombia, comparing the results obtained with real records of the event that occurred on September 21, 1990. This area presents specific natural conditions conducive to mass movements, such as a humid tropical climate, high annual rainfall, steep slopes, and sandy residual soils, making it representative for analyses of this type of specificity. The methodology adopted was based on the integration of Geographic Information Systems (GIS) with a probabilistic computational model implemented in MATLAB software, using the D8 flow direction algorithm associated with the Monte Carlo method. The simulations were performed using altimetric and slope data derived from Digital Terrain Models, considering source cells defined in the highest altitude areas of the real scars. The results demonstrate good spatial correspondence between the simulated trajectories and the observed landslides, with a predominance of low probabilities and point concentrations of higher values near the areas of origin. It is concluded that the model has the potential to support susceptibility studies and risk management associated with landslides.

Keywords: Landslide. Heavy rainfall. Probabilistic modeling. Geographic Information System.

Introdução

Eventos chuvosos extremos, definidos pela ocorrência de elevados volumes de precipitação em curtos intervalos de tempo, apresentam alta intensidade e potencial para desencadear impactos ambientais e sociais significativos (Petrucci e Azevedo, 2023). Esses eventos afetam diretamente os processos hidrológicos e geológicos, ampliando a ocorrência de desastres naturais (Bartolomeu; Ribeiro; Reboita, 2024).

Em regiões montanhosas, o crescimento urbano acelerado e, por vezes, desordenado contribui para o aumento da exposição das populações aos riscos associados aos movimentos de massa. Essa condição é especialmente evidente em países como Brasil, Colômbia e China, onde a combinação entre relevo acidentado, regimes de chuvas intensas e ocupação de encostas potencializa a ocorrência de desastres geotécnicos, reforçando a necessidade de ações voltadas à avaliação e ao gerenciamento desses riscos (Botero et al., 2014).

Na Colômbia, de acordo com Aristizábal et al. (2010), ao longo do último século foram registrados 36 desastres associados a movimentos de massa de grande magnitude. Dentre esses eventos, destaca-se o ocorrido em Villatina, na cidade de Medellín, em 27 de setembro de 1987, considerado o mais catastrófico, com cerca de 640 vítimas fatais. Além desse episódio, pode-se citar o evento ocorrido na Bacia Hidrográfica de La Arenosa, em 21 de setembro de 1990, que se destacou pelo elevado número de deslizamentos desencadeados (Aristizábal et al., 2016).

Segundo Ayla (2025), registros entre 1903 e 2023 totalizam 73.278 mortes associadas aos deslizamentos, evidenciando sua elevada letalidade em escala global. A Ásia foi a região mais afetada, concentrando cerca de 40% das fatalidades (28.041 mortes). A Europa e a África também registraram impactos relevantes, embora em menor escala, com 17.021 e 3.603 mortes, respectivamente. Nas Américas, esses desastres foram responsáveis por aproximadamente 33% do total de mortes, com destaque para a América Central e a América do Sul, regiões particularmente vulneráveis à ocorrência de chuvas intensas, relevo acidentado e instabilidade geotécnica.

Ao estimar o custo global associado às perdas e danos econômicos de eventos extremos nos últimos 20 anos, Newman e Noy (2023) destacam que estes somam US\$260,8 bilhões. Os dados mostram que 53% das perdas e danos registrados nos 185 eventos são decorrentes das mudanças climáticas antropogênicas, como

ocorrência de tempestades, ondas de calor, inundações e secas (Newman e Noy, 2023).

Neste contexto, a previsão de áreas suscetíveis a escorregamentos se tornou essencial para reduzir seus impactos, embora seja complexa devido à interação de múltiplos fatores que controlam a estabilidade das encostas. Para isso, foram desenvolvidos métodos de análise em diferentes escalas espaciais, com destaque para os modelos matemáticos de base física, que utilizam equações representativas dos processos naturais e integram análises hidrológicas e de estabilidade (Wilkinson; Anderson; Lloyd, 2002; Dykes, 2002). Entre esses modelos destacam-se dSLAM (Wu; Sidle, 1995), SINMAP (Pack; Tarboton; Goodwin, 1998), SHALSTAB (Montgomery; Dietrich, 1994), TRIGRS (Baum; Savage; Godt, 2008) e SLIP (Montrasio; Valentino, 2008). O modelo SHALSTAB estima a suscetibilidade a escorregamentos rasos a partir da precipitação crítica, enquanto o TRIGRS considera a variação temporal da infiltração em função da intensidade e duração das chuvas (Iverson, 2000; Baum; Savage; Godt, 2008). O mapeamento, a detecção e a previsão de deslizamentos utilizam imagens de sensoriamento remoto e variáveis ambientais integradas a algoritmos de análise, cuja precisão tem sido ampliada pela maior disponibilidade de dados de alta resolução (Yao; Chen; Lui, 2021; Khan e Sharma, 2022; Basu e Pal, 2023).

Em razão da complexidade dos processos de movimentos de massa e da grande quantidade de informações envolvidas nas análises de risco e suscetibilidade, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) têm sido amplamente empregados em conjunto com modelos físicos em estudos e pesquisas científicas (Venancio et al., 2013). Azevedo, Carvajal e Souza (2018) analisaram a suscetibilidade a deslizamentos em uma região do Distrito Federal por meio de uma abordagem probabilística, que permitiu incorporar a variabilidade dos parâmetros no modelo de estabilidade de taludes e expressar os resultados em termos de probabilidades de falha. Neves et al. (2025) aplicaram os métodos probabilísticos FOSM e Monte Carlo para estimar a probabilidade de ruptura de encostas suscetíveis a deslizamentos rasos na Vila Rabelo, em Sobradinho II (DF). Utilizando MATLAB e FORTRAN, respectivamente, os autores observaram que o método de Monte Carlo apresenta probabilidades de ruptura geralmente mais elevadas e maior detalhamento espacial, sobretudo em áreas íngremes, sendo essas diferenças influenciadas principalmente pela distribuição adotada para a variável coesão, mas ambos os métodos apresentam padrões espaciais semelhantes na

distribuição das classes de probabilidade de ruptura.

Apesar dos avanços obtidos, ainda persistem desafios associados à necessidade de bases de dados amplas e consistentes, bem como à complexidade inerente aos processos naturais que controlam os deslizamentos de terra. Esses fatores reforçam a relevância dos mapas de suscetibilidade como instrumentos fundamentais para o planejamento territorial e para a redução do risco de desastres (Fang et al., 2021; Gu et al., 2022). Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo simular trajetórias de deslizamentos induzidos por eventos pluviométricos em uma bacia hidrográfica La Arenosa localizada na Colômbia realizando a comparação entre os resultados simulados e os registros reais dos eventos.

Material e métodos

Nesta seção, tanto a caracterização da área de estudo quanto a metodologia adotada para a simulação das trajetórias dos eventos de deslizamentos definidos sob a influência de eventos pluviométricos serão apresentadas, assim como as etapas para a comparação destas trajetórias com as cicatrizes reais.

Caracterização da área de estudo

A área escolhida para o estudo refere-se à bacia hidrográfica de La Arenosa, localizada na Colômbia. A bacia de La Arenosa está localizada a 160 km a leste do Vale Aburrá, ao lado sudeste da Cordilheira Central, na região de Antioquia. La Arenosa faz parte do conjunto de bacias do alto rio San Carlos e é formada pela confluência dos rios La Arenosa e Betulia, com uma extensão de 9,91 km² (Aristizábal et al., 2016). A Figura 1 apresenta a localização e a topografia da área de estudo.

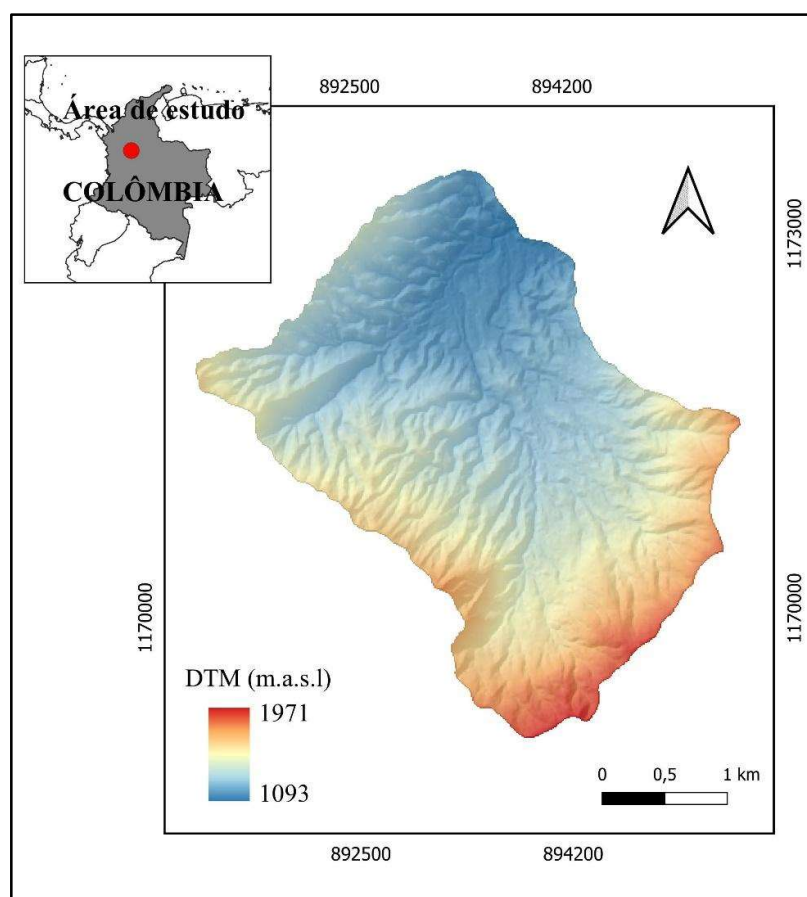


Figura 1. Localização da área de estudo.

A altitude da região varia entre 1.000 e 1.900 m acima do nível do mar. É uma bacia altamente dissecada, com encostas íngremes com comprimentos da ordem de 40 a 60 m. A maior parte da área terrestre apresenta declividades que

variam de 20 a 40 graus (Velásquez e Mejía, 1991; Aristizábal et al., 2016).

Conforme IGAC (2007a), a região apresenta clima tropical úmido, caracterizado por uma precipitação média anual de aproximadamente 4.300 mm e temperatura média anual de 23 °C. O

regime pluviométrico é marcado por elevada variabilidade, tanto em escalas interanuais quanto

intersazonais, A Figura 2 mostra a distribuição mensal de chuvas.

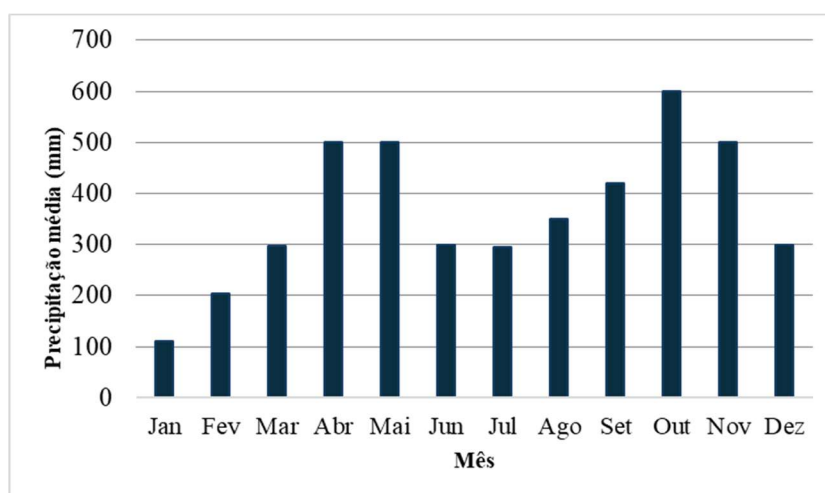


Figura 2. Distribuição de precipitações médias mensais na bacia de La Arenosa (modificado Aristizábal et al., 2016).

As distribuições mensais de precipitação evidenciam um padrão sazonal bem definido, com uma estação chuvosa predominante entre setembro e novembro, e entre março e maio. Entre janeiro e março se considera estação seca, cujo mínimo de precipitação ocorre em janeiro. As chuvas ocorrem frequentemente à tarde e à noite, na forma de fortes tempestades ou chuvas de curta duração (Aristizábal et al., 2016). A maioria dos deslizamentos na bacia hidrográfica é desenvolvida por esses eventos e pela variação do nível do lençol freático provocado pelas condições de chuva anteriores (Fressard et al., 2016).

Solos residuais arenosos de origem granítica predominam nas encostas da bacia de La Arenosa. Nas cristas e áreas com deslizamentos há afloramentos rochosos. A vegetação original de floresta alpina foi completamente substituída por

atividades agrícolas, como cultivos de café, cana-de-açúcar e pastagens, contribuindo para a instabilidade das encostas (Aristizábal et al., 2016).

O presente estudo considerou os deslizamentos desencadeados por um evento crítico de precipitação de curta duração e alta intensidade ocorridos em 21 de setembro de 1990 que impactou a bacia de La Arenosa. Em menos de três horas, foram registrados 208 mm de chuva na área de estudo. Os dois meses que antecederam o evento foram caracterizados por precipitações prolongadas de alta intensidade, totalizando aproximadamente 621 mm. A análise estatística da série histórica de precipitação, conduzida por Mejía e Velásquez (1991), indicou que o evento foi excepcional, com estimativa de um período de retorno de 200 anos. A distribuição pluviométrica do evento está representada pela Figura 3.

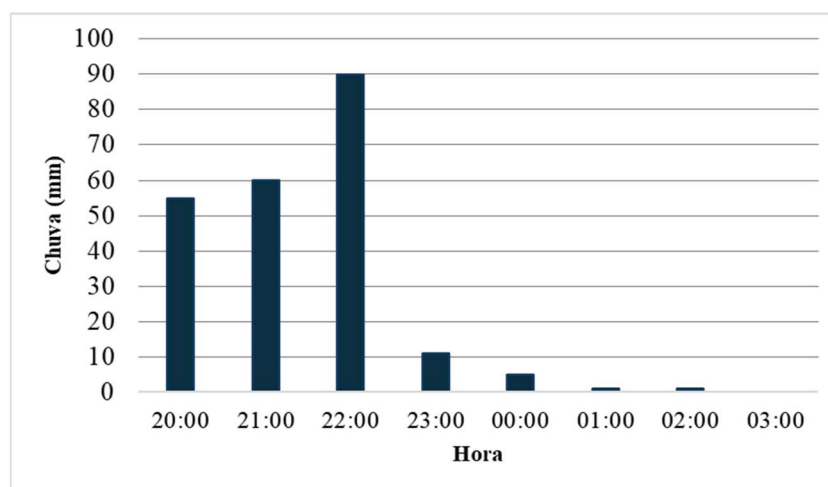


Figura 3. Registro pluviométrico específico de 21 de setembro de 1990 que gerou os eventos de deslizamentos (modificado Aristizábal et al., 2016).

Esse evento se destacou pelo número excepcionalmente elevado de rupturas registradas. As consequências para a população local foram severas: 20 pessoas perderam a vida, 260 foram evacuadas, 27 residências foram destruídas e outras 30 sofreram danos. Além disso, diversas pontes e mais de 100 metros de rodovia foram completamente destruídos. A Usina Hidrelétrica de Calderas foi inundada e sofreu danos significativos devido ao transporte de grandes blocos pelo córrego La Arenosa. As perdas totais foram estimadas em mais de US\$ 6 milhões (Hermelin; Mejía; Velásquez, 1992).

Descrição do procedimento metodológico

Com o auxílio da plataforma de sistemas de informações geográficas (SIG), um software chamado SPRING 5.4.3, um banco de dados e um projeto foram criados contendo as informações da

área de estudo. As principais características relacionadas ao projeto no programa SIG encontram-se apresentadas a seguir:

Projeção e datum utilizados:
UTM/WGS84, zona 18 sul;

Retângulo envolvente em coordenadas planas:

X1 = 891.236 m; Y1 = 1.168.994 m;

X2 = 895.586 m; Y2 = 1.173.554 m

As informações corresponderam ao limite geográfico da região, à topografia do terreno e às cicatrizes dos deslizamentos datados em 1990. Estes últimos dados serviram de base para a comparação com as simulações executadas nas análises. A Figura 4 apresenta a distribuição espacial dos deslizamentos utilizada na pesquisa. A ocorrência generalizada desses eventos foi diretamente desencadeada pela tempestade de 21 de setembro de 1990.

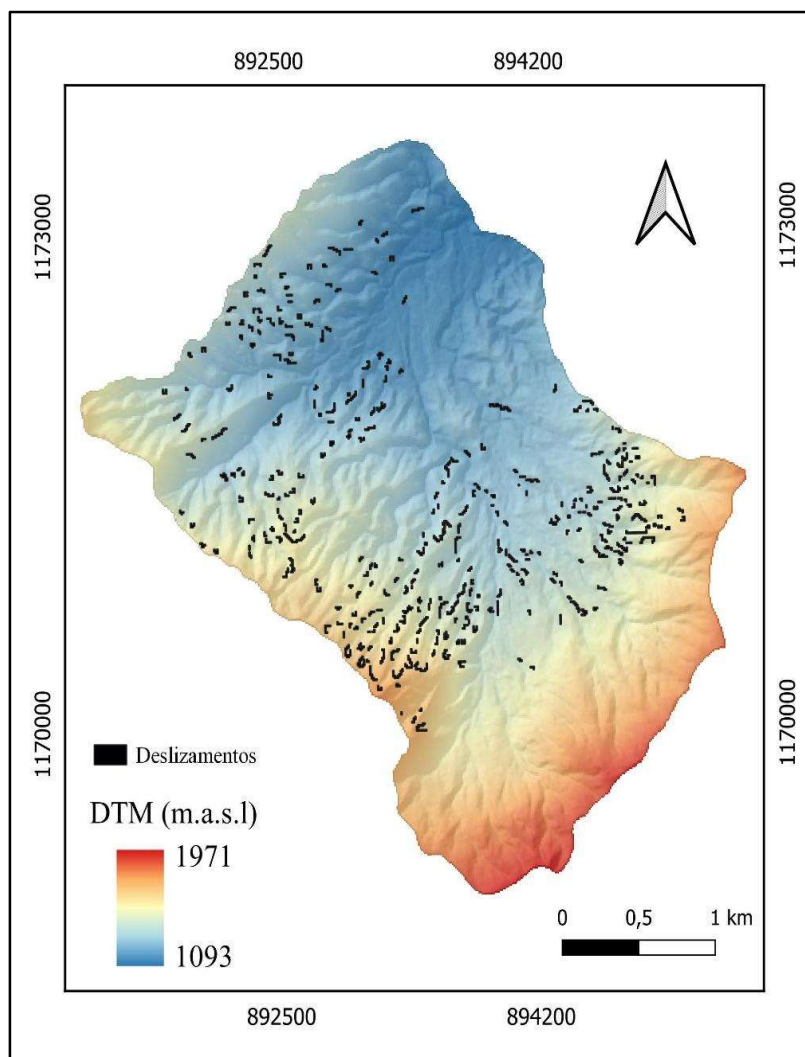


Figura 4. Distribuição dos deslizamentos na bacia de La Arenosa causados pelo evento de chuvas em 21 de setembro de 1990.

A quantidade de deslizamentos presente no inventário empregado na pesquisa foi de 340, representados por polígonos. A partir da distribuição por toda a bacia, delimitou-se uma área baseando-se, como critério, a grande incidência de cicatrizes com extensões expressivas. A região localiza-se na porção sudoeste da bacia de La Arenosa. Um novo projeto contemplando esta área específica foi estabelecido com as mesmas projeções e datum definidos para o projeto de toda

a bacia, mas com um retângulo envolvente restrito (também expresso em coordenadas planas):

$X1 = 892.913 \text{ m}$; $Y1 = 1.170.191 \text{ m}$;

$X2 = 893.663 \text{ m}$; $Y2 = 1.170.727 \text{ m}$.

Nesta região delimitada, cinco polígonos de escorregamentos foram selecionados para servirem de base comparativa, em função das suas expressivas trajetórias de deslizamentos. Tais eventos encontram-se devidamente identificados de forma numérica na Figura 5.

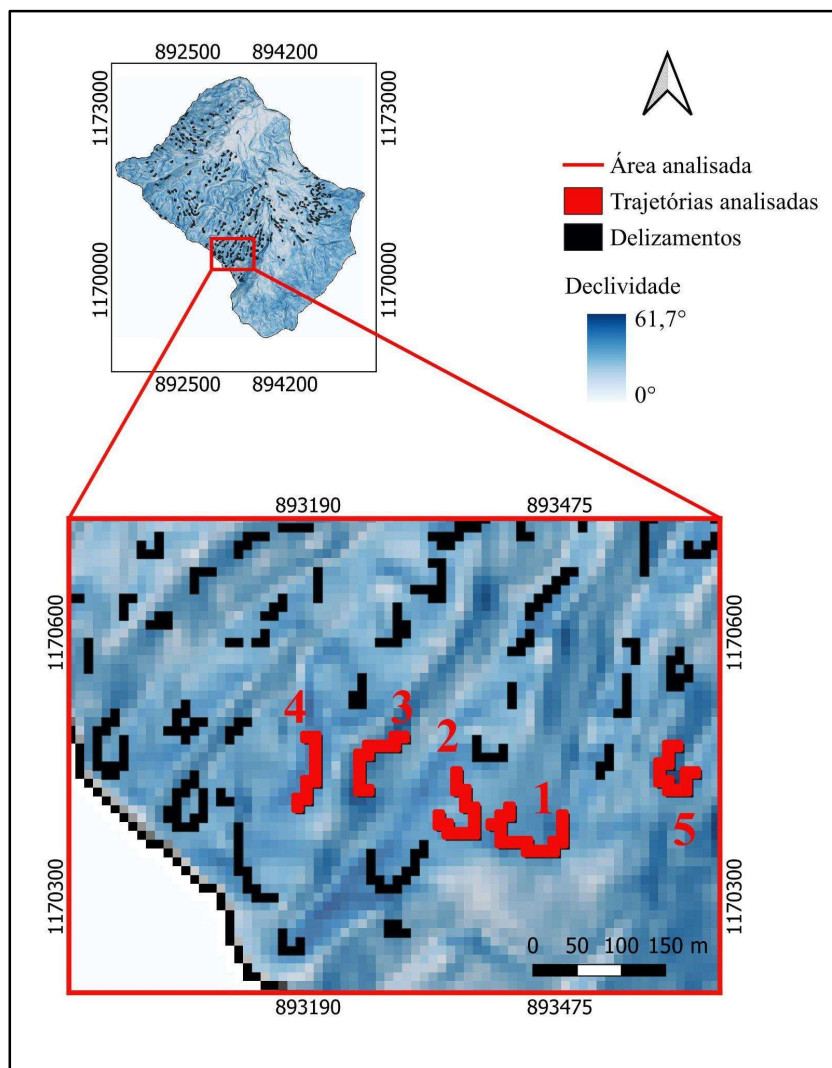


Figura 5. Delimitação da área com deslizamentos expressivos em termos de área.

Para obter as possíveis trajetórias deposicionais utilizou-se um algoritmo baseado em simulações de fluxo implementado no software MATLAB. O início do processo corresponde à definição da fonte do escorregamento. A partir desta primeira posição, uma trajetória específica é determinada aplicando-se um algoritmo que estabelece a direção do fluxo por intermédio do critério das inclinações na vizinhança daquela posição analisada. O cálculo da declividade de cada célula é determinado em relação a cada uma das oito posições vizinhas, considerando-se a diferença entre as altitudes dividida pela distância

entre os centros dos pixels, correspondendo ao mecanismo empregado nos algoritmos denominados D8 (*deterministic eight-neighbor*). Segundo O'Callaghan and Mark (1984), esta classe de modelos de propagação de deslizamentos possui como regra o direcionamento do fluxo para a célula vizinha que possui a maior inclinação.

Conforme Hürlimann et al. (2008), algoritmos usados na determinação de rotas de fluxo podem ser facilmente empregados em um modelo randômico na geração de trajetórias de corridas de detritos. Neste sentido, uma proposta simplificada de Vieira e Fernandes (2004) foi

aplicada neste trabalho. A técnica combina o modelo de fluxo D8 com o método probabilístico de Monte Carlo para simular o espalhamento associado aos fluxos de detritos. Diferentemente da proposta original dos algoritmos D8, não se usa a direção mais íngreme para o avanço do deslizamento. Emprega-se uma direção de saída de propagação aleatória para a determinação de cada caminho individual de fluxo. O passo inicial refere-se ao cálculo da probabilidade P_i de que o fluxo de detritos avance sobre uma das células vizinhas i , a partir da célula central segundo a equação 1:

$$P_i = \frac{\tan\theta_i}{\sum_{j=1}^k \tan\theta_j} \quad (1)$$

Onde θ_i é o ângulo de inclinação da célula central em direção à célula vizinha i . A condição de fluxo ascendente é descartada (gradiente positivo), uma vez que se considera que a

propagação do escorregamento ocorre apenas da célula central com uma altimetria maior para os pixels vizinhos mais baixos. A definição da probabilidade P_i é realizada somente para as posições vizinhas mais baixas que o elemento central e capazes de receberem o fluxo (gradientes negativos). A variável k é igual a quantidade de posições com gradientes negativos de inclinações. Desta forma, o índice i varia de 1 a k , podendo k ser inferior a 8 em função da restrição citada acima.

Os valores de inclinação dos pixels para a região da bacia de La Arenosa foram gerados no software SPRING 5.4.3 com base para os dados de entrada o plano de informação (PI) em formato matricial (categoria MNT) de topografia da área por meio da ferramenta de criação de declividade. A saída de dados correspondeu a um PI numérico em graus. A Figura 6 apresenta o mapa de declividade para a região da bacia de La Arenosa.

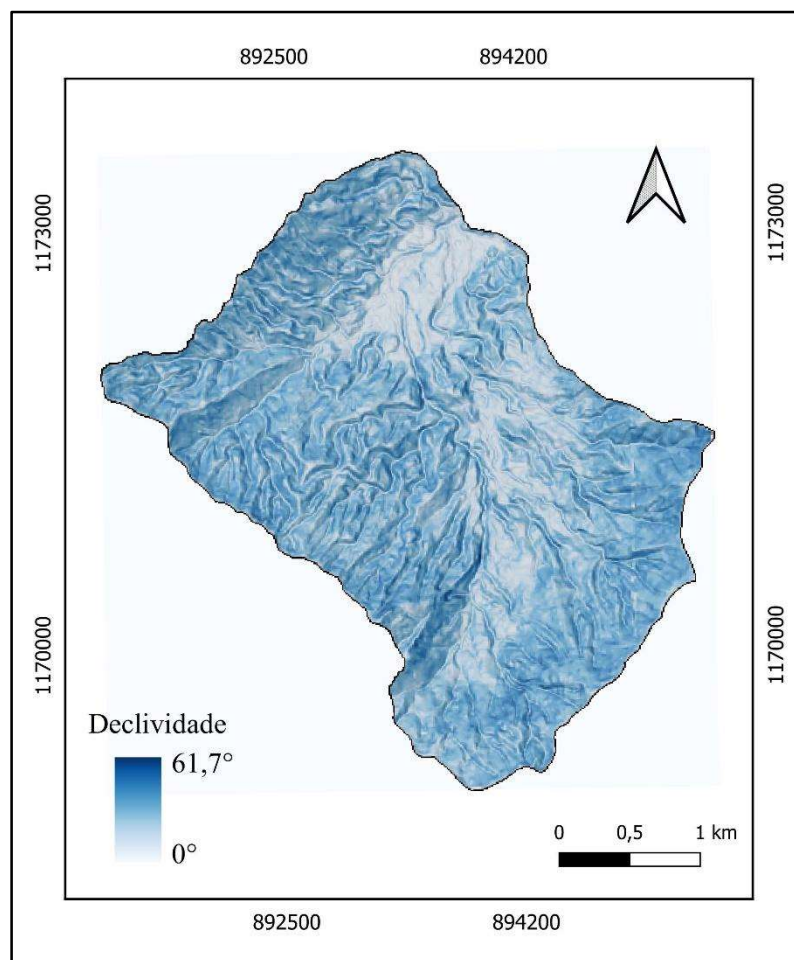


Figura 6. Mapa de declividade da bacia de La Arenosa.

Como os valores da grade de declividade resultantes da operação no software SPRING 5.4.3 não indicam se o gradiente é positivo ou negativo, foi incorporado ao código desenvolvido no Matlab um critério que utiliza a matriz de dados altimétricos para verificar a condição entre as cotas

da posição central e cada uma das células vizinhas e aplicar a restrição contra-fluxo ascendente.

Conforme Hürlimann et al. (2008), a seleção da direção de saída do fluxo é realizada com base na geração de um número aleatório n_{ran} , gerado no intervalo de 0 a 1, e seguindo a condição 1:

$$S_{i-1} \leq n_{ran} < S_i \quad (i = 1, \dots, k) \quad (1)$$

Onde S_i é probabilidade acumulada, definida conforme a equação 2:

$$S_i = \sum_{j=1}^i P_j \quad (i = 1, \dots, k) \quad (2)$$

Assim, a partir da escolha da posição, considera-se que todo o volume de detritos presente na posição central será direcionado e transferido integralmente para apenas uma célula

adjacente. Uma trajetória individual de deslizamento é definida pela repetição do processo apresentado nas equações 1 a 3. A quantidade completa de iterações executada para cada trajetória individual que define uma simulação de Monte Carlo é denominada de n_{int} . O funcionamento do algoritmo D8 em conjunto com a técnica probabilística de Monte Carlo encontra-se representada na Figura 7.

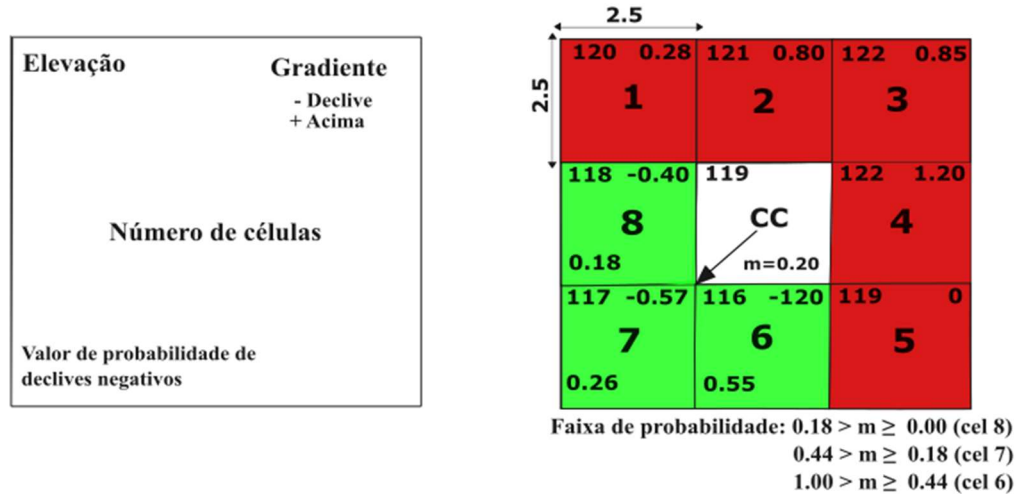


Figura 7. Técnica de Monte Carlo combinada com o algoritmo D8 (modificado de Scheidl e Rickenmann, 2010)

Vários caminhos individuais são gerados com base neste mesmo procedimento a partir da célula inicial, considerada como fonte do evento, para desenvolver o cenário de propagação de fluxo. Segundo Scheidl e Rickenmann (2010), o aumento gradual da área potencialmente impactada pelo deslizamento é observado a elevação do número de

trajetórias individuais simuladas (n_{traj}). A Figura 8 mostra a representação de vários caminhos individuais e como isto impacta na definição da zona a ser atingida pelo fluxo.

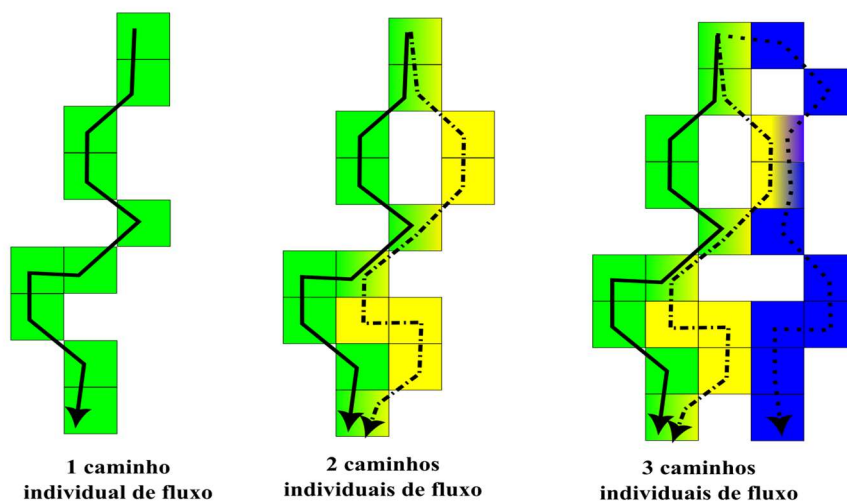


Figura 8. Região estimada a ser potencialmente atingida pelo fluxo a partir da simulação de múltiplos caminhos de fluxo individuais (modificado de Hürliemann et al., 2008).

Hürliemann et al. (2008) estabelecem que a probabilidade de que uma célula da região de

estudo possa ser atingida pelo deslizamento (P_{xy}) é determinada pela equação 3:

$$P_{xy} = \frac{n_{affect}}{n_{traj}} \quad (3)$$

Onde n_{affect} corresponde ao número de trajetórias de deslizamentos que alcançaram uma dada célula.

A rotina computacional implementada na linguagem MATLAB possui como dados de entrada em formato de arquivo as representações matriciais da altimetria e declividade. Estes arquivos foram obtidos a partir da exportação dos planos de informação matriciais de topografia e inclinação presentes no SPRING. Os arquivos foram salvos em formato txt para a importação e leitura no MATLAB.

Os demais parâmetros que também são considerados como input e requeridos para a efetuação das simulações das trajetórias são os seguintes:

- Número de iterações de Monte Carlo, que corresponde a quantidade de caminhos simulados para cada elemento de deslizamento (n_{traj});
- Número de iterações para desenvolvimento da propagação de uma trajetória específica (n_{int}), o qual define a extensão e o alcance do deslizamento ao longo da encosta;
- Posição da célula considerada como a origem do deslizamento (fonte do evento na matriz que representa a área de estudo).

A quantidade de vezes que o processo de transferência do escorregamento para células vizinhas é repetido (n_{int}), por caminho individual simulado, varia em relação a cada um dos cinco eventos analisados. A definição desta variável foi conseguida por meio de um processo de calibração.

O método consistiu no teste de diferentes valores de n_{int} nas simulações até que houvesse uma adequação entre a extensão real da cicatriz e a área alcançada pelo algoritmo. O estabelecimento do número de caminhos gerados (n_{traj}) para os deslizamentos individuais foi baseado em uma análise de convergência das probabilidades. Aplicou-se um aumento gradativo no número de casos de Monte Carlo para verificar se haveria uma tendência de convergência nas medidas de probabilidades calculadas. O número de casos calculados necessário para se observar a estabilização das probabilidades difere para cada deslizamento. As alternativas empregadas nos casos de Monte Carlo para verificação da fixação das probabilidades são mostradas na seção de resultados. Já para a escolha da fonte dos escorregamentos analisados, o procedimento empregado buscou identificar a posição da célula na representação topográfica que apresentasse a altimetria mais alta dentro do polígono que delimita a trajetória real do deslizamento. Para facilitar esta etapa, aplicou-se a ferramenta de recorte de plano de informação presente no programa SPRING para a representação da topografia. Utilizou-se os polígonos dos escorregamentos como as máscaras para a realização do recorte interno, o que resultou na restrição da topografia apenas no interior da cicatriz. A posição das fontes dos eventos estudados, em termos de linha e coluna localizadas em relação ao projeto delimitado, assim como as áreas de cada deslizamento selecionado e o número de vezes usado no processo de transferência do evento para células vizinhas, consta na Tabela 1.

Tabela 1. Informações para os escorregamentos selecionados.

Número do deslizamento	Área (m ²)	Posição da fonte (linha e coluna)	Quantidade de transferências(n_{int})
1	1900	(37,52)	5
2	1600	(35,44)	10
3	1300	(30,33)	7
4	1200	(32,26)	10
5	1400	(30,68)	5

Cada análise foi realizada individualmente para cada uma das cinco cicatrizes selecionadas. Assim, matrizes individuais de probabilidade de que cada célula seja atingida pelo evento propagado (P_{xy}) foram geradas, mapeando desde a célula fonte até as posições mais distantes alcançadas pela mancha de deslizamento. Em termos quantitativos, as posições armazenam as frequências relativas da quantidade de vezes que a célula foi escolhida dentre as simulações executadas pelo algoritmo.

Estas matrizes resultantes tiveram suas representações exportadas do software MATLAB sob o formato de arquivos texto, os quais foram adaptados para serem importados para a plataforma SPRING. Para tanto, o cabeçalho padrão referente aos arquivos nativos do SPRING foi adicionado a cada um dos cinco arquivos oriundos das simulações do MATLAB. Nesse cabeçalho estão presentes as informações relacionadas a projeção cartográfica dos dados e escala, assim como as dimensões da matriz representada.

Na etapa de tratamento das informações no SPRING, para melhor visualização e análise comparativa dos resultados, executou-se o processo de criação de um mapa temático das probabilidades, pela sua classificação em intervalos de valores. Para a obtenção deste mapa temático, utilizou-se a ferramenta de fatiamento de grades numéricas, disponível no SPRING. Por fim, procedeu-se as comparações entre a extensão real dos eventos com as representações calculadas a partir do modelo empregado. As comparações corresponderam principalmente em observar se a trajetória real estava totalmente contida na previsão simulada. Verificou-se também a distribuição de

probabilidade prevista nos pixels da trajetória real, analisando se haveria uma relação alta de previsibilidade fornecida pelas simulações. Novamente, o artifício de recorte do plano de informação foi usado, agora recortando-se o PI de probabilidades com base nas regiões internas dos polígonos dos escorregamentos. A apresentação final dos mapas gerados foi realizada como o auxílio do software QGIS, correspondente a uma plataforma SIG.

As etapas que compõem o procedimento metodológico do trabalho podem ser apresentadas por meio do seguinte fluxograma (Figura 9).

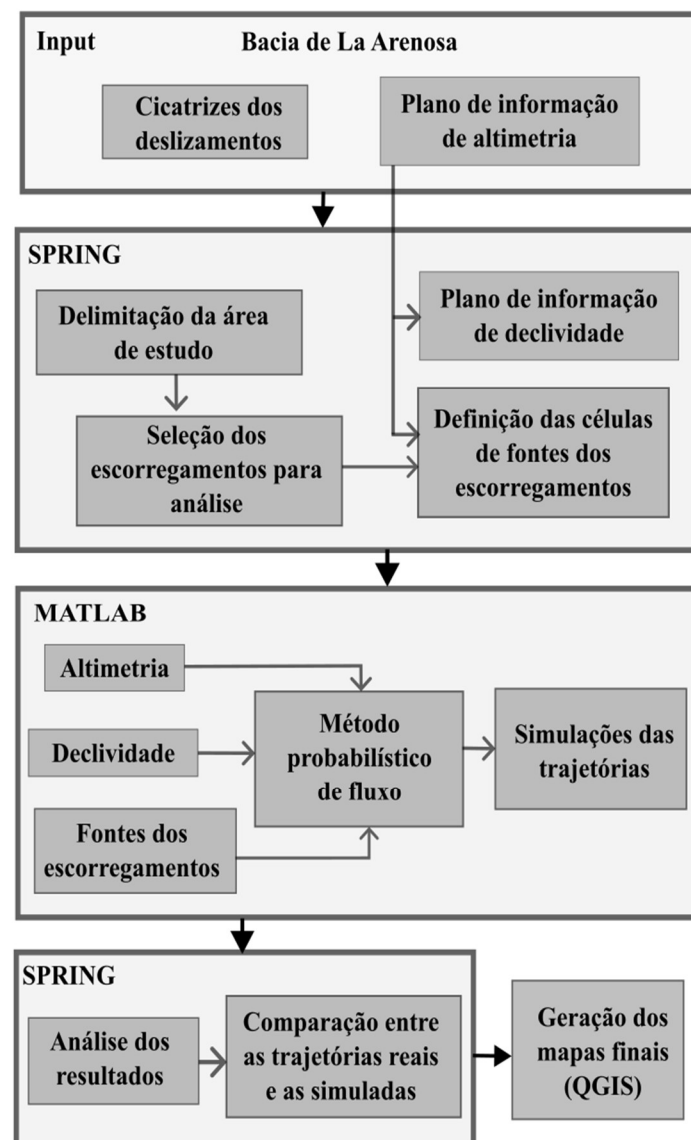


Figura 9. Metodologia aplicada ao trabalho.

Resultado e discussão

A aplicação da metodologia possibilitou a avaliação individual das cicatrizes de ruptura e a análise de suas condições de estabilidade. Os

resultados concentraram-se principalmente nas porções sudoeste e central da área de estudo, onde se observaram variações expressivas nas

probabilidades em que as células tendem a serem atingidas, com valores mais elevados nas proximidades das células-fonte dos deslizamentos e em setores de menor declividade. As probabilidades calculadas dentre todos os deslizamentos analisados, incluindo as zonas fora das cicatrizes reais, variaram entre aproximadamente 36,4% e 55%.

Os resultados consolidados, apresentados no Tabela 2, foram interpretados à luz das

características geomorfológicas da bacia de La Arenosa, das condições pluviométricas registradas e do comportamento do modelo probabilístico de Monte Carlo. Os últimos cenários de simulações ultrapassaram 1.000.000 de iterações, garantindo robustez estatística às análises e evidenciando a distribuição probabilística das trajetórias de fluxo, bem como a recorrência dos caminhos preferenciais identificados.

Tabela 2. Resultados das simulações para estabilização dos deslizamentos estudados.

Deslizamento	Posição das células com maior probabilidade (linha x coluna)	Nº de iteração de Monte Carlo	Maior probabilidade no interior da trajetória real
D1	36 x 53	5.000	0,3499
		50.000	0,3647
		350.000	0,3621
		1.000.000	0,3649
		5.500.000	0,3637
D2	34 X 43	1.000	0,4170
		75.000	0,4054
		300.000	0,4077
		800.000	0,4059
		1.000.000	0,4059
D3	29 X 34	15.000	0,5441
		75.000	0,5437
		135.000	0,5461
		1.200.000	0,5456
		1.800.000	0,5458

Deslizamento	Posição das células com maior probabilidade (linha x coluna)	Nº de iteração de Monte Carlo	Maior probabilidade no interior da trajetória real
D4	31 X 25	18.000	0,4492
		175.000	0,4471
		2.250.000	0,4474
		3.500.000	0,4468
		15.000.000	0,4472
D5	28 X 70	2.000	0,5115
		34.000	0,5022
		140.000	0,5053
		5.300.000	0,5066
		20.000.000	0,5066

O Deslizamento D1, situado na porção sudeste da área de estudo, necessitou do terceiro maior número de simulações para atingir a estabilidade. As probabilidades dos elementos serem atingidos entre a célula-fonte e a célula mais impactada variaram de 5.000 a 5.500.000 simulações, resultando em valores probabilísticos entre aproximadamente 34,99% e 36,49%, com oscilações até a convergência, conforme apresentado no Tabela 2.

A comparação entre a mancha simulada do evento e a área efetivamente impactada permitiu uma melhor visualização da cicatriz resultante. As células foram classificadas em intervalos de probabilidade entre 0 e 36,4%, representados por diferentes códigos de cores, possibilitando a identificação de áreas com distintos níveis de suscetibilidade. As Figuras 10 e 11 apresentam a distribuição espacial das probabilidades simuladas para o deslizamento D1.

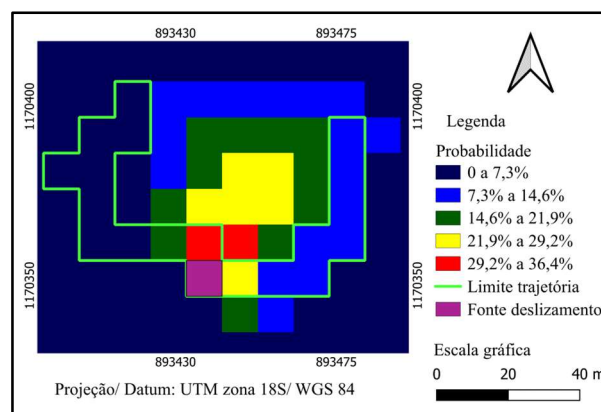


Figura 10. Trajetória temática com cicatriz do deslizamento D1.

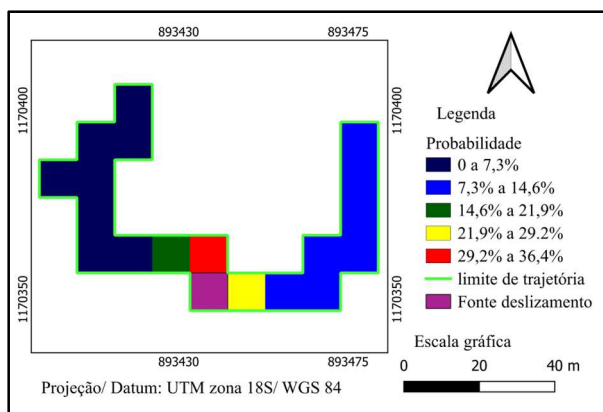


Figura 11. Trajetória temática com recorte da cicatriz real do deslizamento D1.

Com a cicatriz previamente delimitada a partir dos dados de 1990, o raster correspondente à mancha de propagação do deslizamento posicionou-se mais ao centro e à direita da cicatriz - com maiores intensidades concentradas próximas (representadas em vermelha e amarela) e menores, um pouco mais afastadas à célula de origem (em azul) -, mantendo a elevada correspondência nos resultados, especialmente na identificação da célula-fonte.

Na matriz de probabilidades alcançadas, a célula mais impactada foi identificada na posição (36,52). A Figura 11 ilustra a delimitação isolada do D1 no interior da cicatriz real, evidenciando a consistência entre a simulação probabilística e os registros históricos do evento.

A análise do cálculo de áreas por classes de probabilidade do plano de informação de D2 (Tabela 3), representado como trajetória temática (Figura 11), evidencia uma distribuição espacial heterogênea das classes analisadas. Observa-se que a classe de menor intervalo (0 a 7,3%) concentra a maior área, totalizando 900 m², o que corresponde a aproximadamente 47% da área total mapeada. Esse resultado indica a predominância de valores baixos do parâmetro analisado, sugerindo condições mais estáveis ou de menor intensidade do fenômeno representado nessa classe.

As classes intermediárias (7,3% a 14,6%) também apresentam participação significativa, com 700 m² (cerca de 37% da área total), reforçando a presença expressiva de áreas com valores moderados. Em contraste, as classes de maior intervalo (acima de 14,6%) apresentam áreas reduzidas, correspondendo a 100 m² cada uma, o que representa aproximadamente 5% por classe, indicando que os valores mais elevados ocorrem de forma pontual e espacialmente restrita. Essa distribuição indica que, apesar do predomínio de baixos a médios valores na maior parte da área, existem setores pontuais com valores elevados, associados a zonas potencialmente mais instáveis e

suscetíveis a deslizamentos, que estão próximos à célula-fonte. Embora menos extensas, essas áreas são especialmente relevantes para o gerenciamento de riscos, por demandarem monitoramento contínuo e ações prioritárias de mitigação e prevenção.

Tabela 3. Medidas de classes para a trajetória do deslizamento 1.

Classes de probabilidade	Área (m ²)
0% a 7,3%	900
7,3% a 14,6%	700
14,6% a 21,9%	100
21,9% a 29,2%	100
29,2% a 36,4%	100
Área total	1900

O deslizamento 2 apresentou valores com um padrão de propagação quase que estável, com exceção da primeira iteração, a qual o valor foi mais elevado que os demais (41,7%). O raster do caso D2 mostrou boa correspondência com a cicatriz de 1990. O deslizamento possui o menor número de simulações (1.000.000) necessárias para alcançar a estabilidade se comparada aos demais deslizamentos. A célula de maior impacto dentro do limite da trajetória está na posição (24, 34). As representações temáticas da simulação estão apresentadas na Figura 12 e 13.

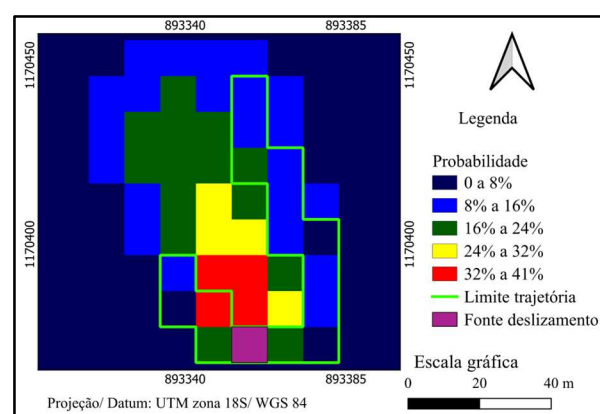


Figura 12. Trajetória temática com cicatriz do deslizamento D2.

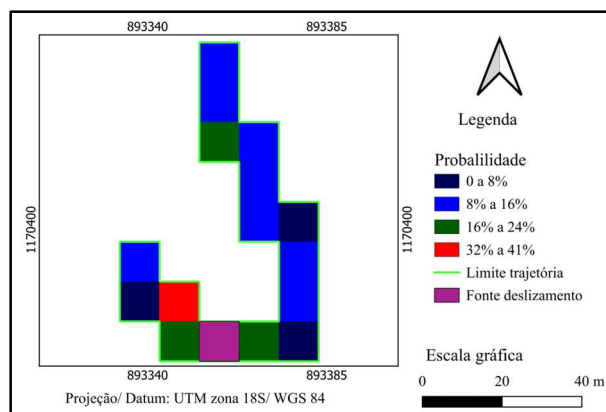


Figura 13. Trajetória temática com recorte da cicatriz real do deslizamento D2.

As sobreposições gráficas observadas entre os rasters e as trajetórias temáticas apresentadas nas Figuras 12 e 13, permitiram identificar a relação entre os limites simulados e a dinâmica de propagação espacial do D2. Constatou-se que a mancha de probabilidade se distribuiu sob a cicatriz delimitada 1990, com maior variação para a classe de 32% a 41% (representada em vermelho) e menores intensidades concentradas próximas à célula de origem (em verde). Observa-se que o modelo prevê a ocorrência de células definidas com altas probabilidades de impacto fora da trajetória real dos deslizamentos, principalmente na direção norte a partir da posição da fonte.

Os resultados das medidas de classe para o evento 2 no interior da cicatriz, presentes na Tabela 4, indicam uma distribuição espacial concentrada principalmente nas classes intermediárias. A classe 8% a 16% apresenta a maior área, com 800 m², correspondendo a 50% da área total (1.600 m²), seguida pela classe 0 a 8% com 400 m² (25%). A classe 16% a 24% ocupa 300 m² (18,75%), enquanto não há ocorrência na classe 24% a 32%. A classe de maiores probabilidades (32% a 41%) apresenta área reduzida, com 100 m² (6,25%), indicando que os valores mais elevados ocorrem de forma pontual.

Tabela 4. Medidas de classes para a trajetória do deslizamento 2.

Classes de probabilidade	Área (m ²)
0% a 8%	400
8% a 16%	800
16% a 24%	300
24% a 32%	0
32% a 41%	100
Área total	1600

O Deslizamento D3, localizado mais ao centro da área de estudo, teve origem na célula (30,33), localizada no setor oeste da mancha temática simulada, condicionando sua propagação ao longo da declividade no sentido nordeste. De forma semelhante ao observado para o deslizamento D1, as maiores intensidades concentram-se nas proximidades da célula-fonte, representadas pelas classes de maior probabilidade, indicando maior recorrência do contato nessas áreas iniciais.

As probabilidades de contato, estimadas entre a célula de origem e a célula mais impactada, foram geradas por simulações que variaram de 15.000 a 1.800.000 casos, correspondendo a valores probabilísticos entre cerca de 54,41% e 54,58% para a posição (29,34) que corresponde à célula com maior probabilidade de deslizamento dentro da trajetória real. Observou-se que esses valores apresentaram oscilações pouco expressivas ao longo das simulações, até que fosse atingida a condição de estabilidade do modelo, conforme apresentado na Tabela 2.

De acordo com as Figuras 14 e 15, o deslizamento D3 destaca-se como aquele que apresenta célula classificada com maior probabilidade de impacto dentro do limite real de trajetória analisado (probabilidade entre 44% a 55%). No entanto, grande parte do limite real está associada a baixas probabilidades, indicando que além do aspecto topográfico incorporado pelo modelo, outras variáveis controlam a propagação dos eventos de deslizamento. Verifica-se ainda a presença de setores pontuais com elevada suscetibilidade, reforçando a importância do controle espacial da propagação e da análise detalhada das áreas potencialmente mais críticas.

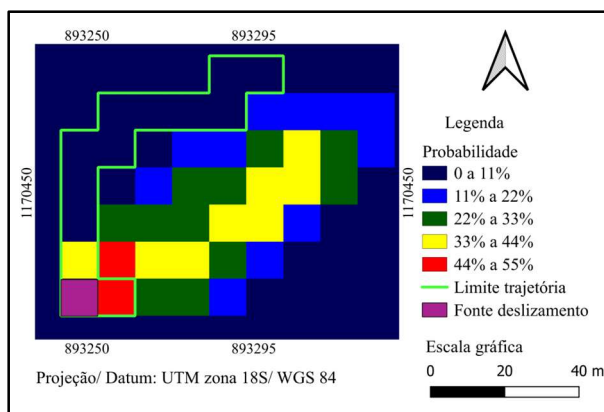


Figura 14. Trajetória temática com cicatriz do deslizamento D3.

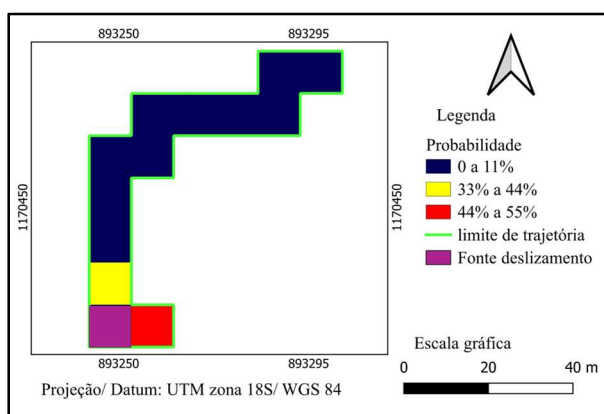


Figura 15. Trajetória temática com cicatriz do deslizamento D3.

A distribuição das áreas por classes no plano de informação de D3 (Tabela 5) mostra forte concentração na classe de menor intervalo (0 a 11%), que corresponde a 1.100 m² da área analisada, indicando predominância de valores baixos do parâmetro avaliado. As classes intermediárias (11% a 22% e 22% a 33%) não apresentam ocorrência, enquanto as classes de maior intervalo (33% a 44% e 44% a 55%) ocorrem de forma pontual, com 100 m² cada, sugerindo a presença localizada de valores elevados que, apesar de pouco representativos, espacialmente podem indicar setores potencialmente mais críticos e relevantes para análises de suscetibilidade e gestão de riscos por estarem próximos à célula-fonte.

Tabela 5. Medidas de classes para a trajetória do deslizamento 3.

Classes de probabilidade	Área (m ²)
0% a 11%	1100
11% a 22%	0
22% a 33%	0
33% a 44%	100
44% a 55%	100
Área total	1300

O Deslizamento D4, localizado na porção central da área de estudo, apresentou o segundo maior número de simulações necessárias para alcançar a condição de estabilidade. As probabilidades de impacto foram conseguidas pela aplicação de um número de simulações que variaram de 18.000 a 15.000.000, de forma que os valores probabilísticos encontram-se entre 44,92% e 44,72% na célula mais afetada. Os valores alcançados nas iterações 175.000 e 15.000.00 são bem próximos, 44,71% e 44,72% respectivamente, sendo que estes valores podem sugerir uma estabilidade precoce.

Conforme as Figuras 16 e 17, o deslizamento D4 apresenta a terceira menor probabilidade de ocorrência classificada dentro do limite de trajetória analisado. Embora a maior parte desse limite esteja associada à categoria de baixas probabilidades, observam-se alguns pontos com suscetibilidade superior a 18%.

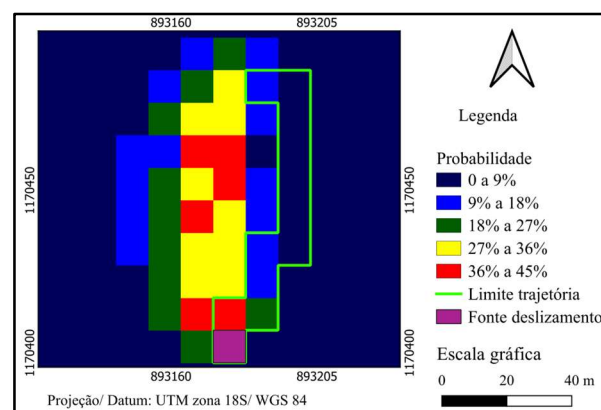


Figura 16. Trajetória temática com cicatriz do deslizamento D4.

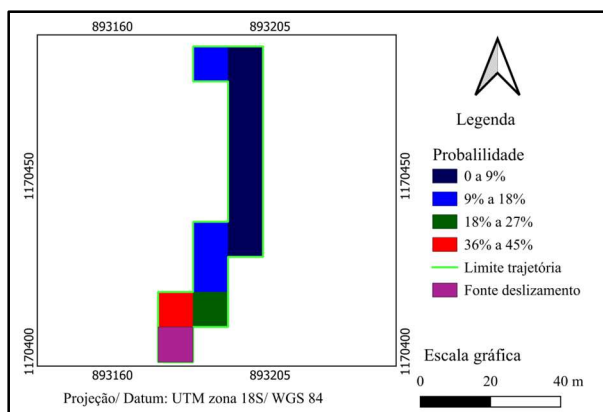


Figura 17. Trajetória temática com cicatriz do deslizamento D4.

De forma semelhante ao observado para os outros deslizamentos, a maior intensidade concentra-se nas proximidades da célula-fonte, representadas pelas classes de maior probabilidade, indicando maior recorrência do contato nessas áreas iniciais.

A distribuição das áreas por classe de probabilidade no plano de informação D4 (Tabela 6) indica predominância da categoria de menor intervalo (0 a 9%), que concentra mais que 58% da área total analisada, evidenciando a ocorrência majoritária de valores baixos do parâmetro avaliado. As classes intermediárias apresentam participação reduzida, com 300 m² na faixa 9% a 18% e 100 m² entre 18% e 27%, enquanto a classe 27% a 36% não apresenta ocorrência espacial. A classe com maiores valores de probabilidade (36% a 45%) ocupa 100 m², indicando que os valores mais elevados ocorrem de forma localizada. Esse padrão sugere que, embora a maior parte da área apresente condições menos críticas, existem regiões específicas que podem representar áreas de maior suscetibilidade, sendo relevantes para análises detalhadas e ações de monitoramento.

Tabela 6. Medidas de classes para a trajetória do deslizamento 4.

Classes de probabilidade	Área (m ²)
0% a 9%	700
9% a 18%	300
18% a 27%	100
27% a 36%	0
36% a 45%	100
Área total	1200

O deslizamento D5 apresentou comportamento muito semelhante ao do deslizamento D3, sendo ambos alinhados em uma mesma faixa de localização espacial. Situado na porção leste da área de estudo, o D5 teve origem na célula (30,68), posicionada no setor oeste da mancha temática simulada, o que condicionou sua propagação ao longo da declividade no sentido nordeste.

Esse deslizamento demonstrou o maior número de simulações entre os casos analisados, variando de 2.000 a 20.000.000, até que a estabilidade do modelo fosse atingida. Durante esse processo, a probabilidade estimada apresentou pequenas variações, iniciando em 51,15%, reduzindo para 50,22%, elevando-se posteriormente para 50,53% e, por fim, estabilizando em 50,66%.

Diferentemente dos demais deslizamentos avaliados, no caso do D5 a célula com maior probabilidade dentro do limite de trajetória encontra-se mais afastada da célula-fonte, localizada na posição (28,70). Ainda assim, esse deslizamento apresenta a segunda maior probabilidade de ocorrência, com valor aproximado de 51%. Conforme indicado nas Figuras 18 e 19, o deslizamento D5 destaca-se como o segundo evento com maior probabilidade de ocorrência dentro do limite de trajetória analisado.

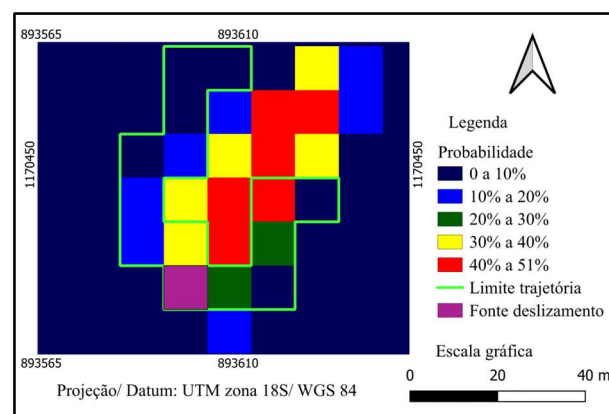


Figura 18. Trajetória temática com cicatriz do deslizamento D5

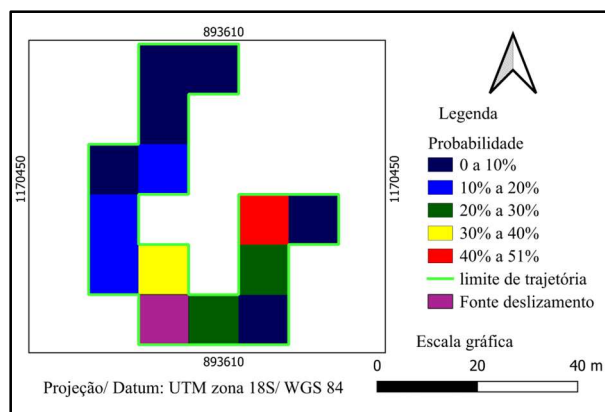


Figura 19. Trajetória temática com recorte do deslizamento D5

Na Tabela 7 encontra-se a distribuição das áreas por categorias do plano de informação referente ao deslizamento 5. Os resultados mostram a predominância das classes de menor probabilidade, com a faixa de 0 a 10% concentrando 50% da área total analisada, seguida pelas classes intermediárias de 10% a 20% (300 m²) e 20% a 30% (200 m²). As classes de maior probabilidade (30% a 40% e 40% a 51%) ocorrem em menor grau, com 100 m² cada.

Tabela 7. Medidas de classes para a trajetória do deslizamento 5.

Classes de probabilidade	Área (m ²)
0% a 10%	700
10% a 20%	300
20% a 30%	200
30% a 40%	100
40% a 51%	100
Área total	1400

No trabalho de Neves et al. (2025), a aplicação dos métodos probabilísticos FOSM e Monte Carlo evidenciou a necessidade de um elevado número de iterações para que as simulações alcançassem a convergência, especialmente em áreas com maior complexidade geomorfológica. As probabilidades de ruptura obtidas pelos autores foram, de modo geral, baixas, apresentando valores inferiores a 29% para o método FOSM e 32,6% para o método de Monte Carlo, quando comparadas às probabilidades encontradas no presente trabalho. Assim como observado neste estudo, o método de Monte Carlo

resultou em probabilidades mais elevadas em relação ao FOSM.

Entretanto, diferentemente do comportamento observado em alguns deslizamentos analisados neste trabalho, as probabilidades estimadas por Neves et al. (2025) apresentaram menor variação ao longo das iterações, atingindo a estabilidade de forma mais uniforme, sem oscilações expressivas antes da convergência. Esse resultado contrasta com alguns eventos deste estudo, nos quais foram observadas variações mais acentuadas das probabilidades até a estabilização das simulações.

Resultados comparáveis foram reportados por Botero et al. (2014), que aplicaram uma abordagem probabilística para avaliação de deslizamentos induzidos por chuvas. Os autores observaram que a maior parte da área analisada apresentou probabilidades inferiores a 20%, enquanto as zonas consideradas mais críticas atingiram valores entre 30% e 50%, concentradas em áreas com maior declividade e condições geomorfológicas desfavoráveis. Assim como no presente estudo, os autores destacam que as probabilidades mais elevadas ocorrem de forma localizada, não sendo espacialmente dominantes.

Conclusão

O presente trabalho propôs o uso de um modelo computacional de caráter probabilístico voltado à simulação de trajetórias de deslizamentos, utilizando informações altimétricas provenientes de Modelos Digitais de Terreno (MDT). A área selecionada para aplicação do modelo foi a bacia hidrográfica de La Arenosa, na Colômbia, em razão da ocorrência de um evento extremo em 1990, responsável por danos ambientais e socioeconômicos expressivos.

A implementação do modelo ocorreu no ambiente MATLAB, com o emprego do algoritmo que usa o método D8 de direcionamento de fluxo, permitindo a geração de trajetórias deposicionais a partir de múltiplas células de origem. A comparação entre os resultados simulados e as cicatrizes observadas em campo indicou relativa aderência espacial, evidenciando a aptidão do modelo em reproduzir padrões aproximados de propagação de movimentos de massa.

Na avaliação dos eventos analisados, verificou-se que o deslizamento D1 apresentou a menor probabilidade de ocorrência dentro do limite considerado, variando entre 29,2% e 36,4%. O deslizamento D2 destacou-se pela melhor aderência à cicatriz real, além de demandar o menor número de iterações (1.000.000) e o segundo menor valor de probabilidade no interior da cicatriz. O deslizamento D3 apresentou a pior

aderência espacial, registrando as maiores probabilidades de ruptura em células no interior da cicatriz, com valores entre 44% e 55%. Já o deslizamento D5 apresentou o maior número de iterações (20.000.000) e a segunda maior faixa de probabilidade (40% a 51%), enquanto o deslizamento D4 demandou o segundo maior número de iterações (15.000.000), sendo que D4 e D5 apresentaram a segunda e a terceira melhores aderências, respectivamente, isto em relação a correspondência entre o raster e a trajetória real.

A análise dos deslizamentos D1 a D5 evidencia diferenças na distribuição espacial das classes e nas áreas totais analisadas. O D1 apresenta a maior área (1.900 m²), com predominância de valores baixos e distribuição mais contínua das classes superiores, indicando maior variabilidade espacial. O D2, com 1.600 m², concentra-se em valores intermediários, caracterizando um padrão mais homogêneo, com ocorrência pontual de valores elevados. O D3, cuja área total é de 1.300 m², destaca-se pela forte concentração em valores baixos, ausência de classes intermediárias e presença localizada de valores elevados. O D4, com 1.200 m², também apresenta predominância de valores baixos, porém com maior participação de classes intermediárias de probabilidade em relação ao D3. Já o D5, com 1.400 m², apresenta uma distribuição mais gradual das classes de probabilidade, abrangendo desde valores baixos até elevados, ainda que estes últimos ocupem parcelas reduzidas da área. Em conjunto, os resultados indicam que, apesar do predomínio de valores baixos em todos os casos, a extensão e a distribuição das classes mais elevadas variam entre os deslizamentos, refletindo distintos padrões de suscetibilidade espacial.

O modelo usado apresentou-se como uma ferramenta passível de reprodução em diferentes contextos geográficos, contribuindo para o mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos e para o suporte à tomada de decisão no planejamento territorial. Observa-se a necessidade de incorporar novas variáveis morfométricas ao modelo (como o aspecto e a curvatura das vertentes), verificando se implica na melhora do caráter preditivo dos eventos.

Referência

- Alcantara-Ayala, I., 2025. Landslides in a changing world. *Landslides* [online]. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02451-1>. Acesso: 21 de jan. 2026.
- Aristizábal, E., Martínez, H., Gómez, J., 2010. Una breve revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, físicas y Naturales*. 341: 209-227.
- Aristizábal, E.; Vélez, J.; Martínez, H.; Jaboyedoff, M., 2016. Shia_Landslide: a distributed conceptual and physically based model to forecast the temporal and spatial occurrence of shallow landslides triggered by rainfall in tropical and mountainous basins. *Landslides* 13. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0580-7>. Acesso: 21 de jan. 2026.
- Azevedo, G. F.; Carvajal, H. E. M.; Souza, N. M., 2018. Análise da Ameaça de Deslizamentos pelo Uso de Abordagem Probabilística Aplicada a um Modelo de Estabilidade de Taludes Tridimensional. *Revista Geociências* 37, 655-668.
- Bartolomei, F. R., Ribeiro, J. G. M., Reboita, M. S., 2023. Eventos Extremos de Precipitação no Sudeste do Brasil: Verão 2021/2022. *Revista Brasileira de Geografia Física* 16, 2658-2676.
- Baum, R.L., Savage, W.Z., and Godt, J.W., 2008, TRIGRS—A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis, version 2.0: U.S. Geological Survey Open-File Report, 2008-1159, 75 p.
- Basu, T., Pal, I., 2023. Landslide susceptibility and risk assessment: a comprehensive review of methods and applications. *Earth Sci. Rev.* 237, 104331.
- Botero, E.M.; Azevedo, G.F.; Carvajal, H.E.M.; Batista, P.H.L.; Souza de, N.M., 2014. Avaliação de perigo de deslizamentos deflagrados por chuvas pelo uso de métodos probabilísticos. *Xiv Congreso Colombiano De Geotecnia & IV Congreso Suramericano De Ingenieros Jóvenes Geotécnicos* [online]. Disponível: https://www.researchgate.net/profile/Eduardo-Montoya-Botero/publication/292146260_Hazard_assessment_of_landslides_triggered_by_rains_by_the_use_of_probabilistic_methods/links/56aa618b08aed5a01358974e/Hazard-assessment-of-landslides-triggered-by-rains-by-the-use-of-probabilistic-methods.pdf. Acesso: 21 de jan. 2026.
- Dykes, A.P., 2002. Weathering-limited rainfall-triggered shallow mass movements in undisturbed steepland tropical rainforest. *Geomorphology* [online] 46. Disponível: [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00055-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00055-7). Acesso: 21 de jan. 2026.

- Fang, Z., Wang, Y., Peng, L., Hong, H., 2021. Integration of convolutional neural network and conventional machine learning classifiers for landslide susceptibility mapping. *Comput. Geosci* [online] 139. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2020.104470>. Acesso: 21 de jan. 2026.
- Fressard, M., Olivier, M., Thiery, Y., Davidson, R., and Lissak, C., 2016. Multi-method characterisation of an active landslide: Case study in the Pays d'Auge plateau. *Geomorphology* [online] 270, Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.07.001>. Acesso: 21 de jan. 2026.
- Gu, T., Li, J., Wang, M., Duan, P., 2022. Landslide susceptibility assessment in Zhenxiong County of China based on geographically weighted logistic regression model. *Geocarto Int.* [online] 37. Disponível: <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1903571>, 2022. Acesso: 21 de jan. 2026.
- Hermelin, M., Mejía, O., Velásquez, E., 1992. Erosional and depositional features produced by a convulsive event, San Carlos, Colombia, September 21, 1990. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 45, 89-95.
- Hürlimann M, Rickenmann D, Medina V, Bateman A., 2008. Evaluation of approaches to calculate debris flow parameters for hazard assessment. *Engineering Geology* [online] 102. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.012>. Acesso: 21 de jan. 2026.
- IGAC. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2007. Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Antioquia. Bogotá, Colombia.
- Inversion, R. M., 2020. Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research* 36, 1897-1910.
- Khan, P., Sharma, N., 2022. Hybrid machine learning approach for landslide prediction, Uttarakhand, India. *Sci. Rep* [online] 12. Disponível: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22814-9>. Acesso: 21 de jan. 2026.
- Mejía, R.; Velásquez, M., 1991. Procesos y depósitos asociados al aguacero de septiembre 21 de 1990 en el Área de San Carlos (Antioquia), Undergraduate thesis, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Montgomery, D. R.; Dietrich, W. E., 1994. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research* 30, 1153-1171.
- Montrasio, L.; Valentino, R., 2008. A model for triggering mechanisms of shallow landslides. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci* [online] 8. Disponível em: <https://nhess.copernicus.org/articles/8/1149/2008/>, 2008. Acesso: 21 de jan. 2026.
- Moroz, C. B., Thieken, A. H., 2024. Urban growth and spatial segregation increase disaster risk: lessons learned from the 2023 disaster on the North Coast of São Paulo, Brazil. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 24, 3299–3314.
- Neves, M.V., Garcês, T.I.C., Azevedo, G.F., Bazán, F.A.V., Queiroz, P.C.O.de., Barreira, R.W.M., Batalha, L. F.P. de., 2025. Análise de estabilidade de taludes usando uma abordagem probabilística. *Revista de Geociências do Nordeste* [online] 11. Disponível: <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2025v11n1ID35122>. Acesso: 21 de jan. 2026.
- Newman, R.; Noy, I., 2023 The global costs of extreme weather that are attributable to climate change. *Nature Communications* [online] 14. Disponível: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41888-1>. Acesso: 21 de jan. 2026.
- O'Callaghan, J.F.; Mark, D.M., 1984. The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing* [online] 28. Disponível: [https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(84\)80011-0](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(84)80011-0). Acesso: 21 de jan. 2026.
- Oliveira, G.G.; Guasselli, L.A.; Quevedo, R.P.; Ruiz, L.F.C.; Bressani, L.A.; Riffel, E.S., 2019. Modelagem de áreas suscetíveis a movimentos de massa: avaliação comparativa de técnicas de amostragem, aprendizado de máquina e modelos digitais de elevação. *Pesquisas em Geociências* 38, 781 - 795.
- Petrucci, E. & Azevedo, L. M. de., 2023. Análise dos eventos extremos de precipitação máxima no município de Cachoeira do Sul/RS, de 1987 a 2020. *Revista de Geografia* 40, 258-281. Várzea Paulista (SP) utilizando os sistemas de informação geográfica. *Geociências* 32, 81-92.

- Várzea Paulista (SP) utilizando os sistemas de informação geográfica. *Geociências* 32, 81-92.
- Venancio, A. S.; Pancher A. M.; Cunha C. M. L.; Machado F. B.; Soares Junior A. V., 2013. Avaliação da suscetibilidade a movimentos de massa no município de Várzea Paulista (SP) utilizando os sistemas de informação geográfica. *Geociências* 32, 81-92.
- Vieira, B. C.; Fernandes, N. F., 2004. Landslide susceptibility analysis using GIS in southeastern Brazil. *Geomorphology* 59, 167–181.
- Scheidl, C.; Rickenmann, D., 2010. Empirical prediction of debris-flow mobility and deposition on fans. *Revista Earth Surface Processes and Landforms* 35, 157–173.
- Wilkinson, P. L.; Anderson, M. G.; Llyod, D. M., 2022. An integrated hydrological model for rain-induced landslide prediction. *Earth Surface Processes and Landforms* [online] 27. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/esp.409>. Acesso: 21 de jan. 2026..
- Yao, X., Chen, X., Liu, C., 2021. High-resolution DTM-based landslide identification using machine learning and deep learning methods. *Geosci. Front* [online] 12. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.03.005>. Acesso: 21 de jan. 2026.