



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

PEDRO MIGUEL AZOUBEL GOULART COELHO

ANÁLISE PROBABILÍSTICA APLICADA EM ESTABILIDADE DE TALUDES

São Luís - MA

2026

PEDRO MIGUEL AZOUBEL GOULART COELHO

ANÁLISE PROBABILÍSTICA APLICADA EM ESTABILIDADE DE TALUDES

Trabalho de Conclusão de Curso II
apresentado ao Curso de Engenharia
Civil da Universidade Federal do
Maranhão, com requisito com requisito
para obtenção de 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

Azoubel Goulart Coelho, Pedro Miguel.

Análise Probabilística Aplicada em Estabilidade de
Taludes / Pedro Miguel Azoubel Goulart Coelho. - 2026.
28 p.

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

1. Movimentos de Massa. 2. Suscetibilidade. 3. FOSM.
4. FORM. 5. Sistemas de Informação Geográfica. I.
Fernandes Azevedo, George. II. Título.

PEDRO MIGUEL AZOUBEL GOULART COELHO

ANÁLISE PROBABILÍSTICA APLICADA EM ESTABILIDADE DE TALUDES

Trabalho de Conclusão de Curso II
apresentado ao Curso de Engenharia
Civil da Universidade Federal do
Maranhão, com requisito com requisito
para obtenção de grau de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. George Fernandes
Azevedo.

Apresentado em 15 de julho de 2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. George Fernandes Azevedo (UFMA)

Prof^a Dr.^a Ana Beatriz Pereira Segadilha dos Santos

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

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	7
METODOLOGIA.....	9
Área de estudo e organização de dados espaciais.....	9
Descrição Dos Métodos Probabilísticos De Confiabilidade.....	14
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	18
CONCLUSÃO.....	25
REFERÊNCIAS	26

Análise Probabilística Aplicada em Estabilidade de Taludes

Applied Probabilistic Analysis of Slope Instability

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

Pedro Miguel Azoubel Goulart Coelho

Universidade Federal do Maranhão, Brasil

ORCID ID:

E-mail: pedromiguelazoubel@gmail.com

George Fernandes Azevedo

Universidade Federal do Maranhão, Brasil

ORCID ID:

E-mail: gf.azevedo@ufma.br

RESUMO

Os movimentos de massa representam importantes processos naturais associados a danos ambientais e riscos à população. Este estudo avaliou a suscetibilidade a movimentos de massa na Região Administrativa de Ceilândia, Distrito Federal, por meio dos métodos probabilísticos First Order Second Moment (FOSM) e First Order Reliability Method (FORM), integrados a técnicas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). A análise baseou-se no modelo de talude infinito, considerando a variabilidade dos parâmetros geotécnicos do solo. Os resultados demonstraram que há concordância qualitativa entre os métodos, com a maior parte da área de estudo apresentando baixa probabilidade de ruptura, enquanto as maiores suscetibilidades ocorreram em setores com declividades superiores a 20°. A integração entre métodos probabilísticos e geoprocessamento mostrou-se eficiente para o mapeamento da suscetibilidade, fornecendo subsídios ao planejamento urbano e à gestão preventiva de áreas sujeitas à instabilidade.

Palavras-chave: Movimentos de massa; Suscetibilidade; FOSM; FORM; Sistemas de Informação Geográfica.

ABSTRACT

Mass movements represent significant natural processes associated with environmental damage and risks to the population. This study evaluated mass movement susceptibility in the Ceilândia Administrative Region, Federal District, using the First Order Second Moment (FOSM) and First Order Reliability Method (FORM) probabilistic methods, integrated with Geographic Information System (GIS) techniques. The analysis was based on the infinite slope model, accounting for the variability of soil geotechnical parameters. The results showed qualitative agreement between the methods, with most of the study area exhibiting a low probability of failure, while the highest susceptibility levels occurred in sectors with slopes exceeding 20°. The integration of probabilistic methods and geoprocessing proved efficient for susceptibility mapping, providing valuable input for urban planning and the preventive management of areas prone to instability.

Keywords: Mass movements; Susceptibility; FOSM; FORM; Geographic Information Systems.

INTRODUÇÃO

Os movimentos de massa constituem um dos processos geomorfológicos de maior impacto sobre as áreas urbanizadas, sendo responsáveis por expressivos prejuízos econômicos, danos à infraestrutura e perdas de vidas humanas em diversas regiões do mundo (Casagli et al., 2023). Esses fenômenos resultam da ruptura e do deslocamento de materiais ao longo das encostas, podendo ser desencadeados pela atuação isolada ou combinada de fatores naturais e antrópicos, como precipitações intensas, características geológicas e geotécnicas desfavoráveis, alterações na cobertura vegetal e ocupação inadequada do terreno (SGB, 2024). Em áreas urbanas, o crescimento desordenado e a expansão da ocupação sobre terrenos naturalmente instáveis aumentam significativamente a exposição da população aos riscos associados aos deslizamentos, reforçando a necessidade de estudos voltados à avaliação da suscetibilidade, ao movimento e à gestão de riscos geológicos (Singh et al., 2024)

No Brasil, os movimentos de massa representam um dos principais desastres naturais registrados anualmente, especialmente em regiões caracterizadas por relevo acidentado e elevada concentração populacional. Eventos extremos de precipitação, aliados à ocupação de encostas sem planejamento adequado, favorecem a ocorrência de deslizamentos que são capazes de provocar danos humanos e materiais de grande magnitude. Diante desse cenário, o conhecimento dos fatores condicionantes desses processos tornou-se essencial para o planejamento territorial, o gerenciamento de riscos e implementação de medidas preventivas voltadas à redução da vulnerabilidade das áreas ocupadas. (Brasil, 2007; Tominaga, Santoro e Amaral, 2015).

Entre as metodologias empregadas na avaliação da suscetibilidade a movimentos de massa, destacam-se os modelos físicos de estabilidade de taludes integrados aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Essa integração possibilita a representação espacial dos fatores condicionantes da instabilidade, permitindo identificar áreas com diferentes níveis de suscetibilidade e subsidiar ações de planejamento urbano e gestão de riscos, como apresentado nos trabalhos de Cruz et al. (2023), Beserra e Azevedo (2024) e Batalha e Azevedo (2026). O modelo de talude infinito é amplamente utilizado na análise de escorregamentos rasos por representar, de forma simplificada, o equilíbrio entre as forças resistentes e as forças atuantes no maciço, utilizando parâmetros

geotécnicos, topográficos e hidrológicos para a determinação do fator de segurança (Guidicini e Nieble, 1984; Fiori e Carmignani, 2015).

Embora o fator de segurança seja amplamente empregado na avaliação da estabilidade de encostas, sua determinação por métodos determinísticos baseia-se na adoção de valores únicos para os parâmetros geotécnicos, desconsiderando a variabilidade natural desses materiais. Propriedades como coesão, ângulo de atrito efetivo e peso específico apresentam dispersão decorrente da heterogeneidade dos solos e das limitações inerentes aos processos de amostragem e caracterização geotécnica. Dessa forma, análises fundamentadas exclusivamente em valores médios podem não representar adequadamente o comportamento real das encostas, conduzindo a estimativas excessivamente conservadoras ou insuficientes quanto à segurança (Melchers, 2002; Montoya e Assis, 2011).

Nesse cenário, os métodos probabilísticos têm sido incorporados às análises de estabilidade por permitirem considerar explicitamente as incertezas associadas aos parâmetros de entrada. Entre as metodologias mais utilizadas destacam-se os métodos *First Order Second Moment* (FOSM) e *First Order Reliability Method* (FORM), que possibilitam estimar a probabilidade de ruptura a partir da variabilidade estatística dos parâmetros geotécnicos. Em comparação com as análises determinísticas convencionais, essas abordagens fornecem uma avaliação mais realista do comportamento das encostas, constituindo importantes ferramenta para estudos de suscetibilidade e gerenciamento de riscos geológicos (Przewłócki, 2021; Jiang et al., 2022).

No Distrito Federal, a expansão urbana ocorrida nas últimas décadas promoveu a ocupação de áreas com diferentes características geomorfológicas e geotécnicas, aumentando a necessidade de estudos voltados à avaliação da estabilidade de encostas. Na Região Administrativa de Ceilândia, embora predomine relevo plano a suavemente ondulado, existem setores associados aos fundos de vale e às redes de drenagem que apresentam maiores declividades e, conseqüentemente, maior potencial para o desenvolvimento de processos de instabilidade. (Casagli et al, 2023). A identificação dessas áreas torna-se relevante para subsidiar ações de planejamento urbano, ocupação do solo e gestão preventiva de riscos.

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a suscetibilidade a movimentos de massa na Região Administrativa de Ceilândia, Distrito Federal, por meio da aplicação dos métodos probabilísticos FOSM e FORM integrados a técnicas de geoprocessamento. Busca-se comparar o desempenho dessas metodologias na estimativa da probabilidade de ruptura das encostas e contribuir para a produção de informações que possam subsidiar o planejamento territorial e a gestão de áreas suscetíveis a movimentos de massa.

METODOLOGIA

Área de estudo e organização de dados espaciais

A metodologia adotada nesta pesquisa fundamenta-se na aplicação de métodos probabilísticos voltados à análise de estabilidade de encostas, bem como na organização dos dados ambientais necessários para a realização das análises. Para isso, foi desenvolvida uma abordagem integrada capaz de combinar informações ambientais espacializadas, obtidas por meio de um Sistema de Informação Geográfica (SIG), com uma ferramenta computacional destinada à execução dos procedimentos probabilísticos utilizados na estimativa da probabilidade de ruptura (PR).

Para a determinação da probabilidade de ruptura, foram utilizados os métodos probabilísticos FOSM (*First Order Second Moment*) e FORM (*First Order Reliability Method*), os quais foram aplicados em conjunto com uma função de desempenho representativa das condições de estabilidade dos taludes. A utilização desses métodos permitiu incorporar as incertezas associadas aos parâmetros geotécnicos do terreno, fornecendo uma avaliação mais realista do comportamento das encostas em comparação às análises determinísticas convencionais.

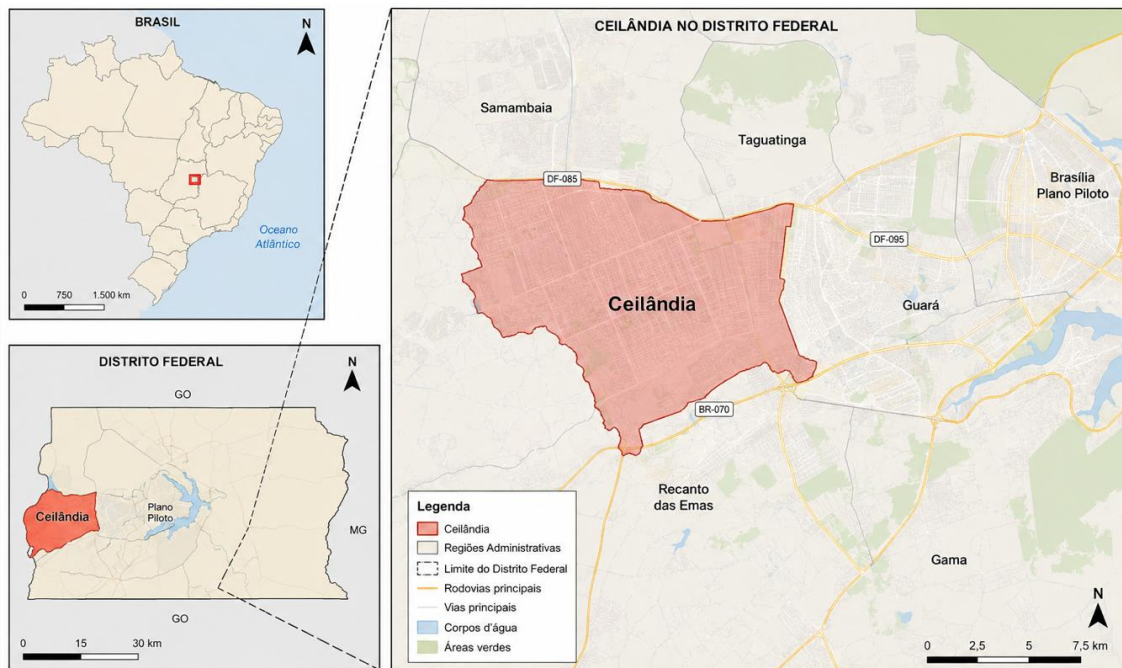
Para a avaliação da estabilidade das encostas, adotou-se uma função de desempenho responsável pela determinação do fator de segurança (FS), representado como a variável dependente do modelo. O cálculo desse parâmetro foi realizado com base no modelo de talude infinito aplicado a solos homogêneos, considerando a análise das condições de equilíbrio a partir das tensões efetivas atuantes no maciço (Azevedo, Carvajal e Souza, 2018). A Equação 1 representa o modelo de estabilidade aqui empregado:

$$FS = \frac{c'}{\gamma \cdot H \cdot \text{sen} \alpha \cdot \text{cos} \alpha} + \frac{\tan \varphi'}{\tan \alpha} \quad (1)$$

Onde: c' , refere-se à coesão efetiva, em kPa; φ' representa o valor do ângulo de atrito efetivo do solo, em graus; γ relaciona-se ao peso específico do solo, em kN/m³; H é a profundidade do solo na superfície de ruptura potencial, em metros; α é a inclinação do talude, em graus.

A área de estudo selecionada para a elaboração desta pesquisa localiza-se no Distrito Federal, abrangendo prioritariamente a região administrativa de Ceilândia (Figura 1).

Figura 1: Mapa de Localização Ceilândia



Fonte: IBGE, 2022; CODEPLAN, 2023

Segundo a Companhia de Planejamento do Distrito Federal (CODEPLAN, 2018), sob o ponto de vista geomorfológico, a região Administrativa de Ceilândia insere-se no contexto do Planalto Central Brasileiro, caracterizado pelo predomínio de superfícies suavemente onduladas a onduladas, intercaladas por vales encaixados e cabeceiras de drenagem.

Embora grande parte da região apresente relevo relativamente plano, áreas localizadas nas proximidades dos cursos d'água possuem declividade mais acentuadas,

constituindo ambientes naturalmente mais suscetíveis ao desenvolvimento de processos erosivos e movimentos gravitacionais de massa. Essa suscetibilidade é intensificada pelas características do uso e ocupação do solo, uma vez que Ceilândia apresenta elevada densidade populacional e um contínuo processo de expansão urbana em direção às áreas periféricas. (CODEPLAN, 2018).

De acordo com a CODEPLAN (2018), diversos setores da região observa-se a ocupação de áreas próximas a fundos de vale e encostas, frequentemente acompanhada da remoção da cobertura vegetal, da impermeabilização do solo e da execução de cortes e aterros sem critérios geotécnicos adequados. Essas intervenções modificam significativamente as condições naturais de estabilidade das encostas, favorecendo a ocorrência de movimentos de massa, sobretudo durante eventos de precipitação intensa.

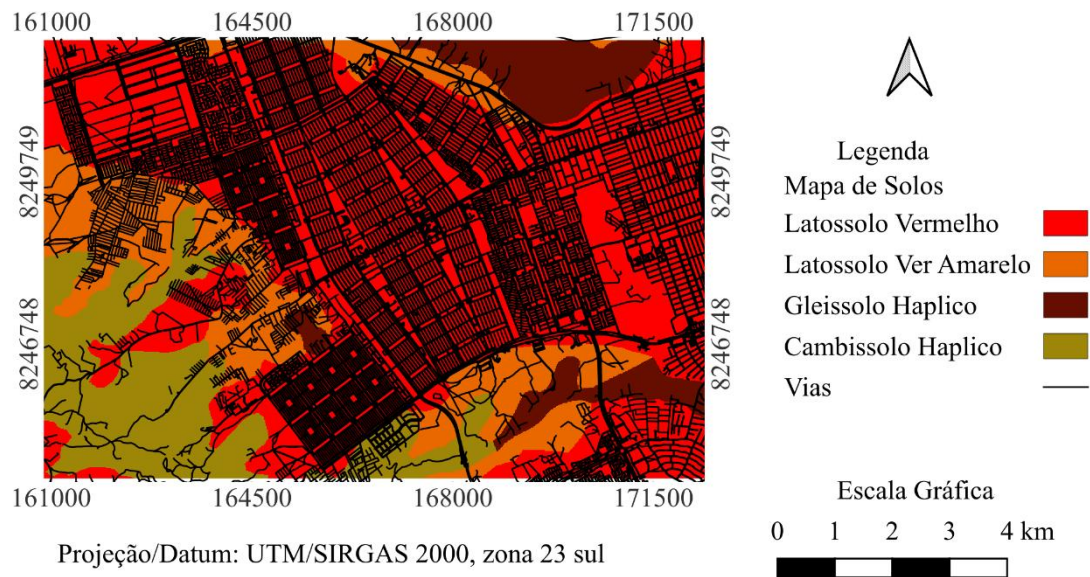
Para a estruturação das informações espaciais da área citada, essenciais para a efetivação das análises, fez-se uso da plataforma computacional de sistemas de informação geográfica denominada SPRING versão 5.5 (Camâra, et al., 1996). Neste software, foram criados inicialmente, um banco de dados e um projeto, específicos para o presente trabalho. As principais características relacionadas a este projeto encontram-se listadas a seguir:

- Projeção e datum utilizados: UTM/SIRGAS 2000, zona 23 sul;
- Retângulo envolvente em coordenadas: X1 = 159.000 m; Y1 = 8.244.395 m; X2 = 172.812 m; Y2 = 8.252.045 m.
- Escalas para os planos de informação: 1/2000;

Ressalta-se, ainda, que os planos de informação usados apresentaram pixels com resolução espacial de 15 m x 15 m. Desta forma, a área avaliada ficou representada por planos de informação em formato matricial compostos por 510 linhas e 907 colunas.

A carta de solos incorporada à presente pesquisa tem como fonte o trabalho de atualização do mapa pedológico digital para o Distrito Federal empreendido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) (Reatto et al. 2004). A partir desta carta, observou-se a presença de quatro tipos pedológicos constituindo a região de estudo conforme explicitado pela Figura 2.

Figura 2: Carta pedológica para a área de estudo



Fonte: Autores (2026)

Os dados topográficos utilizados nesta pesquisa são referentes à Companhia Imobiliária de Brasília (TERRACAP), consistindo no modelo numérico do terreno representativo da área de estudo. O modelo apresenta resolução espacial de 15 m, o que significa que cada célula da grade numérica representa uma área de 15 x 15 metros na superfície terrestre. Essa resolução é considerada adequada para estudos de suscetibilidade a movimentos de massa em escala regional, pois possibilita representar satisfatoriamente as principais variações do relevo e das feições topográficas que influenciam a estabilidade das encostas.

Considerando o plano de informação referente ao relevo como input, utilizou-se a ferramenta própria presente no ambiente SPRING para a geração da matriz de declividade da área de estudo. Esse procedimento consistiu no cálculo da inclinação do terreno para cada célula do modelo numérico, resultando em uma grade numérica contendo os valores de declividade distribuídos espacialmente por toda a região analisada.

A matriz de declividade constituiu um dos principais parâmetros de entrada do modelo de estabilidade de taludes, uma vez que a inclinação da encosta exerce influência direta sobre a distribuição das tensões atuantes no maciço e, conseqüentemente, sobre o fator de segurança. Dessa forma, os valores de declividade obtidos no SPRING foram

incorporados às análises probabilísticas, permitindo a avaliação espacial da estabilidade das encostas e da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de massa.

A caracterização geotécnica dos diferentes tipos de solo presentes na área de estudo foi realizada por meio da atribuição de parâmetros de resistência e espessura obtidos na literatura especializada. Os valores referentes à coesão efetiva e ao ângulo de atrito efetivo foram definidos com base no estudo desenvolvido por Azevedo, Carvajal e Souza (2018), que apresenta uma compilação de propriedades geotécnicas para diversas unidades pedológicas do Distrito Federal, considerando suas características textuais e classificações taxonômicas.

Com base nessas informações, foi realizada a associação entre as classes pedológicas identificadas na área de estudo e os respectivos parâmetros geotécnicos apresentados. Essa etapa possibilitou a atribuição dos valores representativos de coesão efetiva, ângulo de atrito efetivo e espessura para cada unidade de solo, fornecendo os parâmetros necessários para a execução das análises de estabilidade das encostas.

Com o apoio de uma rotina desenvolvida na linguagem LEGAL integrada ao software Spring 5.5.6, realizou-se a reclassificação do mapa pedológico a partir dos parâmetros geotécnicos previamente definidos para cada classe de solo. Esse procedimento possibilitou a conversão das informações temáticas em grades numéricas, permitindo representar espacialmente a distribuição das propriedades dos solos em toda a área de estudo.

Em relação ao peso específico dos materiais, adotou-se a mesma premissa utilizada por Azevedo, Carvajal e Souza (2018), considerando um valor de 15 kN/m³ para todas as classes pedológicas, com exceção para a classe gleissolo háplico que tem seu valor de 12 kN/m³. A partir da reclassificação efetuada e da atribuição dos parâmetros geotécnicos correspondentes, foram obtidas as informações necessárias para a caracterização espacial dos solos e para a execução das análises de estabilidade com natureza probabilística. Os valores de resistência adotados para cada unidade pedológica encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1: Tipos pedológicos presentes na área de estudo classificados

Pedologia	Características do solo			
	c' (kPa)	φ' (°)	H (m)	γ_i (kPa)
<i>Cambissolo Háplico</i>	5	25	0,7	15
<i>Gleissolo Háptico</i>	20	10	4	12
<i>Latossolo Vermelho</i>	10	20	3	15
<i>Latossolo Vermelho Amarelo</i>	10	20	3	15

Fonte: Modificado de Azevedo, Carvajal e Sousa (2018)

De posse da quantificação das características para a região em avaliação expressas sob a forma de matrizes, executou-se a consequente incorporação destas informações ao MATLAB, capaz de realizar os cálculos necessários para a efetivação das probabilidades de ruptura para cada um dos pixels pertencentes à área de estudo.

Nos métodos probabilísticos empregados, a coesão efetiva e o ângulo de atrito efetivo foram considerados como variáveis aleatórias de entrada do modelo de estabilidade. As distribuições estatísticas atribuídas a essas variáveis foram definidas de acordo com as premissas de cada método probabilístico e são apresentadas subseções seguintes.

Os valores de coeficiente de variação (CV) adotados são aqueles sugeridos na literatura técnica. Para o ângulo de atrito efetivo, foi considerado um coeficiente de variação de 10%, conforme adotado por Neves et al. (2025). Para a coesão efetiva utilizou-se um coeficiente de variação de 40%, em conformidade com os valores apresentados por Tonus (2009). O desvio padrão de uma dada variável (σ_i) é definido a partir do seu coeficiente de variação e do seu valor médio ($\bar{X}_i$), conforme Equação 2:

$$\sigma_i = \frac{CV_i \cdot \bar{X}_i}{100} \quad (2)$$

Descrição dos métodos probabilísticos de confiabilidade

A análise de estabilidade tradicional resulta em um único valor de fator de segurança, que pode ser insuficiente diante da variabilidade dos solos. Para superar essa limitação, utiliza-se a análise de confiabilidade, a qual é obtida pela aplicação dos métodos probabilísticos. Rotinas computacionais foram desenvolvidas no MATLAB para realização dos cálculos associados aos métodos probabilísticos. Como resultado, matrizes de probabilidade de ruptura foram geradas com a mesma resolução dos dados de entrada

ambientais. As matrizes foram incorporadas para o SPRING, onde houve sua classificação em intervalos de probabilidade de falha, resultando nos cenários temáticos de susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos. Por meio do SPRING, também procedeu-se a medida da área das classes de susceptibilidade, assim como a confrontação entre os cenários de probabilidade de ruptura. A apresentação final dos mapas foi realizada com o auxílio do software QGIS.

Método FOSM

O método FOSM (*First Order Second Moment*) utiliza o truncamento da expansão em série de Taylor de primeira ordem da função de desempenho para estimar a estabilidade de uma encosta de forma probabilística. Para a aplicação do método, assumiu-se que a coesão efetiva, o ângulo de atrito efetivo e o fator de segurança seguem distribuição estatísticas normais, conforme as premissas clássicas do método. Essas hipóteses permitem a propagação das incertezas das variáveis de entrada para a estimativa da média e da variância do fator de segurança. Os passos para a aplicação deste método encontram-se a seguir:

O valor esperado (ou médio) do fator de segurança é obtido aplicando-se os valores médio das variáveis independentes na função de desempenho (no caso, o modelo de talude infinito):

$$\mu_{FS} = FS(\bar{c}', \bar{\varphi}', \bar{H}, \bar{\beta}, \bar{\gamma}) \quad (3)$$

Onde $\bar{c}', \bar{\varphi}', \bar{H}, \bar{\beta}, \bar{\gamma}$ representam as médias da coesão, do ângulo de atrito, espessura, declividade e peso específico do solo, respectivamente.

Assumindo que as variáveis aleatórias são estatisticamente independentes, a variância do FS é calculada pela soma do produto das variâncias de cada parâmetro pelo quadrado de sua respectiva derivada parcial:

$$V[FS] = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial FS}{\partial X_i} \right)^2 V(X_i) \quad (4)$$

Onde X_i está ligado a cada um dos dois parâmetros utilizados com características estatísticas e n refere-se à quantidade de variáveis independentes consideradas estatísticas. As derivadas da função de desempenho, que estão incluídas no cálculo da

variância, foram definidas pelo incremento do FS considerando-se a adoção de um incremento ∂X_i que representa 10% do valor médio das variáveis adotadas como aleatórias. O desvio-padrão do fator de segurança (σ_{FS}) para uma célula específica é definido pelo cálculo da raiz quadrada $V[FS]$.

Após a execução das análises, foram geradas matrizes específicas para o armazenamento dos resultados obtidos. Essas matrizes mantiveram a mesma resolução espacial dos planos de informação previamente elaborados para representar os dados de entrada, de modo que cada célula correspondia a uma porção específica da área de estudo. Desta forma, para cada posição de matriz, foram registrados os valores médios e os respectivos desvios-padrão do fator de segurança, possibilitando a associação de uma distribuição probabilística normal a cada elemento espacial analisado. A partir dessas distribuições, tornou-se possível estimar a probabilidade de ruptura dos taludes ao longo de toda a área investigada.

De acordo com Montoya e Assis (2011), a probabilidade de ruptura corresponde à probabilidade de que o fator de segurança assumia valores inferiores à unidade, condição que caracteriza a ocorrência da falha do sistema geotécnico. Em termos probabilísticos, essa grandeza é representada pela área sob a curva da função densidade de probabilidade do fator de segurança compreendida à esquerda do valor crítico igual a 1. Dessa forma, quanto maior a parcela da distribuição localizada abaixo desse limite, maior será a probabilidade de ruptura e, conseqüentemente, menor será a confiabilidade da encosta.

Assim, para quantificar a probabilidade de ruptura, utiliza-se o índice de confiabilidade β . Este índice indica a distância, em termos de desvios-padrão, entre o fator de segurança médio e o valor crítico de ruptura ($FS = 1,0$), conforme a Equação 5:

$$\beta = \frac{\mu_{FS} - 1}{\sigma_{FS}} \quad (5)$$

Assumindo uma distribuição normal, a probabilidade de falha é dada pela função de distribuição cumulativa da normal padrão:

$$PR = \Phi(-\beta) \quad (6)$$

Onde Φ representa a distribuição acumulada normal padrão. Se o índice β for negativo, isso indica que mais de 50% da curva de probabilidade está na zona de instabilidade ($FS < 1$).

Método FORM

Enquanto o FOSM utiliza os valores médios das variáveis, o FORM busca o Ponto de Projeto (*Design Point*), que é o ponto de falha mais provável sobre a superfície de estado limite. Para a aplicação do método, adotou-se uma distribuição lognormal para a coesão efetiva, considerando que essa variável assume apenas valores positivos e apresenta comportamento estatístico compatível com esse tipo de distribuição. O ângulo de atrito efetivo foi modelado por uma distribuição normal, mantendo-se a representação estatística adotada para essa variável na análise probabilística, define-se a função de desempenho (ou estado limite) baseada no fator de segurança:

$$g(X) = FS(X) - 1 \quad (7)$$

Onde $\mathbf{X}$ é o vetor das variáveis independentes aleatórias (neste caso, a coesão e o ângulo de atrito). Se $g(\mathbf{X}) \leq 0$, ocorre a ruptura.

As variáveis aleatórias originais (X_i) são transformadas em variáveis normais padronizadas (U_i), com média 0 e desvio padrão 1:

$$U_i = \frac{X_i - \mu_i}{\sigma_i} \quad (8)$$

Se as variáveis não forem normais, como o caso da coesão, a qual foi modelada por uma distribuição lognormal, utiliza-se a transformação de Rosenblatt ou aproximações de “normal equivalente”.

O índice β é definido como a distância mínima da origem do espaço U até a superfície de falha $g(\mathbf{U}) = 0$:

$$\beta = \min \sqrt{\sum u_i^2} \text{ sujeito a } g(u) = 0 \quad (9)$$

Este cálculo é geralmente iterativo (usando algoritmos como o de Rackwitz-Fiessler) para encontrar o ponto U^* (ponto de projeto)

No ponto de projeto, calculam-se os índices de sensibilidade (ou cossenos diretores), que indicam a contribuição de cada variável para a incerteza total, conforme Equação 10 :

$$\alpha_i = \frac{-\frac{\partial g}{\partial u_i}}{\sqrt{\sum \left(\frac{\partial g}{\partial u_j}\right)^2}} \quad (10)$$

Estes valores são análogos à análise de sensibilidade feita no FOSM para verificar qual parâmetro mais influencia a variância do FS.

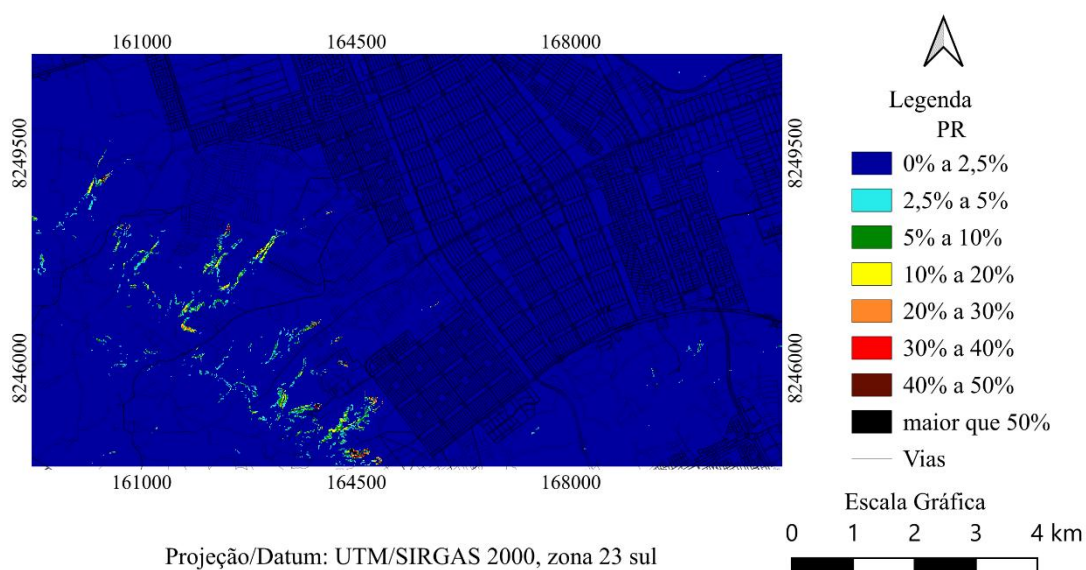
A probabilidade é estimada pela mesma função de distribuição cumulativa da normal padrão utilizada no FOSM:

$$PR = \Phi(-\beta) \quad (11)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

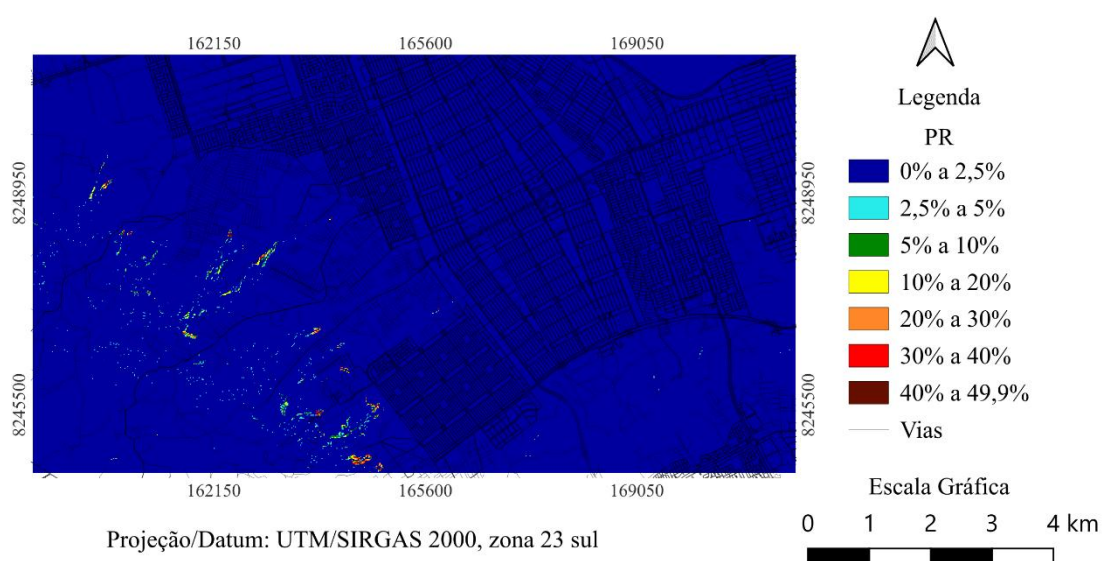
Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação dos métodos probabilísticos FOSM e FORM na avaliação da suscetibilidade a movimentos de massa na área de estudo. As Figuras 2 e 3 apresentam a distribuição espacial da probabilidade de ruptura (PR) estimada por cada método, permitindo identificar os setores com diferentes níveis de suscetibilidade.

Figura 3: Carta de probabilidade de ruptura segundo FOSM



Fonte: Autores (2026)

Figura 4: Carta de probabilidade de ruptura segundo FORM



Fonte: Autores (2026)

As probabilidades de ruptura foram agrupadas em classes para facilitar a interpretação dos resultados. No método FOSM foram definidas oito classes de probabilidade, enquanto no método FORM foram estabelecidas sete classes, uma vez que este último não apresentou valores superiores a 50% de probabilidade de ruptura. Para as faixas comuns aos dois métodos, adotaram-se os mesmos intervalos de classificação,

permitindo a comparação direta entre os resultados. Em ambos os métodos, verificou-se predominância das classes de menor probabilidade de ruptura em praticamente toda a área de estudo. Por outro lado, os setores classificados com maiores probabilidades concentram-se na porção sudoeste de Ceilândia, onde se localizam as principais drenagens naturais e as áreas de relevo mais movimentado. Nesses locais, as maiores declividades favorecem o aumento das tensões atuantes nas encostas, refletindo em valores mais elevados de probabilidade de ruptura.

A Tabela 2 apresenta a distribuição das áreas classificadas segundo a probabilidade de ruptura obtida pelo método FOSM, indicando a área ocupada por cada classe e sua participação percentual em relação à área total estudada.

Tabela 2: Classificação da área de estudo em função da probabilidade de ruptura obtida pelo FOSM

Categorias de PR	Área classificadas	
	km ²	Porcentagem
0% a 2,5%	103,202	99,16%
2,5% a 5%	0,415	0,40%
5% a 10%	0,274	0,26%
10% a 20%	0,121	0,12%
20% a 30%	0,017	0,02%
30% a 40%	0,014	0,01%
40% a 50%	0,011	0,01%
Maior que 50%	0,024	0,02%

Fonte: Autores (2026)

Conforme apresentado na Tabela 2, aproximadamente 99,16% da área de estudo foi enquadrada na classe de menor probabilidade de ruptura, compreendida entre 0% a 2,5%. A classificação obtida pelo método FORM é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3: Classificação da área de estudo em função da probabilidade de ruptura obtida pelo FORM

Categorias de PR	Área classificadas	
	km ²	Porcentagem
0% a 2,5%	103,691	99,63%
2,5% a 5%	0,180	0,17%
5% a 10%	0,088	0,08%
10% a 20%	0,059	0,06%
20% a 30%	0,019	0,02%
30% a 40%	0,021	0,02%
40% a 49,94%	0,020	0,02%

Fonte: Autores (2026)

Observa-se, na Tabela 3, que o método FORM também concentrou a maior parte da área na classe de menor probabilidade de ruptura. Diferente do FOSM, o FORM não identificou áreas com probabilidades de ruptura superiores a 50%, sendo o maior valor registrado correspondente à 49,94%.

Com o propósito de avaliar o grau de concordância entre os métodos probabilísticos empregados, realizou-se uma tabulação cruzada entre as classes de probabilidade de ruptura obtidas pelos métodos FOSM e FORM. Essa análise permite comparar a classificação atribuída por cada método a uma mesma célula da área de estudo, identificando coincidências e eventuais divergências na distribuição das categorias de suscetibilidade.

A Tabela 4 apresenta o cruzamento entre as classificações geradas pelos dois métodos, evidenciando a distribuição das áreas em função das combinações de probabilidade de ruptura estimadas. A partir dessa comparação, torna-se possível verificar a consistência dos resultados e avaliar a influência do método probabilístico adotado na classificação da suscetibilidade aos movimentos de massa.

Tabela 4 : Tabulação cruzada das classes de PR obtidas pelos métodos FOSM (linhas) e FORM (colunas), expressa em área (km²)

FORM\FOSM	0 a 2,5%	2,5 a 5%	5 a 10%	10 a 20%	20 a 30%	30 a 40%	40 a 50%	> 50%
0% a 2,5%	103,127	0,415	0,150	0	0	0	0	0
2,5% a 5%	0,073	0	0,107	0	0	0	0	0
5% a 10%	0,003	0	0,017	0,068	0	0	0	0
10% a 20%	0	0	0	0,053	0,001	0	0	0,005
20% a 30%	0	0	0	0	0,011	0	0	0,008
30% a 40%	0	0	0	0	0,005	0,005	0	0,010
40% a 49,94%	0	0	0	0	0	0,009	0,011	0

Fonte: Autores (2026)

De maneira geral, observa-se elevada compatibilidade entre os resultados, uma vez que a maior parte da área de estudo concentra-se na diagonal principal da matriz, indicando que os dois métodos atribuíram a mesma classe de probabilidade de ruptura para a maioria das células analisadas.

Destaca-se ainda que a maior parcela da área foi classificada na faixa de probabilidade de ruptura entre 0% a 2,5% por ambos os métodos, reforçando os resultados apresentados anteriormente. As diferenças tornam-se mais perceptíveis apenas nas classes de maior suscetibilidade, que representam uma pequena fração da área total analisada. Observa-se, ainda, que as áreas classificadas pelo método FOSM com probabilidade de ruptura superior a 50% foram redistribuídas pelo método FORM, predominando as faixas compreendidas entre 10% a 40% de probabilidade de ruptura. Esse comportamento indica que o método FORM tende a atribuir valores inferiores de probabilidade de ruptura para os setores mais críticos, quando comparado ao FOSM, embora mantenha a identificação das mesmas áreas como aquelas de maior suscetibilidade. Dessa forma, os resultados indicam que ambos os métodos apresentam elevada consistência na avaliação da suscetibilidade a movimentos de massa, produzindo classificações semelhantes para a maior parte da área de estudo.

Com o intuito de analisar a relação entre a declividade do terreno e a probabilidade de ruptura das encostas, realizou-se uma tabulação cruzada entre o plano de informação da inclinação e as classes de PR obtidas pelos métodos FOSM e FORM. Essa análise permite identificar a distribuição das áreas em função da conformação do relevo e

verificar a relação entre a variação da declividade e a quantificação da suscetibilidade à ocorrência de movimentos de massa.

As Tabelas 6 e 7 apresentam, respectivamente, os resultados do cruzamento entre as classes de declividade e as probabilidades de ruptura estimadas pelos métodos FOSM e FORM.

Tabela 5: Tabulação cruzada entre as classes de declividade e as classes de probabilidade de ruptura estimadas pelo método FOSM, expressa em área (km²).

FOSM\Declividade	0° a 5°	5° a 10°	10° a 15°	15° a 20°	20° a 30°	30° a 40°	> 40°
0% a 2,5%	85,9358	9,1755	3,3085	2,2193	2,4285	0,1248	0,0080
2,5% a 5%	0	0	0	0,0198	0,0372	0,3587	0,0004
5% a 10%	0	0	0	0,0059	0,0388	0,2029	0,0265
10% a 20%	0	0	0	0	0,0350	0,0007	0,0854
20% a 30%	0	0	0	0	0,0092	0,0070	0,0011
30% a 40%	0	0	0	0	0	0,0142	0
40% a 50%	0	0	0	0	0	0,0112	0
Maior que 50%	0	0	0	0	0	0,0191	0,0045

Fonte: Autores (2026)

A comparação entre essas informações possibilita avaliar o comportamento de cada método frente às diferentes condições topográficas da área de estudo, bem como identificar os intervalos de declividade que concentram as maiores probabilidades de ruptura. Observa-se que, para a faixa de probabilidade de falha entre 0% a 2,5%, há regiões classificadas em todas as categorias de declividade. Neste caso, existe uma predominância principalmente nas classes de declividade entre 0° a 5° (85,77%) e entre 5° a 10° (9,16%). Esse comportamento indica que as áreas de relevo suave apresentam elevada estabilidade, refletindo as condições topográficas que prevalecem na região estudada. As maiores probabilidades de ruptura estão associadas a inclinações superiores a 30°, indicando a influência da declividade no modelo usado para avaliar a estabilidade das encostas. Também se nota que regiões com declividades superiores a 40° foram definidas com valores de PR mais baixas, mostrando que o que interfere no nível de estabilidade, neste caso, são os fatores de espessura e resistência do solo.

Tabela 6: Tabulação cruzada entre as classes de declividade e as classes de probabilidade de ruptura estimadas pelo método FORM, expressa em área (km²).

FORM\Declividade	0° a 5°	5° a 10°	10° a 15°	15° a 20°	20° a 30°	30° a 40°	> 40°
0% a 2,5%	85,9423	9,1762	3,3088	2,2452	2,3967	0,6211	0,0004
2,5% a 5%	0	0	0	0	0,0965	0,0654	0,0182
5% a 10%	0	0	0	0	0,0241	0,0007	0,0629
10% a 20%	0	0	0	0	0,0223	0,0009	0,0363
20% a 30%	0	0	0	0	0,0092	0,0101	0
30% a 40%	0	0	0	0	0	0,0207	0
40% a 49,94%	0	0	0	0	0	0,0198	0

Fonte: Autores (2026)

Assim como observado para o método FOSM, a maior parte da área foi enquadrada na classe de probabilidade entre 0% a 2,5%, concentrando-se principalmente nas declividades inferiores a 10°. Esses resultados reforçam que as áreas de relevo plano apresentam reduzida suscetibilidade à ocorrência de movimentos de massa.

A comparação entre os resultados obtidos pelos métodos FOSM e FORM evidencia um comportamento semelhante quanto à influência da declividade sobre a probabilidade de ruptura. Em ambos os casos, as menores probabilidades concentram-se nas áreas com declividade inferiores a 10°, enquanto o aumento da inclinação do terreno está associado ao crescimento da suscetibilidade à instabilidade.

Os dois métodos indicam que as classes de maior probabilidade de ruptura estão concentradas, predominantemente, em áreas com declividades superiores a 20°, corroborando o entendimento de que a inclinação do relevo constitui um dos principais fatores condicionantes da estabilidade das encostas. Esse comportamento é compatível com os princípios do modelo de estabilidade de taludes infinito, uma vez que o aumento da declividade elava a componente tangencial do peso próprio do maciço, favorecendo a redução do fator de segurança e aumentando a probabilidade de ruptura. Embora ambos os métodos apresentem distribuição espacial semelhante das áreas mais suscetíveis, observou-se que o método FORM tende a estimar probabilidades de ruptura inferiores às obtidas pelo FOSM nos setores mais críticos. Essa diferença decorre das premissas adotadas por cada método para representar as incertezas dos parâmetros geotécnicos. Enquanto o FOSM considera a coesão efetiva com distribuição normal, permitindo a ocorrência de valores negativos durante a propagação das incertezas, o método FORM

adota uma distribuição lognormal para esse parâmetro, restringindo a valores fisicamente admissíveis. Como consequência, o FOSM tende a produzir estimativas mais elevadas de probabilidade de ruptura, apresentando resultados mais conservadores em relação ao FORM. Essa tendência é coerente com o comportamento observado por Neves et al. (2025), que verificaram que diferenças entre métodos probabilísticos decorrem principalmente da forma como a variabilidade estatística dos parâmetros geotécnicos é representada, embora a distribuição espacial das áreas críticas permaneça semelhante.

Apesar da elevada concordância entre os métodos, o método FOSM identificou uma parcela da área com probabilidade de ruptura superior a 50%, concentrada principalmente em setores com declividades acima de 30°, enquanto o método FORM limitou as estimativas à classe de PR entre 40% e 49,94%. A diferença torna-se mais evidente nas áreas com declividade superiores a 40°, onde o FOSM classificou uma porção significativa dos pixels na faixa de PR superior a 50%, ao passo que o FORM redistribuiu esses mesmos setores para classes inferiores de probabilidade. Esse comportamento evidencia que as divergências entre os métodos se concentram na magnitude das probabilidades estimadas, e não na identificação das áreas suscetíveis, uma vez que ambos reconheceram os mesmos setores de maior declividade como aqueles com maior potencial para a ocorrência de movimentos de massa.

CONCLUSÃO

A aplicação dos métodos probabilísticos FOSM e FORM permitiu avaliar a suscetibilidade a movimentos de massa na Região Administrativa de Ceilândia, incorporando as incertezas inerentes aos parâmetros geotécnicos empregados nas análises de estabilidade de encostas. Os resultados obtidos demonstraram que ambos os métodos apresentaram comportamento semelhante, produzindo estimativas consistentes da probabilidade de ruptura e permitindo identificar os setores com maior potencial de instabilidade.

As análises evidenciaram que a maior parte da área de estudo apresenta baixa probabilidade de ruptura, sendo enquadrada na classe entre 0% e 2,5%, correspondente a mais de 99% da área avaliada. Esse comportamento está relacionado, principalmente, ao predomínio de relevo plano na região, condição que favorece a estabilidade natural das encostas. Por outro lado, as classes com probabilidade de ruptura superior a 10%

representam aproximadamente 0,5% da área de estudo, concentrando-se em setores pontuais associados às maiores declividades e à proximidade das drenagens naturais. Em relação aos valores máximos estimados, o método FOSM identificou probabilidades de ruptura superior a 50%, enquanto o método FORM apresentou valor máximo de 49,94%, ambos restritos às áreas de relevo mais acidentado. Esses resultados evidenciam a forte influência da declividade na estabilidade dos taludes e demonstram que as áreas potencialmente instáveis se encontram espacialmente bem delimitadas em Ceilândia.

De maneira geral, ambos os métodos apresentaram resultados compatíveis, reforçando a confiabilidade das análises desenvolvidas. As principais diferenças foram observadas na magnitude das probabilidades de ruptura estimadas, uma vez que o método FORM apresentou, de forma sistemática, valores inferiores aos obtidos pelo FOSM, especialmente nas áreas de maior declividade. Apesar dessa diferença, os dois métodos reconheceram os mesmos setores como os mais suscetíveis à ocorrência de movimentos de massa. A avaliação da influência da declividade confirmou que o aumento da inclinação do terreno está diretamente relacionado ao crescimento da probabilidade de ruptura, evidenciando a importância desse parâmetro na estabilidade das encostas.

Dessa forma, conclui-se que a integração entre técnicas de geoprocessamento e métodos probabilísticos de análise de estabilidade se mostrou eficiente para a identificação das áreas potencialmente suscetíveis à ocorrência de movimentos de massa. Os produtos gerados constituem uma importante ferramenta de apoio ao planejamento de ocupação urbana, ao monitoramento de áreas críticas e à definição de medidas preventivas para redução dos impactos associados aos processos de instabilidade de encostas.

REFERÊNCIAS

AZEVEDO, G. F. A. A.; CARVAJAL, M. E.; SOUZA, N. M. **Análise de ameaça de deslizamentos pelo uso de abordagem probabilística aplicada a um modelo de estabilidade de taludes tridimensional.** Geociências, São Paulo, v. 37, n. 3, p. 655-669, 2018.

BATALHA, L. F. P.; AZEVEDO, G. F. **Análise comparativa entre os modelos 3D e 1D na estabilidade de taludes em Sobradinho II – Distrito Federal.** Revista Geonorte, Manaus, v. 17, n. 57, p. 1-28, 2026.

BESERRA, B. A.; AZEVEDO, G. F. **Avaliação da adequação geotécnica para fins de ocupação urbana do setor habitacional Sol Nascente – DF por meio de análise**

multicriterial. Revista Brasileira de Geografia Física, Recife, v. 17, n. 4, p. 2412-2434, 2024.

BRASIL. Ministério das Cidades; INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios.** Brasília: Ministério das Cidades; São Paulo: IPT, 2007.

CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J.; MITSUO, F. **SPRING: integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modeling.** Computers & Graphics, Oxford, v. 20, n. 3, p. 395-403, 1996.

CASAGLI, N.; INTRIERI, E.; TOFANI, V.; GIGLI, G.; RASPINI, F. **Landslide detection, monitoring and prediction with remote-sensing techniques.** Nature Reviews Earth & Environment, London, v. 4, n. 1, p. 51-64, 2023.

CODEPLAN (COMPANHIA DE PLANEJAMENTO DO DISTRITO FEDERAL). **Estudo urbano e ambiental: Ceilândia.** Brasília, DF: CODEPLAN, 2018.

CODEPLAN (COMPANHIA DE PLANEJAMENTO DO DISTRITO FEDERAL). **GeoPortal do Distrito Federal.** Brasília, DF: CODEPLAN, 2023.

CRUZ, A. M. A.; FERREIRA, D. V.; AZEVEDO, G. F.; BAZÁN, F. A. V.; BEZERRA, A. H. L.; QUEIROZ, P. C. O. **Uso de métodos probabilísticos na análise de estabilidade de taludes.** Revista EIA, Envigado, v. 20, n. 39, p. 1-26, 2023.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes.** Curitiba: Editora UFPR, 2015.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação.** São Paulo: Edgard Blücher, 1984.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). **Base Cartográfica Contínua do Brasil na escala 1:250.000 (BC250).** Rio de Janeiro: IBGE, 2022

JIANG, S. H.; HUANG, J.; GRIFFITHS, D. V.; DENG, Z. P. **Advances in reliability and risk analyses of slopes in spatially variable soils: a state-of-the-art review.** Computers and Geotechnics, v. 141, art. 104498, 2022.

MELCHERS, R. E. **Structural reliability analysis and prediction.** 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2002.

MONTOYA, C. A. H.; ASSIS, A. P. **Herramientas para análisis por confiabilidad en geotecnia: aplicación.** Revista Ingenierías Universidad de Medellín, Medellín, v. 10, n. 18, p. 79-86, 2011.

NEVES, M. V.; GARCÊS, T. I. C.; AZEVEDO, G. F.; BAZÁN, F. A. V.; QUEIROZ, P. C. O.; BARREIRA, R. W. M.; BATALHA, L. F. P. **Análise de estabilidade de taludes usando uma abordagem probabilística.** Revista de Geociências do Nordeste, v. 11, n. 1, p. 154-168, 2025.

PRZEWŁÓCKI, J. **Brief literature review and classification system of reliability methods for evaluating the stability of earth slopes.** Sustainability, Basel, v. 13, n. 16, art. 9090, 2021.

REATTO, A.; MARTINS, E. S.; FARIAS, M. F. R.; SILVA, A. V.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. C. **Mapa pedológico digital: SIG atualizado do Distrito Federal: escala 1:100.000 e uma síntese do texto explicativo.** 1. ed. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004.

SINGH, K.; BHARDWAJ, V.; SHARMA, A.; THAKUR, S. **A comprehensive review on landslide susceptibility zonation techniques.** Quaestiones Geographicae, Poznań, v. 43, n. 1, p. 79-91, 2024.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB). **Cartografia de perigo geológico.** Brasília, DF: Serviço Geológico do Brasil, 2024.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (Org.). **Desastres naturais: conhecer para prevenir.** 3. ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2015.

TONUS, B. P. A. **Estabilidade de taludes: avaliação dos métodos de equilíbrio limite aplicados a uma encosta coluvionar e residual da Serra do Mar paranaense.** 2009. 149 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.