

AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS A PARTIR DE UM MODELO DE BASE HEURÍSTICA APOIADO EM SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG)¹

Carlos de Oliveira Bispo ²
Fabrizio de Luiz Rosito Listo ³
Bárbara Gabrielly Silva Barbosa ⁴

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo avaliar a suscetibilidade a escorregamentos de terra na face leste da Chapada do Araripe, Nordeste do Brasil, por meio de um modelo heurístico baseado no Processo de Hierarquia Analítica (AHP) em um ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG). A área de estudo foi selecionada devido às suas características ambientais que promovem a ocorrência de escorregamentos de terra. Os níveis de suscetibilidade foram classificados em três categorias: baixo, médio e alto, com base no mapeamento de campo e na literatura especializada. O modelo AHP envolveu comparações de parâmetros como declividade, geologia, solos e pluviosidade, resultando em pesos normalizados que foram geoprocessados em ambiente SIG e por conseguinte resultou na carta de suscetibilidade. A capacidade preditiva do modelo foi validada usando a curva ROC, atingindo uma AUC de 0,748, indicando bom desempenho. Constata-se que o modelo AHP refletiu efetivamente as observações de campo, com vistas a melhorar a compreensão da dinâmica geoambiental da área estudada, recomenda-se a incorporação de parâmetros adicionais em análises futuras.

Palavras-chave: AHP, Geoprocessamento, Risco Geomorfológico.

INTRODUÇÃO

A suscetibilidade indica o potencial de ocorrência de processos naturais em uma determinada área, expressando-se segundo classes de probabilidade (Feel *et al.*, 2008). As cartas de suscetibilidade consideram que os escorregamentos podem ser analisados a partir de fatores condicionantes intrínsecos à natureza dos terrenos (Listo e Vieira, 2012).

Entre os métodos de análise da suscetibilidade, a modelagem é uma ferramenta relevante para avaliar de processos morfodinâmicos (Fernandes, 2016). Assim, cartas de suscetibilidade geradas por modelos preditivos, são importantes instrumentos técnico-científicos que auxiliam

¹ Trabalho resultante de pesquisa desenvolvida no decorrer do Doutorado do primeiro autor, no Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco (PPGEO/UFPE).

² Doutor em Geografia pela Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, carlos.bispo@ufpe.br;

³ Professor orientador: Doutor em Geografia, docente do Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco - PPGEO/UFPE, fabrizio.listo@ufpe.br;

⁴ Doutoranda do Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco - PPGEO/UFPE, barbosgbarbara@gmail.com.

o planejamento territorial mitigando riscos geoambientais (Fell *et al.*, 2008; Listo e Vieira, 2012).

Nessa conjuntura, há inúmeras metodologias para avaliar a suscetibilidade a escorregamentos integradas à ambiente SIG. Guzzeti *et al.* (1999) classificaram quatro métodos de mapeamento dessa natureza: i) inventário histórico; ii) heurístico; iii) determinístico e iv) estatístico. Para esta pesquisa empregou-se o modelo heurístico *Analytic Hierarchy Process* (AHP), concebido por Saaty (1991), para avaliar a suscetibilidade a escorregamentos na face oriental da Chapada do Araripe.

O AHP, organiza e avalia hierarquicamente a importância relativa dos fatores condicionantes do processo, verificando a consistência dos pesos atribuídos (Saaty, 1991), tem sido amplamente empregado, proporcionando resultados satisfatórios. Ele permite ponderar quantitativamente variáveis, mediante a interação do pesquisador com o modelo matemático, inserindo, dessa forma, considerações qualitativas (Raffo, 2012).

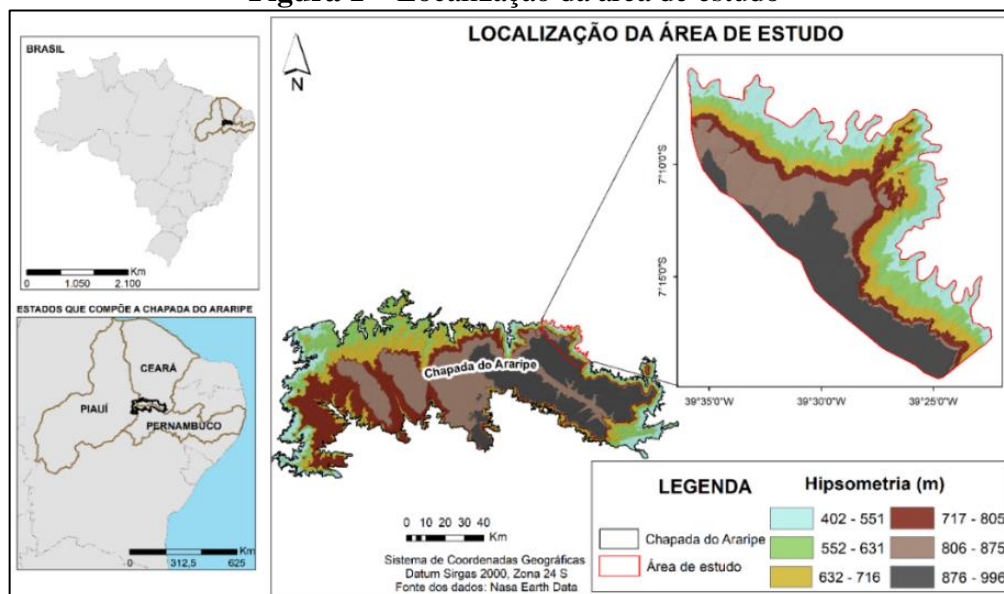
Nesse viés, o objetivo deste trabalho é avaliar suscetibilidade a escorregamentos na face oriental da Chapada do Araripe, a partir de um modelo de base heurística (modelo AHP) em ambiente SIG. O geoambiente estudado, embora situado em uma região de contexto semiárido, apresenta uma exceção no clima regional, onde as precipitações superam os 1000 mm anuais, permitindo o desenvolvimento de uma vegetação predominantemente arbórea e a formação de espessos mantos de intemperismo e solos mais desenvolvidos nas encostas, além de depósitos coluvionares, mais incoesos e com redução de estabilidade. Trata-se de um planalto sedimentar, com altitude média de 900 metros (Morales e Assine, 2015).

Dessa forma, a pesquisa busca fornecer contribuições técnico-científicas sobre a influência dos condicionantes geológico-geomorfológicos na evolução da paisagem da região e avançar no uso de modelos preditivos aplicados a escorregamentos.

A área estudada, com 287 km², está situada na Chapada do Araripe em encostas orientadas para o nordeste, formando anfiteatros com curvaturas convergentes-côncavas, voltadas para o município do Crato – CE (Figura 1).

A seleção desta área justifica-se diante da presença de características ambientais que favorecem a ocorrência de escorregamentos, tais como: (i) índices médios anuais maiores de umidade e de precipitações pluviais (em relação ao restante da Chapada), (ii) relevos altimetricamente elevados e declivosos e (iii) pelo fato de constituir-se como ambiente de exceção.

Figura 1 – Localização da área de estudo



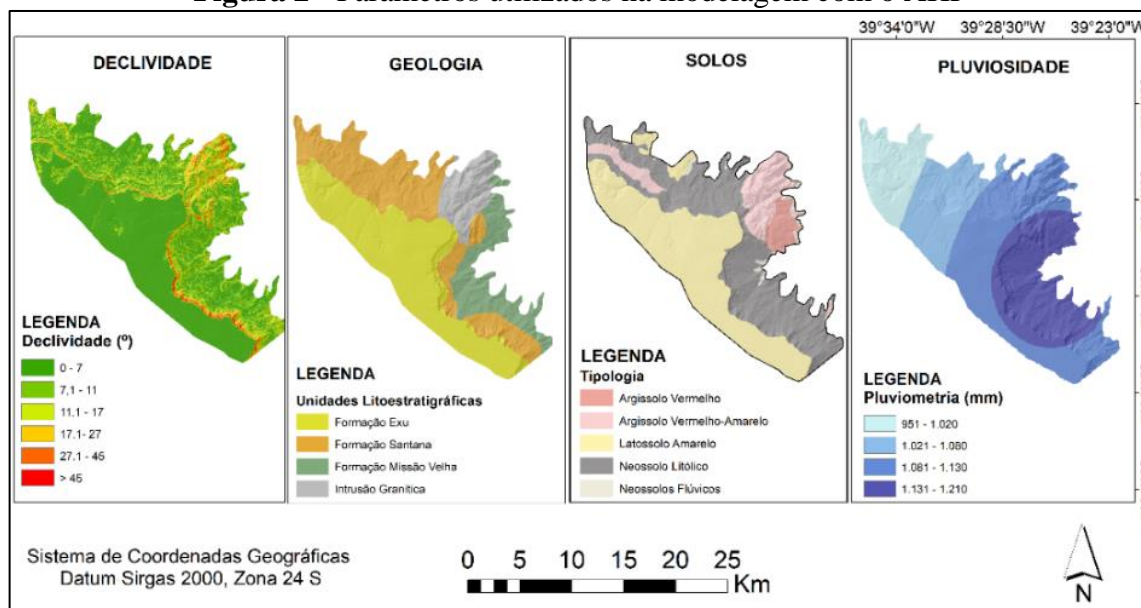
Fonte: Base dos dados: *Nasa Earth Data*.

METODOLOGIA

Definição dos Parâmetros

A modelagem para a avaliar a suscetibilidade a escorregamentos consistiu na seleção de alguns parâmetros que condicionam a suscetibilidade na área de estudo, são eles: Declividade, Geologia, Solos e Pluviosidade (Figura 2).

Figura 2 - Parâmetros utilizados na modelagem com o AHP



Fonte: Elaborado pelo autor

O parâmetro declividade proveniente do satélite ALOS PALSAR, com resolução de 12,5 m, foi gerado a partir de uma rotina automatizada no *software ArcGIS*, via caixa de ferramentas *ArcToolbox*. O mapa foi configurado com seis classes (IPT, 2012). Já o parâmetro geológico (1:100.000) foi adquirido por meio da compilação de dados do Serviço Geológico do Brasil – CPRM (2014). O parâmetro solo (1:100.000) adquirido a partir do reconhecimento dos solos da mesorregião sul cearense (Funceme, 2012). O parâmetro da pluviosidade foi gerado a partir das médias de precipitação de oito postos pluviométricos próximos à área de estudo (Funceme, 2012). O banco de dados possui os valores de chuvas diárias acumuladas (mm/dia) e chuvas mensais acumuladas (mm/mês) séries entre 1974 e 2019. Para a espacialização desses dados e aquisição do mapeamento (1:100.000), empregou-se a interpolação pela Ponderação do Inverso da Distância (IDW), por meio das ferramentas *ArcToolbox* no *ArcMap*.

Graus de Suscetibilidade a Escorregamentos

Anteriormente à hierarquização dos pesos, foram definidos três níveis de suscetibilidade para cada um dos parâmetros. Para isso, foi necessário, primeiramente, classificar os atributos dos mapas no *ArcGIS* via ferramenta *Spatial Analyst Tools/Reclass/Reclassify*, reclassificando-os em uma coluna de “notas”, que resultou nos seguintes níveis de suscetibilidade (para cada classe): 1 = baixo, 2 = médio e 3 = alto.

Para a definição dos graus de suscetibilidade de cada classe foram considerados os seguintes critérios: análises realizadas na área a partir de mapeamentos e trabalhos de campo (em 2018 e 2021) e avaliações com base na literatura especializada de áreas com características ambientais semelhantes como trabalhos de Souza; Oliveira (2006), Peulvast; Bétard; Magalhães (2011) e Guerra, Souza e Silva (2020).

Estruturação da AHP, definição dos pesos e confecção da carta de suscetibilidade

Após a atribuição dos graus de suscetibilidade para cada classe dos quatro critérios adotados, os mapas foram convertidos em *raster* no *ArcGIS*, procedimento necessário para realizar a álgebra de mapas, culminando no mapa de suscetibilidade. Para se chegar ao peso específico dos parâmetros empregados (Declividade, Geologia, Solos e Pluviosidade) realizou-se a comparação pareada dos elementos, que se constitui em um julgamento comparativo por meio da atribuição de pesos, procurando-se determinar a importância relativa de cada elemento de um nível hierárquico com relação a cada critério no nível imediatamente superior. Os pesos foram determinados a partir de uma escala de julgamentos (Escala Fundamental da AHP) que

pondera as variáveis em níveis de intensidade de importância relativa, variando de 1 a 9 (Saaty, 1991) conforme (Tabela 1).

Por meio dos quatro parâmetros adotados, foi utilizada uma matriz quadrada, com análise pareada, conforme a Escala Fundamental da AHP, resultando em um peso para cada parâmetro (Tabela 2).

Após a comparação pareada, foi realizada a normalização dos valores, cujo valor de importância determinado para cada par é dividido pelo somatório dos valores de cada coluna. Desta forma, para a aquisição do valor do peso (w_i) de cada critério, foi realizada a divisão do somatório de cada linha (ΣL) pelo número de critérios analisados (Tabela 3).

Tabela 1 - Escala Fundamental da AHP.

Intensidade de Importância	Definição	Explicação
1	Igual Importância	Duas atividades contribuem igualmente com o objetivo
3	Importância moderada de um sobre o outro	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma atividade sobre a outra
5	Essencial ou forte importância	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma atividade sobre a outra
7	Importância muito forte	Uma atividade é fortemente favorecida e seu domínio é demonstrado na prática
9	Extremamente importante	A evidência favorece uma atividade sobre a outra é da mais alta ordem possível de afirmação
2,4,6,8	Valores intermediário entre dois julgamentos adjacentes	Quando o compromisso é necessário

Fonte: Adaptado de Saaty (1991).

Tabela 2 - Matriz quadrada de correlação pareada do cenário de suscetibilidade.

Critérios	Pluviosidade	Solos	Geologia	Declividade
Pluviosidade	1	0,33	1,00	0,50
Solos	3	1	1	1,00
Geologia	1	1	1	0,33
Declividade	2	1	3	1

Fonte: Autor

Tabela 3 - Matriz de Normalização dos critérios do cenário de suscetibilidade

Critérios	Pluviosidade	Solos	Geologia	Declividade	W_i (peso)
Pluviosidade	0,14	0,10	0,17	0,18	0,15
Solos	0,43	0,30	0,17	0,35	0,31
Geologia	0,14	0,30	0,17	0,12	0,18
Declividade	0,29	0,30	0,50	0,35	0,36
Razão de Consistência (CR)					0,07

Fonte: Autor.

Finalizados os processos de comparação pareada e normalização com a consequente aquisição dos pesos, a razão de consistência obtida para o cenário de suscetibilidade foi de 0,07. Isso indica que os julgamentos apresentaram consistência aceitável para as situações, ou seja, menor que 0,10, conforme as recomendações desta metodologia (Saaty 1991, 2008). A carta de suscetibilidade a escorregamentos, foi produzida em ambiente SIG por meio da Equação 1.

$$SE = D*0,36 + S*0,31 + G*0,18 + P*0,15 \quad \text{Equação 1}$$

Onde: SE=Suscetibilidade; D= Declividade; S= Solos; G= Geologia; P= Pluviosidade.

Validação da carta de suscetibilidade

A validação da carta de suscetibilidade aconteceu a partir de um inventário de cicatrizes de escorregamentos que foi sobreposto na referida carta. O inventário foi realizado com o suporte do *ArcGIS*, a partir da interpretação de imagens de satélite disponibilizadas pelo *Google Earth Pro*, abrangendo o período temporal de 2003 a 2020. Na validação do cenário de suscetibilidade, aplicou-se os seguintes índices propostos por Gao (1993): (i) Concentração Cicatrizes (CC): razão entre o número de células de cada classe afetada pelas cicatrizes e o total de células afetadas na área de estudo (Equação 2) e (ii) Frequência de Distribuição (FD), referente à distribuição quantitativa das classes de suscetibilidade (razão entre o total de cada classe e o número total de células na área de estudo) (Equação 3).

$$CC = \frac{\text{n}^\circ \text{ de células em cada classe}}{\text{Área total afetada}} * 100 \quad \text{Equação 2}$$

$$FD = \frac{\text{n}^\circ \text{ de células em cada classe}}{\text{Total de células}} * 100 \quad \text{Equação 3}$$

Para complementar a validação do mapa de suscetibilidade juntamente com o inventário de cicatrizes, foi utilizada a curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*) (Fawcett, 2006). Utilizou-se o módulo *GIS Analysis* do *software Idrisi*, os dados de entrada foram o cenário de suscetibilidade e o inventário de cicatrizes. Para isto, a partir da averiguação da sensibilidade e da especificidade calculou-se a Área sob a Curva - AUC (Equação 4). A AUC compara, quantitativamente, o desempenho dos modelos de suscetibilidade (Fawcett, 2006).

$$AUC = \frac{\sum_{i=1}^n 1}{FP+VN} \left[(Ls_i - L_i) \cdot \frac{a_i + b_i}{2} \right] \quad \text{Equação 4}$$

Onde: $Ls_i - L_i$ = amplitude de cada classe; a_i = valor da ordenada correspondente a L_i ; b_i = valor da ordenada correspondente a Ls_i .

A AUC possui valores de precisão que variam entre 0,5 e 1. Quanto mais próximo de 1, melhor é a capacidade preditiva do modelo. Por sua vez, valores entre 0,7 e 1 são considerados eficazes, sugerindo uma boa capacidade de predição (Listo; Santos, 2023).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Modelagem da suscetibilidade a escorregamentos e validação

De acordo com a espacialização da modelagem realizada em ambiente SIG para a face leste da Chapada do Araripe (Figura 3 A) as áreas mais instáveis localizaram-se, predominantemente, nas encostas mais declivosas, principalmente na região da escarpa, recoberta por neossolos litólicos (Figura 3 B,C). Houve aumento da instabilidade nas encostas, predominantemente, côncavas – convexas, contribuindo para maiores concentrações de fluxos, diante de áreas que recebem maior aporte pluviométrico. Em termos geológicos, o contato litoestratigráfico entre a Formação Santana e Exu aumentaram a instabilidade. Mendonça *et al.* (2004) e Guerra, Souza e Silva (2020) explicam que os litotipos dessas unidades e seus solos têm alta condutividade hidráulica, permitindo rápida infiltração das águas pluviais.

Em relação ao índice FD foram obtidas as seguintes porcentagens para as três classes de suscetibilidade (Figura 4 A): baixa (80%); média (17,7%) e alta (2,3%). Na correlação ao inventário de cicatrizes, verificou-se que a classe de maior instabilidade, mesmo representando apenas 2,3% da área total, essa fração concentra a maior parte das cicatrizes de escorregamentos, evidenciando a relevância dos fatores topográficos e litológicos, apresentou um índice CC de 66% (Figura 4 A).

As áreas definidas como de média suscetibilidade a escorregamentos embora não tenha sido a mais crítica, ela apresentou um índice de concentração de cicatrizes (CC) de 24,2%, isso indica que, mesmo que a instabilidade moderada cubra uma fração relativamente pequena do terreno, ainda é significativa na ocorrência de escorregamentos.

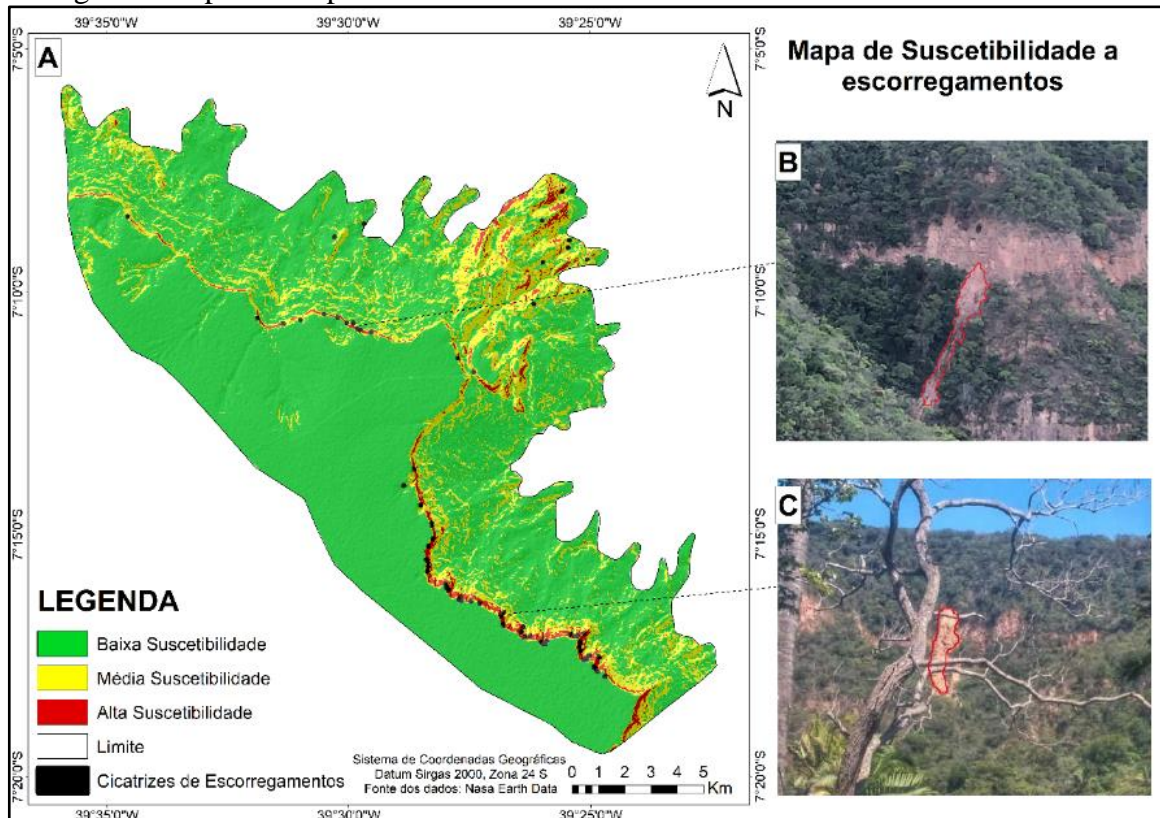
Por outro lado, a classe de menor suscetibilidade, que abrange a maior parte da área (80%), apresentou uma concentração muito inferior de cicatrizes, com um CC de apenas 9,8%. Esse contraste sugere que, mesmo ocupando a maior parte do terreno, as áreas de baixa

suscetibilidade estão menos propensas a apresentar eventos de escorregamento, reforçando a importância dos fatores topográficos e geológicos na definição de áreas de risco.

Elevado índice CC para uma pequena área total de alta suscetibilidade também foi observado por Franco *et al.* (2021) em um mapeamento de áreas de risco no município de Aracaju - SE. Os autores verificaram que apenas aproximadamente 3% do terreno estava em condição de maior instabilidade, porém, 76,9% dos escorregamentos se concentraram nessa mesma área. Taxa de acurácia similar às pesquisas citadas foi encontrada por Ayalew *et al.* (2005) que aplicaram o modelo AHP no estudo da suscetibilidade da Ilha de Sado, leste do Japão. Para isso, adotaram critérios condicionantes compostos por declividade, hipsometria e litologia. O mapeamento quando validado exportou um índice de acerto equivalente a 70%.

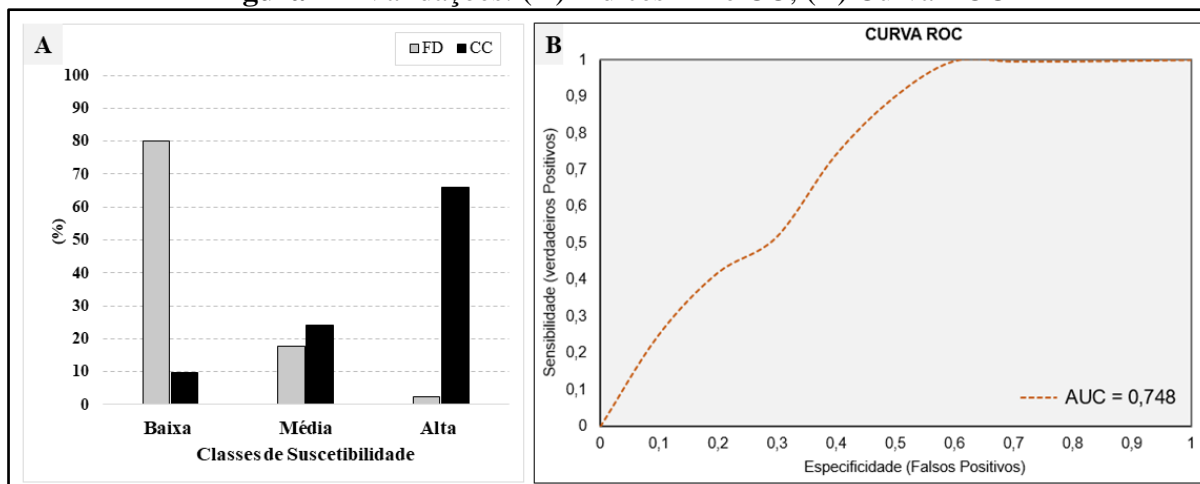
O desempenho da capacidade preditiva do mapeamento com base na curva ROC demonstrou uma boa capacidade de ajuste do modelo produzido nesta pesquisa. A carta de suscetibilidade apresentou bom desempenho preditivo, com uma AUC de 0,748 (Figura 4 B), confirmando a eficiência da metodologia aplicada e corroborando com outros estudos que utilizaram critérios semelhantes para análise de risco, à exemplos os estudos de Kumar *et al.* 2015; Listo e Santos, 2023.

Figura 3 - (A) Carta de Suscetibilidade a Escorregamentos (B;C) Cicatrizes de escorregamentos previstas pelo modelo em classes de alta suscetibilidade.



Fonte: Autores (2024).

Figura 4 – Validações: (A) Índices FD e CC; (B) Curva ROC



Fonte: Autor (2024).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que essa pesquisa atingiu este objetivo, avançando o conhecimento geomorfológico da região estudada. A carta de suscetibilidade mostrou que as áreas mais instáveis estão situadas predominantemente, nas encostas mais declivosas, principalmente na região da escarpa. São nessas áreas onde se concentraram um maior percentual de cicatrizes de escorregamentos. Nesse sentido, o cenário de suscetibilidade em questão apresentou um bom desempenho no tocante a sua acurácia, com AUC= 0,748, indicando sucesso na previsão realizada.

Destarte, o emprego do modelo AHP em ambiente SIG foi bastante eficiente exportando resultados condizentes com a realidade observada em campo e validadas a partir de índices como a curva ROC. Nesse sentido, futuras análises com inserção de mais parâmetros condicionantes podem ser realizadas para melhor entender a dinâmica geoambiental da área.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pela bolsa de doutorado do primeiro autor.

REFERÊNCIAS

AYALEW, L., et al. Landslides in Sado Island of Japan: GIS-based susceptibility mapping with comparisons from two methods and verifications. *Eng. Geology*, 81(4), 432–445, 2005.

FAWCETT, T. An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*. V. 27, p. 861–874, 2006.

FELL, R.; COROMINAS, J.; BONNARD, C.; CASCINI, L. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. **Engineering Geology**. v. 102, 83-111, 2008.

FERNANDES, N. F. Modelagem em Geografia Física: Teoria, Potencialidades e Desafios. **Espaço Aberto**, v. 6, n. 1, p. 209-247, 2016.

FRANCO, L. S.; FIGUEIREDO, F. T.; GOMES, P. V. O.; ARAÚJO, I. B. A. Análises hierárquica e de regressão linear aplicadas aos mapeamentos de suscetibilidade e de risco aos movimentos de massa (Bairro Cidade Nova, Aracaju – SE, Brasil). **Geol. USP, Sér. cient.**, São Paulo, v. 21, n. 3, p. 8-107, 2021.

FUNCEME. **Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos -** Mesorregião do Sul Cearense. Fortaleza, 2012. 280p.

GAO, J. Identification of topographic settings conducive to landsliding from DEM in Nelson County, Virginia, U.S.A. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.18, p.579-591, 1993.

GUERRA, M. D. F., SOUZA, M. J., SILVA, E. V. Veredas da Chapada do Araripe: subespaços de exceção no semiárido do estado do Ceará, BR. **Ateliê geográfico**, v 14, p. 51-66, 2020.

GUZZETTI, F.; CARRARA, A.; CARDINALI, M.; REICHENBACH, P. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. **Geomorphology**, 1999, 31(1-4), p. 181-216.

KUMAR, K. M.; ANADURAI, R.; RAVICHADRAN, P. T.; KARUPPAPILAI, A. Mapping of landslide susceptibility using AHP at Kothagiri Taluk, Tamil Nadu, India. **International Journal of Applied Engineering Research**, v.10, n. 3, 2015.

LISTO, F. L. R.; VIEIRA, B. C. Mapping of risk and susceptibility of shallow-landslide in the city of São Paulo, Brazil. **Geomorphology**, v. 169-170, p. 30-44, 2012.

LISTO, F. L. R., SANTOS, E. M. Cenários de suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos usando o modelo shalstab. **Revista de Geografia**, v 40, 2023.

MENDONÇA, L. A. R.; FRISCHKORN, H.; SANTIAGO, M. F.; MENDES FILHO, J. Probing the relationship between surface waters and aquifers by 180 measurements on the top of the Araripe Plateau/ NE Brazil. **Environmental Geology** (Berlin), Springer-Verlag Heidelberg, v. 46, n.2, p. 295-302, 2004.

MORALES, N.; ASSINE, M.L. Chapada Do Araripe: A Highland Oasis Incrusted into the Semi-arid Region of Northeastern Brazil. In: Vieira, B.C.; Salgado A.; Santos L. (eds). **Landscapes and Landforms of Brazil**. World Geomorphological Landscapes. Springer, Dordrecht, 2015.

PEULVAST, J. BÉTARD, F.; MAGALHÃES, A. O. Scarp morphology and identification of large-scale mass movements in tropical tablelands: the eastern Araripe basin (Ceará, Brazil). **Geomorphologie**, v. 17, n. 1, p. 33-52, 2011.



RAFFO, J. G. DA G. O Processo Analítico Hierárquico e seu uso na modelagem do espaço geográfico. **Revista do Departamento de Geografia – USP**, p. 26–37, 2012.

SAATY, T. L. **Método de Análise Hierárquica**. São Paulo: McGraw-hill, 1991.

SOUZA, M. J. N.; OLIVEIRA, V. P. V. Os enclaves úmidos e sub-úmidos do semiárido do NE brasileiro. **Mercator - Revista de Geografia da UFC**, v.5, n.9, p. 85-102, Fortaleza, 2006.