

Sensoriamento remoto aplicado ao mapeamento de cicatrizes de escorregamentos na face leste da Chapada do Araripe (Ceará)

Carlos de Oliveira Bispo ^{1*}, Fabrizio de Luiz Rosito Listo ², Bárbara Gabrielly Silva Barbosa ³,

¹Doutor em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil. (*Autor correspondente: carlos.bispo@ufpe.br)

²Doutor em Geografia, Professor no Departamento de Ciências de Geográficas da Universidade Federal de Pernambuco, Brasil.

³Mestra em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil.

Histórico do Artigo: Submetido em: 18/02/2024 – Revisado em: 27/02/2024 – Aceito em: 17/03/2024

RESUMO

Os escorregamentos são eventos intrínsecos à dinâmica natural das encostas, cuja manifestação está sujeita a uma série de fatores físicos e biogeoquímicos. No entanto, é importante notar que esses eventos também podem ser desencadeados por atividades humanas, ocorrendo em diversas escalas espaço temporais. A realização de mapeamentos de cicatrizes é fundamental para a compreensão da propensão a escorregamentos, pois, presume-se que eventuais instabilidades nas encostas possam ocorrer nos mesmos pontos que foram previamente desencadeados. A área de estudo é um recorte da face leste da Chapada do Araripe, posiciona-se a partir de encostas orientadas para NE, sob a forma de anfiteatros (hollows), com curvaturas convergentes-côncavas, voltadas ao município do Crato - CE. Nesse sentido, este artigo tem como objetivo inventariar cicatrizes de escorregamentos na face leste da Chapada do Araripe. Nos procedimentos metodológicos foram adotadas técnicas de sensoriamento remoto e atividades de campo com vistas a atender o objetivo proposto. O trabalho realizado permitiu identificar 71 cicatrizes de escorregamentos, que ocorrem, predominantemente, na região mais escarpada da Chapada, indicando um padrão de comportamento desses processos atualmente.

Palavras-Chaves: Geomorfologia, Geografia Física, Suscetibilidade a escorregamentos.

Remote sensing applied to the mapping of landslide scars on the eastern face of Chapada do Araripe (Ceará)

ABSTRACT

Landslides are events intrinsic to the natural dynamics of slopes, whose manifestation is subject to a series of physical and biogeochemical factors. However, it is important to note that these events can also be triggered by human activities, occurring on different spatial and temporal scales. Carrying out scar mapping is essential for understanding the propensity for landslides, as it is assumed that eventual instabilities on the slopes may occur at the same points that were previously triggered. The study area is a section of the east face of Chapada do Araripe, positioned on slopes facing NE, in the form of amphitheatres (hollows), with converging-concave curvatures, facing the municipality of Crato - CE. In this sense, this article aims to inventory landslide scars on the east side of Chapada do Araripe. Remote sensing techniques and field activities were adopted in the methodological procedures to meet the proposed objective. The work carried out allowed the identification of 71 landslide scars, which predominantly occur in the steepest region of Chapada, indicating a pattern of behavior of these processes today.

Keywords: Geomorphology, Physical Geography, Susceptibility to Landslides.

1. Introdução

Os escorregamentos são processos da dinâmica natural das encostas, cuja manifestação é influenciada por uma complexa interação de fatores físicos e biogeoquímicos. Contudo, é relevante destacar que tais eventos

Bispo et al. (2024). Sensoriamento remoto aplicado ao mapeamento de cicatrizes de escorregamentos na face leste da Chapada do Araripe (Ceará). *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto*, v.5, n.1, p.28-37.



também podem ser desencadeados por atividades humanas e ocorrem em diversas escalas temporais e espaciais (Fell et al., 2008).

Nesse viés, os inventários de cicatrizes de escorregamentos são definidos como uma representação cartográfica que inclui dados relativos à geolocalização e extensão dos escorregamentos que ocorreram em períodos pretéritos, uma vez que se parte do princípio de que futuras instabilidades nas encostas podem se manifestar nas mesmas áreas previamente afetadas (Guzzetti et al., 1999; Remondo et al., 2003). Esses inventários desempenham um papel crucial na calibração de modelos espaciais voltados para a identificação de regiões suscetíveis a escorregamentos. Compreende-se que um modelo satisfatoriamente validado é aquele que resulta em uma grande concordância espacial entre as cicatrizes de escorregamentos e as áreas instáveis, demonstrando bom desempenho (Dietrich et al., 2001).

As feições de cicatrizes ou pontos de ocorrência dos processos de escorregamentos são mapeadas mediante a utilização de diversas fontes de informação, abrangendo pesquisas de campo, registros históricos expressos em artigos, reportagens de jornais impressos e digitais, bem como mediante à análise minuciosa de fotografias aéreas e/ou imagens de satélite. A partir dos inventários pode-se representar a delimitação geoespacial dos eventos de escorregamentos, e estes podem ser utilizados como dados preliminares que darão suporte a outros mapeamentos, como por exemplo, os estudos de suscetibilidade a escorregamentos (Varnes, 1984; Van Westen et al., 2008; Guzzetti et al., 1999, 2012; Listo et al., 2022).

Há inúmeras metodologias para avaliar a suscetibilidade a escorregamentos, muitas delas, amplamente disseminadas devido a integração a ambientes SIG (Sistema de Informações Geográficas) com o uso de técnicas de Sensoriamento Remoto (SR). Nesse sentido, Soeters e Van Westen (1996) e Guzzetti et al. (1999) classificaram quatro métodos de mapeamento desta natureza: i) inventário histórico; ii) heurístico; iii) determinístico e iv) estatístico.

Sobre o inventário histórico os autores supramencionados destacam que os mapas de inventário são considerados um método empírico e representam a distribuição espacial dos processos contendo registros antigos e recentes dos escorregamentos (Soeters e Van Westen, 1996; Guzzetti et al., 1999, 2012; Parise, 2001, Nery e Vieira, 2015). Geralmente são bastante utilizados como instrumentos de validação em mapeamentos (ex. suscetibilidade a escorregamentos).

Um inventário pode incluir informações referentes à tipologia, dimensões, forma e recorrência e ser mapeado em diferentes escalas. Guzzetti et al. (1999) pontuam que mapas de inventários são adequados para: (i) documentar a extensão dos processos; (ii) investigar a distribuição, os tipos e os padrões de processos em relação às características morfológicas e geológicas; (iii) permitir a melhor compreensão da evolução das paisagens dominadas por processos e (iv) ser uma etapa preliminar em relação à avaliação da suscetibilidade, do perigo e do risco a processos morfodinâmicos.

Diante da importância dos inventários de escorregamentos para a calibração de modelos espaciais de áreas suscetíveis a escorregamentos, o presente artigo tem como objetivo inventariar cicatrizes de escorregamentos na face leste da Chapada do Araripe com vistas a compreender os locais onde ocorrem mais processos desestabilizadores da paisagem.

2. Material e Métodos

2.1 Área de estudo

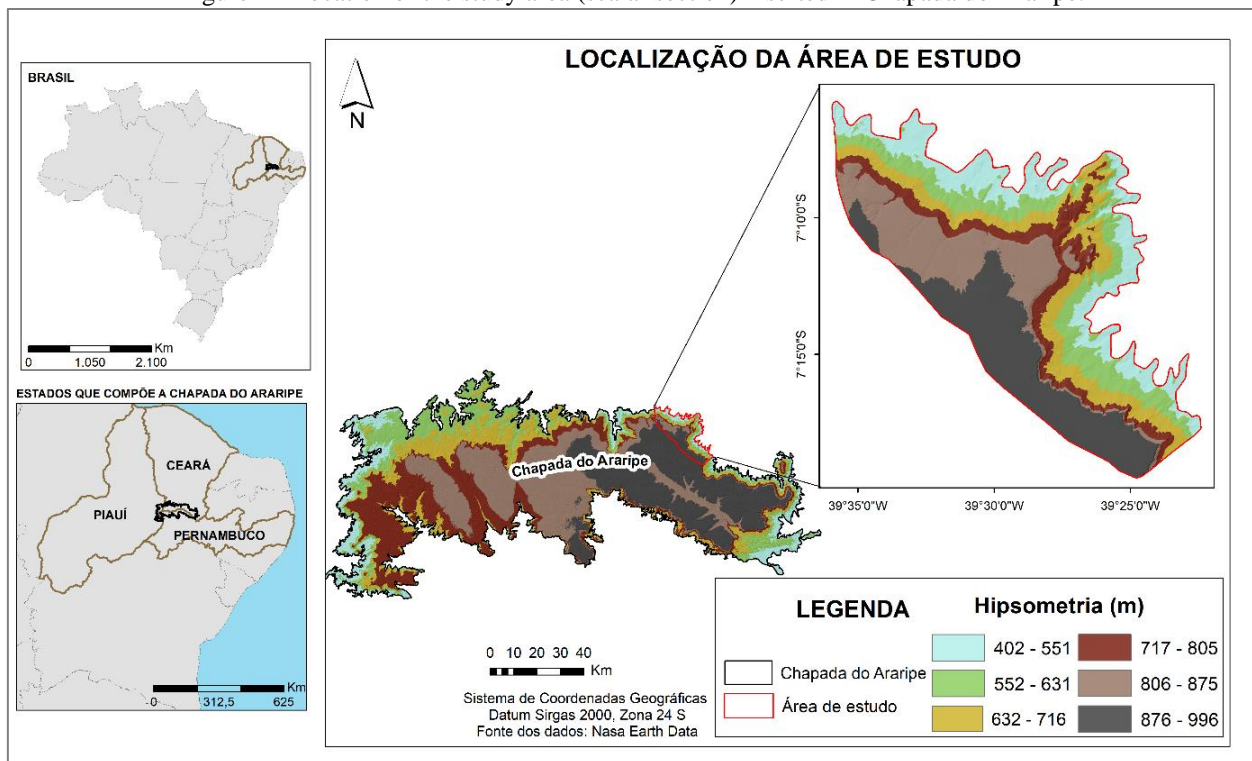
A face leste da Chapada do Araripe (Figura 1) está situada no interior da região Nordeste do Brasil e engloba territórios nos estados do Ceará, Pernambuco e Piauí. No contexto geográfico regional, a Chapada do Araripe é caracterizada como uma bacia sedimentar intracratônica, abrangendo uma área aproximada de 11.000 km², seus limites são definidos pela presença da Zona Transversal na Província da Borborema, situada

entre os lineamentos de Patos, ao norte, e de Pernambuco, ao sul (Morales e Assine; 2015; Peulvast e Bétard, 2015).

O recorte escalar desta pesquisa compreende a face leste da Chapada do Araripe na região do Cariri Cearense. A área em estudo (287 km²) posiciona-se a partir de encostas orientadas para NE, sob a forma de anfiteatros (hollows), com curvaturas convergentes-côncavas, voltadas ao município do Crato - CE. Do ponto de vista climatológico, a região em questão está inserida no contexto do domínio morfoclimático tropical semiárido, caracterizado por particularidades edafoclimáticas e setores altimétricos que recebem maior quantidade de precipitações, quando comparado ao seu entorno, graças à influência significativa da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). No município do Crato (CE) onde está situado o recorte da pesquisa, a média anual de precipitação pluviométrica média anual é de aproximadamente 1.109 mm (Funceme, 2006).

Nesse escopo, a escolha desta área decorre da presença de características ambientais que favorecerem 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 (enclave subúmido).

Figura 1- Localização da área de estudo (recorte escalar) inserido na Chapada do Araripe.
 Figure 1 - Location of the study area (scalar section) inserted in Chapada do Araripe.



Fonte: Autores (2022). Base dos dados: Nasa Earth Data.
 Source: Authors (2022). Database: Nasa Earth Data.

2.2 Confeção do inventário de escorregamentos

O inventário de escorregamentos produzido nesta pesquisa foi realizado com apoio do software ArcGIS, a partir da interpretação de imagens de satélite disponibilizadas pelo Google Earth Pro (Figura 2), utilizando-se o recurso “imagens históricas” compreendendo à escala temporal entre os anos 2003 e 2020.

As cicatrizes passaram por uma fotointerpretação e foram mapeadas e delimitadas a partir dos seguintes critérios, conforme as propostas de Guzzetti et al. (2012): ausência de vegetação, textura do solo, posição na encosta, forma e tamanho. Foram consideradas somente a porção de ruptura das cicatrizes (terço à montante), desconsiderando-se suas áreas de arraste, de depósito coluvionar e desconsiderando as cicatrizes com influência antrópica.

Figura 2 - Exemplo de delimitação de cicatrizes de escorregamentos a partir de vetorização no Google Earth Pro.
Figure 2 - Example of delimiting landslide scars using vectorization in Google Earth Pro.

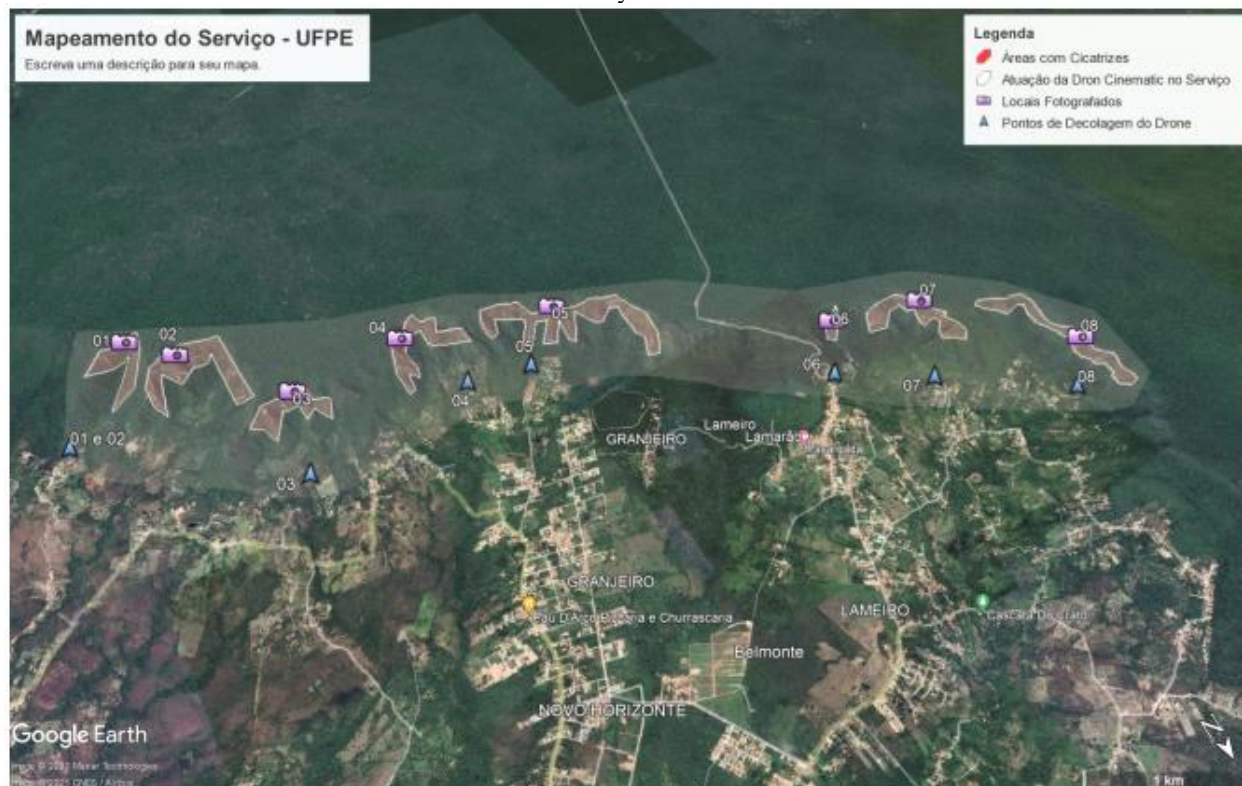


Fonte: Elaborado pelos autores com base no Google Earth Pro (2021).
Source: Prepared by the authors based on Google Earth Pro (2021).

As cicatrizes foram vetorizadas na forma de polígonos por meio da extensão kml dentro do próprio Google Earth Pro, utilizando-se a ferramenta zoom in para melhor interpretar as cicatrizes das referidas imagens. Após esta etapa, os polígonos foram convertidos em shapefiles (shp) por meio da ferramenta KML to Layer (módulo conversion tools do ArcGIS). Assim, as cicatrizes puderam ser avaliadas em conjunto com outros mapeamentos em ambiente SIG. Posteriormente (em novembro de 2020), foram realizados trabalhos de campo na área, para a validação das cicatrizes mapeadas.

Figura 3 - Visão geral do planejamento de voo com algumas áreas para captura de imagens com veículo aéreo não tripulado na área de estudo.

Figure 3 - Overview of flight planning with some areas for capturing images with an unmanned aerial vehicle in the study area.



Fonte: Dron Cinematic a partir do Google Earth (2021).
 Source: Dron Cinematic from Google Earth (2021).

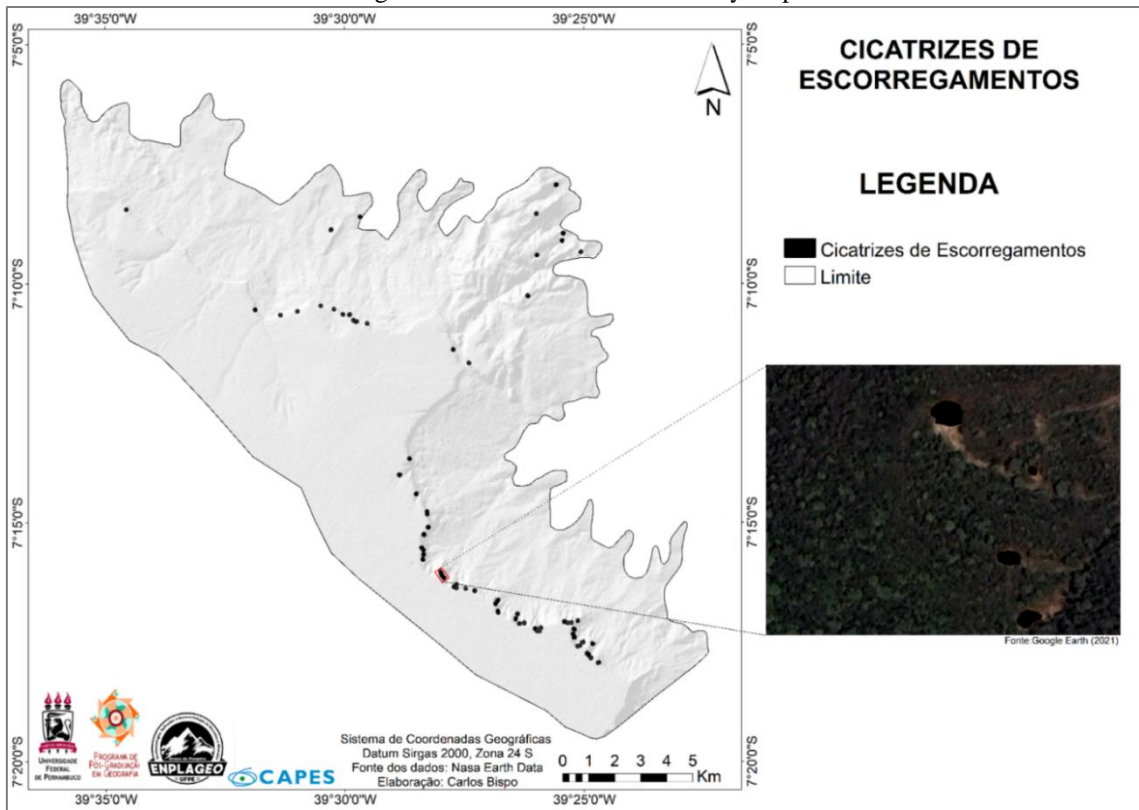
Após as devidas validações supracitadas as cicatrizes de escorregamentos serão calculadas as áreas das cicatrizes assim como o volume estimado de sedimentos, o cálculo se dará com o auxílio da calculadora raster do ArcGIS.

3. Resultados e Discussão

Foram inventariadas e mapeadas 71 cicatrizes de escorregamentos translacionais rasos (Figura 4). Elas concentraram-se predominantemente na região mais escarpada da Chapada do Araripe (Figura 5) e são caracterizadas pela ruptura de massas de solo pouco espessas, com atuação gravitacional. As áreas mais atingidas pelos processos constituem-se em angulações elevadas, atingindo valores próximos a verticalidade, fator de muita influência no gatilho dos escorregamentos para a área.

Há maior concentração de cicatrizes (46) na região sudeste do recorte estudado, especificamente na unidade geomorfológica da escarpa em áreas declivosas, com influência significativa de condicionantes geológicas (Arenitos da Formação Exu) e pedológicos (solos do tipo Neossolos Litólicos).

Figura 4 - Mapa de inventário de Cicatrizes de Escorregamentos
Figure 4 - Landslide Scars inventory map.



Fonte: Autores (2022).
Source: Authors (2022).

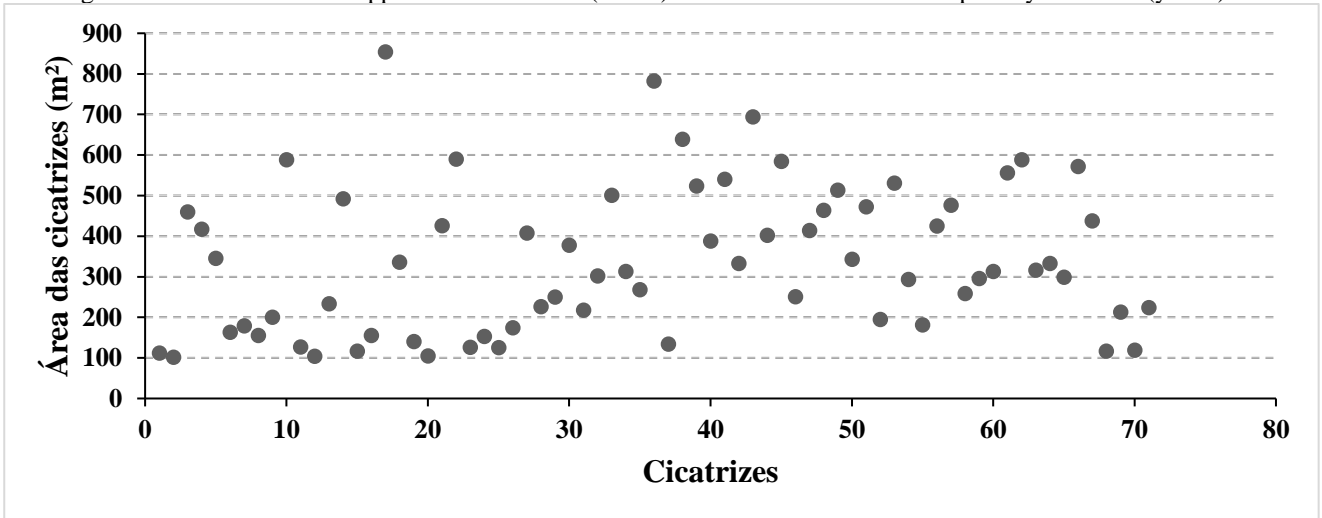
Figura 5 - Presença de cicatrizes de escorregamentos na região de escarpa da área de estudo.
Figure 5 - Presence of landslide scars in the escarpment region of the study area.



Fonte: Dron Cinematic (2021).
Source: Dron Cinematic (2021).

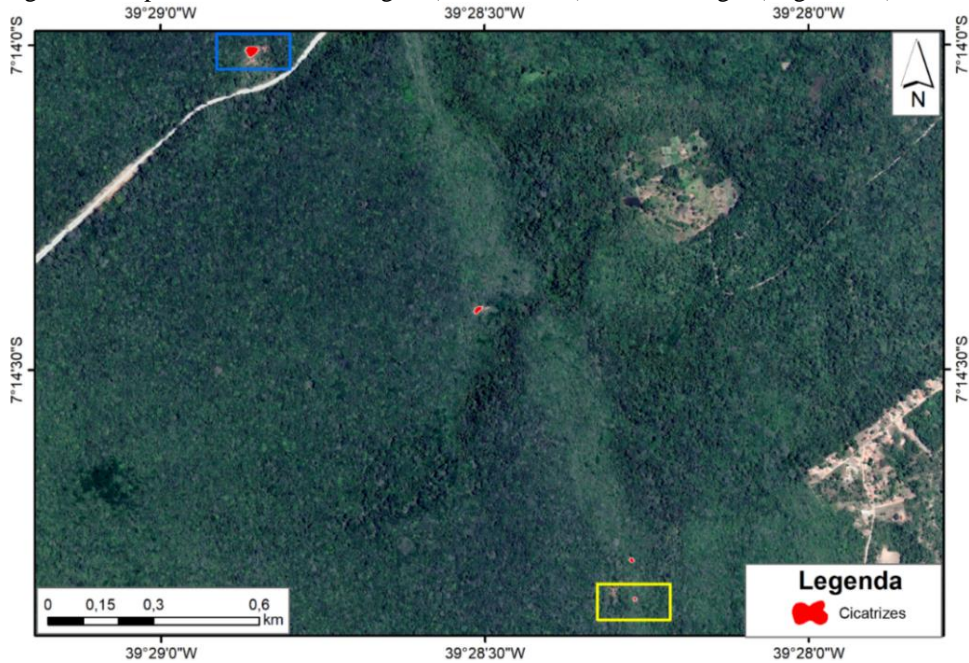
Analisando-se as cicatrizes de escorregamentos de forma distribuída verificou-se que 79% delas possuem área inferior a 500 m² (Figura 6). A maior cicatriz mapeada possui 854 m² e a menor 102 m² (Figura 7). A área total das cicatrizes mapeadas foi 24.063 m² o volume total de sedimentos gerados por esses escorregamentos, foi da ordem de 36.095 m³ (considerando-se uma profundidade de ruptura de 1,5 m).

Figura 6 - Distribuição das cicatrizes dos escorregamentos (eixo x) em relação à área ocupada por cada uma (eixo y).
 Figure 6 - Distribution of mapped landslide scars (x axis) in relation to the area occupied by each one (y axis).



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).
 Source: Prepared by the authors (2023).

Figura 7 – Cicatrizes de escorregamentos. Retângulo amarelo (menor cicatriz); retângulo azul (maior cicatriz).
 Figure 7 - Slip scars. Yellow rectangles (smallest scar); blue rectangle (largest scar).



Fonte: Autores com base no Google Earth Pro (2022).
 Source: Authors based on Google Earth Pro (2022).

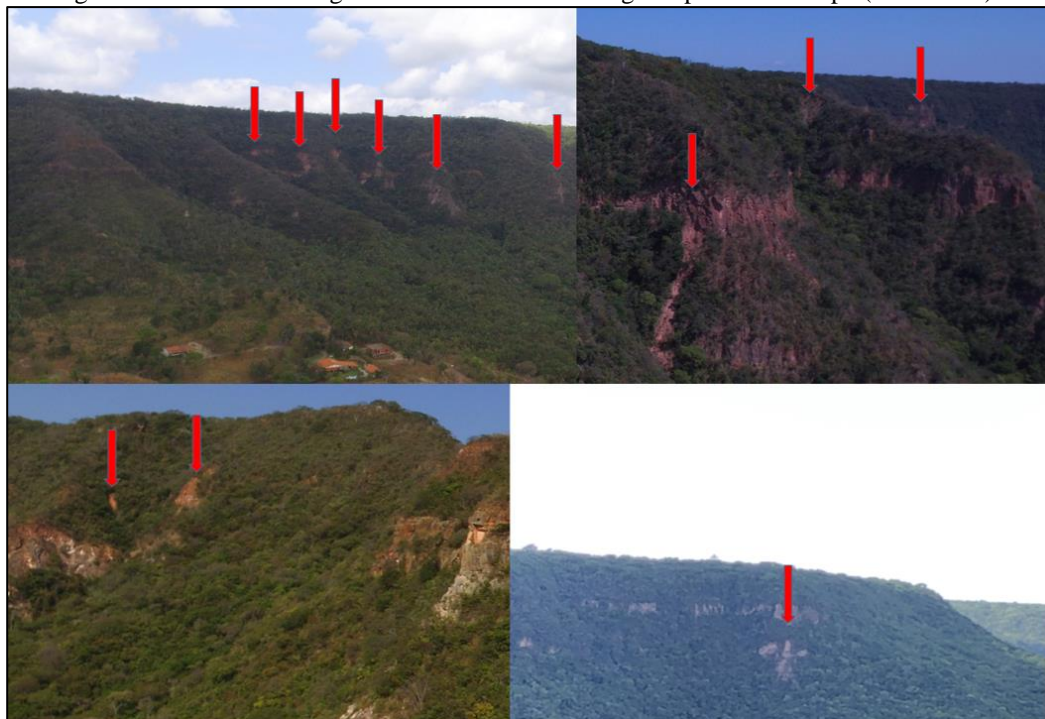
Escorregamentos na face oriental da Chapada do Araripe também foram avaliados por Guerra e Sampaio (1996), Peulvast, Bétard e Magalhães (2011). Para ambos os trabalhos, os processos aconteceram, principalmente, por ocasião das condições fisiográficas naturais da região, relacionadas ao fato de constituir-se como ambiente de exceção.

Peulvast, Bétard e Magalhães (Op. cit.) ao analisarem as condições topográficas e depósitos atribuídos a grandes movimentos de massa a leste da Chapada do Araripe, verificaram que as cicatrizes mais pretéritas relacionam-se ao envolvimento de grandes movimentos de massa nas fases mais antigas de evolução e de recessão da escarpa, os fatores determinantes para a ocorrência desses movimentos estão relacionados às condições litológicas e hidrogeológicas encontradas nas estruturas tabulares da bacia do Araripe. Conforme tais pesquisadores, a identificação das formas e dos depósitos relacionados a movimentos de massa em grande escala na porção leste da Chapada traz evidências sobre a natureza e a distribuição dos eventos pretéritos e dos perigos potenciais na dinâmica atual.

Nesse escopo, o inventário de escorregamentos, conforme defendido por Guzetti et al. (1999) e Remondo et al. (2003), são essenciais para auxiliar a compreender a suscetibilidade da região, pois pressupõe-se que futuros escorregamentos poderão ocorrer nos mesmos locais deflagrados anteriormente.

A Figura 8 mostra um mosaico detalhando algumas cicatrizes ao longo da Chapada do Araripe, obtidas pelo sobrevoo com VANT. Este sobrevoo revelou-se de extrema importância, pois desempenhou um papel significativo na validação do mapeamento realizado. A capacidade de obtenção de imagens aéreas de alta resolução permitiu uma avaliação minuciosa das cicatrizes na região, contribuindo assim para a confirmação e aprimoramento da precisão do mapeamento realizado.

Figura 8- Mosaico detalhando algumas cicatrizes observadas ao longo da Chapada do Araripe (setas vermelhas).
Figure 8 - Mosaic detailing some scars observed along Chapada do Araripe (red arrows).



Fonte: *Dron Cinematic* (2021).
Source: *Dron Cinematic* (2021).

4. Conclusão

A principal contribuição deste trabalho é mostrar o comportamento de cicatrizes de escorregamentos e sua localização em relação a alguns fatores condicionantes. Assim, a partir do inventário, as cicatrizes ocorrem, predominantemente, na região mais escarpada da Chapada, indicando um padrão de comportamento destes processos atualmente. As cicatrizes são em sua maioria inferiores a 500 m², apresentando uma área total aproximada de 24.063 m² o que equivale a um volume total de sedimentos de 36.095 m³, considerando-se uma profundidade de ruptura de 1,5 m.

O inventário produzido poderá auxiliar para a calibração de modelos espaciais para a identificação de áreas suscetíveis a escorregamentos na região da Chapada do Araripe. Os procedimentos metodológicos utilizados permitem o uso conjunto de métodos e análises qualitativas e quantitativas, diretas e indiretas, visando atingir o objetivo proposto.

A integração de técnicas de geoprocessamento, uso de VANTs e atividades de campo, desempenhou um papel crucial na compreensão abrangente e precisa da área estudada. Essa combinação amplia a capacidade de monitoramento e mapeamento, revelando-se essencial para a tomada de decisão.

Deste modo, as técnicas empregadas são satisfatórias e relevantes para a compreensão da dinâmica geomorfológica na Chapada do Araripe e fornecem uma base sólida para um planejamento ambiental mais adequado.

5. Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento da pesquisa. Ao Laboratório e Grupo de Pesquisa em Geotecnologias Aplicadas a Geomorfologia de Encostas e Planícies (ENPLAGEO-UFPE) pela disponibilização do espaço físico e possibilidade de grupos de interação/discussão acadêmica, além de apoio financeiro a partir do Projeto de Pesquisa ligado ao ENPLAGEO “Mapeamento de áreas de risco a escorregamentos, inundações e processos erosivos nas cidades de Recife (PE), Garanhuns (PE), Crato (CE) e São Paulo (SP)” (Edital PROPG nº 02/2021).

6. Referências

Dietrich, W.E.; Bellugi D.; Real de Asuar. (2001). Validation of the shallow landslide model, SHALSTAB, for forest management. in M. S. Wigmosta, and S. J. Burges, editors, **Land Use and Watersheds: Human influence on hydrology and geomorphology in urban and forest areas**, Amer. Geoph. Union, Water Science and Application 2, p.195-227.

Fell, R.; Corominas, J.; Bonnard, C.; Cascini, L.; Leroi, E.; Savage, W. Z. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. **Engineering Geology**, v. 102, 99-111.

Funceme. (2006). **Zoneamento geoambiental do estado do Ceará**: parte II mesoregião do sul cearense. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Fortaleza. 132p.

Guerra, A. J. T.; Sampaio, J. J. A. (1996). Processos Erosivos Acelerados, Movimentos de Massa e Assoreamento na cidade de Crato-Ceará. **Anuário do Instituto de Geociências/UFRJ**, Rio de Janeiro, v. 19, 05-19.

Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M.; Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. **Geomorphology**, 31(1-4), 181-

216.

Guzzetti, F. *et al.* (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. **Earth Science Reviews** 112: 42-66.

Listo, F. L. R.; Nery, T. D.; Bispo, C. O.; Ferreira, F. S.; Santos, E. M. (2022). Movimentos de massa: estado da arte, escalas de abordagem, ensaios de campo e laboratório e diferentes modelos de previsão. In: Osmar Abílio de Carvalho Júnior; Maria Carolina Villança Gomes; Renato Fontes Guimarães; Roberto Arnaldo Trancoso Gomes. (Org.). **Revisões de Literatura da Geomorfologia Brasileira**. 1ed. Brasília: Selo Caliandra, v. 1, 560-592.

Morales, N.; Assine, M. L. (2015). Chapada Do Araripe: A Highland Oasis Incrusted into the Semi-arid Region of Northeastern Brazil. In: VIEIRA, B. C.; SALGADO, A. A. R.; SANTOS, L. J. C. (Orgs.). **Landscapes and Land forms of Brazil**. Dordrecht: Springer.

Nery, T. D.; Vieira, B. C. (2015). Susceptibility to shallow landslides in a drainage basin in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil, predicted using the SINMAP mathematical model. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 74, n. 2, 369–378.

Parise, M. (2001). Landslide mapping techniques and their use in the assessment of the landslide hazard. *Physics and Chemistry of the Earth*. v. 26, n. 9, p. 697-703.

Peulvast, J. Bétard, F.; Magalhães, A. (2011). Scarp morphology and identification of large-scale mass movements in tropical tablelands: the eastern Araripe basin (Ceará, Brazil). **Geomorphologie**, v. 17, 33-52.

Peulvast, J. Bétard, F. (2015). A history of basin inversion, scarp retreat and shallow denudation: The Araripe basin as a keystone for understanding long-term landscape evolution in NE Brazil. **Geomorphology**, v. 233, p. 20-40.

Remondo, J., González, A., Terán, J.R.D. *et al.* (2003). Validation of Landslide Susceptibility Maps; Examples and Applications from a Case Study in Northern Spain. **Natural Hazards** 30, 437–449.

Soeters, R., Van Westen, C.J. (1996). Slope instability recognition, analysis and zonation. In: A.K. Turner & R.L. Schuster (Eds). **Landslides Investigation and Mitigation**. Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247, National Academy Press, Washington, D.C., ISA, 129-177.

Van Westen, C.J., Castellanos Abella, E.A., Kuriakose, S.L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. **Engineering Geology**, 102, 112-131.

Varnes, D.J. (1984). **Landslide hazard zonation: a review of principles and practice**. UNESCO; Paris. 63 p.