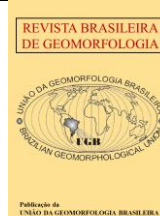




<https://rbgeomorfologia.org.br/>
ISSN 2236-5664



Artigo de Pesquisa

Erosão em áreas suscetíveis a desertificação no Semiárido: possibilidades de análise por meio da cartografia geomorfológica baseada em imagens de altíssima resolução

Erosion in areas susceptible to desertification in the semi-arid region: possibilities of analysis through geomorphological mapping based on very high-resolution images

Kleber Carvalho Lima¹, Cenira Maria Lupinacci², Daniel Dantas Moreira Gomes³, Sirius Oliveira Souza⁴ e Fernando da Silva Alexandre⁵.

¹ Universidade de Pernambuco (UPE), Departamento de Geografia, *Campus* de Garanhuns-PE, Brasil. E-mail: kleber.carvalho@upe.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9468-2473>

² Universidade Estadual Paulista (UNESP), Departamento de Geografia e Planejamento Ambiental, *Campus* de Rio Claro-SP, Brasil. E-mail: cenira.lupinacci@unesp.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4732-1421>

³ Universidade de Pernambuco (UPE), Departamento de Geografia, *Campus* de Garanhuns-PE, Brasil. E-mail: daniel.gomes@upe.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6868-040X>

⁴ Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Colegiado de Geografia, *Campus* de Senhor do Bonfim-BA, Brasil. E-mail: sirius.souza@univasf.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8831-5709>

⁵ Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Programa de Pós-graduação em Geografia, Recife-PE, Brasil. E-mail: fnando257@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0896-9433>

Recebido: 18/11/2022; Aceito: 27/12/2022; Publicado: 01/06/2023

Resumo: No semiárido brasileiro, a erosão tem comprometido a capacidade produtiva dos solos e desencadeado graves fenômenos socioambientais nas áreas consideradas desertificadas. Faz-se necessário estudos que permitam a compreensão da erosão em nível de detalhe, de forma a contribuir com ações de planejamento, gestão e recuperação ambiental dessas áreas. Nesse trabalho, a erosão foi analisada em uma bacia hidrográfica experimental com área de 2,92 km², localizada no estado de Pernambuco. A partir de produtos de altíssima resolução, derivados de sensores LiDAR, ARP e trabalhos de campo, foram elaboradas a carta de feições erosivas lineares e a carta de morfoconservação. Foram identificadas 600 incisões erosivas com extensão total de 41,6 km, conectadas em rede e associadas a solos expostos. Em alguns setores, os horizontes superficiais do solo foram completamente removidos. Por outro lado, a erosão foi retardada onde há biocrosta e vegetação arbustiva. Embora as reais causas da desertificação nesta bacia ainda não sejam conhecidas, acredita-se que o avançado estágio de degradação esteja relacionado a fatores complexos, naturais e antropogênicos. Assim, considera-se que a metodologia utilizada pode ser replicada para outros contextos e nortear ações de preservação e recuperação de áreas erodidas.

Palavras-chave: Erosão linear; Mapeamento geomorfológico; Morfoconservação; LiDAR; ARP.

Abstract: In the Brazilian semi-arid region, erosion has already compromised the productive capacity of soils and generated serious socio-environmental phenomena in desertified areas. In this paper, we analyzed soil erosion in an experimental

watershed with area of 2.92 km², located in the Pernambuco State. From very high-resolution products derived from LiDAR sensors, UAV and field work, we produced the linear erosion map and the morphoconservation map. We identified 600 linear erosion features with a total length of 41.6 km, networked and associated with exposed soils. In some sectors, the surface horizons of soil were completely removed. On the other hand, erosion has been delayed where there is biocrust and shrubby vegetation. Although the real causes of desertification in this watershed are not yet known, we believe that erosion is related to complex, natural and anthropogenic factors. Thus, our methodology can be applied to other contexts and guide actions for the preservation and recovery of eroded areas.

Keywords: linear erosion; Geomorphological mapping; Morphoconservation; LiDAR; UAV.

1. Introdução

A erosão, seja hídrica ou eólica, podem ser consideradas como processos comuns em regiões semiáridas, tornando-se um agravante quando intensificadas pela degradação do ambiente. Nessas regiões, a degradação pode ocorrer por formas de uso e manejo inadequados desenvolvidos ao longo de décadas e séculos, que levam à redução do potencial agrícola, degradação da biomassa e contribuem para a desertificação (DREGNE, 2002; AVNI et al., 2006; ZWEIG et al., 2018; GAD, 2020; AFZALI et al., 2021). Entretanto, a problemática figura-se mais agravante quando nas áreas afetadas por processos erosivos acelerados, as populações que dependem da terra para o seu sustento precisam migrar para outras regiões (MYERS, 2002; D'ODORICO et al., 2013). No semiárido brasileiro, a degradação das terras constitui-se em uma das principais questões ambientais a serem enfrentadas no Século XXI (NOBRE, 2011; VIEIRA et al., 2021), uma vez que está atrelada, dentre diversos outros fatores, à erosão dos solos (ALENCAR; ARAÚJO; TEIXEIRA, 2020; MACEDO et al., 2021). Os processos erosivos em suas diferentes modalidades, têm comprometido a capacidade produtiva dos solos nas regiões onde a degradação já ocorre, favorecendo o estado de vulnerabilidade das populações que dependem da agricultura para a sua sobrevivência (SANTOS, 2019; SIMPLÍCIO et al., 2021).

No zoneamento da suscetibilidade à desertificação realizado no estado de Pernambuco (SEMAS, 2020), em função da Lei estadual n 14.091 (PERNAMBUCO, 2010), os dados apontaram que porções consideráveis do semiárido apresentavam níveis acentuados e severos de suscetibilidade a desertificação. Em diversos contextos regionais e locais, processos erosivos intensos são frequentes, associados às áreas que apresentam níveis severos de suscetibilidade, a exemplo dos municípios pertencentes ao Núcleo de Desertificação de Cabrobó. Nestas áreas, trabalhos anteriores (XAVIER et al., 2019; XAVIER et al., 2020; BARBOSA NETO et al., 2020) investigaram processos erosivos associados ao uso e manejo inadequado da terra sob diferentes abordagens teórico-metodológicas. Assim, torna-se fundamental a análise da erosão sob várias perspectivas e através do uso de outras metodologias de análise, de forma a subsidiar a elaboração de diagnósticos e prognósticos ambientais com ênfase na erosão.

Sobre esse aspecto, a Geomorfologia pode contribuir para o entendimento de áreas degradadas por erosão e o seu grau de fragilidade (PRĂVĂLIE et al., 2020; BACHRI et al., 2021; NIKPOUR et al., 2022; JAAFARI et al., 2022), a partir de metodologias de análise que permitam a elaboração de diagnósticos e forneçam subsídios a ações de recuperação ambiental (CHELI, 2021). A cartografia geomorfológica, então, constitui-se em uma importante ferramenta ao possibilitar a interpretação de formas de relevo que indicam processos dinâmicos naturais e/ou antrópicos (LATOCHA, 2009; BISHOP et al., 2012), bem como a sua alteração ao longo do tempo. Quando realizado em nível de detalhe, o mapeamento geomorfológico fornece dados sobre o arranjo espacial e o grau de evolução das feições erosivas, permitindo análises complexas em grandes escalas, por meio de tecnologias espaciais.

Nas últimas décadas, variadas tecnologias vêm sendo empregadas no levantamento de dados espaciais de alta resolução, especialmente para a compreensão e monitoramento de processos geomorfológicos em diferentes contextos (KOCI et al., 2017; KRENZ; GREENWOOD; KUHN, 2019; SIDLE et al., 2019; FORNO et al., 2022; XU et al., 2022). Dentre essas tecnologias, sensores remotos ativos tendo o laser como fonte de energia própria (*Light Detection and Ranging* – LiDAR), fotogrametria digital, estrutura por movimento (*Structure-from-Motion*- SfM) e aeronaves remotamente pilotadas (ARP), fornecem um amplo espectro de dados que possibilitam a obtenção de dados digitais de alta precisão (NICULIȚĂ; MĂRGĂRINT; TAROLLI, 2020). Devido à sua alta resolução e precisão, as aplicações dessas tecnologias são difundidas na análise de diferentes processos e formas erosivas (D'OLEIRE-OLTMANN et al., 2012; RADEMANN; TRENTIN, 2020; COSTA et al., 2020; ALEXANDRE;

CANDEIAS; GOMES, 2021; BEKIN et al., 2021; PETSCH et al., 2022), a exemplo da erosão linear, que apresenta grandes variações ao longo do tempo, e envolve processos responsáveis por uma morfologia complexa, que podem ser detectadas em modelos digitais do terreno (MDT) e ortoimagens.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é analisar formas de relevo que indicam ações erosivas em cenários com avançado estágio de degradação ambiental, associados a desertificação no Semiárido brasileiro, por meio de documentos cartográficos derivados de propostas metodológicas vinculadas a cartografia geomorfológica de detalhe. Busca-se ainda, avaliar os produtos utilizados, além da aplicabilidade das cartas como instrumentos técnicos que possam contribuir com ações de planejamento, gestão e recuperação ambiental em contextos de degradação por processos erosivos. Para tanto, foi selecionada uma bacia hidrográfica experimental no município de Floresta (Pernambuco), por apresentar extensas áreas erodidas (PEREZ-MARIN et al., 2012; LOPES; SOARES, 2016), com níveis severos de suscetibilidade a desertificação (SEMAS, 2020).

2. Área de Estudo

A área de estudo está situada em Floresta, Semiárido de Pernambuco (Figura 1), município integrante do Núcleo de Desertificação de Cabrobó (INSA, 2014). O clima é semiárido com precipitações em torno de 400 mm/ano e temperatura média anual de 24°C. As chuvas são irregulares temporal e espacialmente, com longos períodos de estiagem que acarretam a escassez de recursos hídricos (BRASIL, 2004).

Regionalmente, o embasamento é composto por rochas cristalinas do Paleoproterozóico ao Neoproterozóico com ocorrência de falhas, traços de lineamentos e feições de deformação associadas à Zona de Cisalhamento Pernambuco (BRASIL, 2018). Ocorrem ortognaisses da Suíte Metamórfica Floresta-Airi; biotita, gnaisses com intercalações de quartzitos, mármore e formações ferríferas do Complexo Sertânia; gnaisses quartzo-feldspático com intercalações de rochas metavulcânicas e metamáficas do Complexo São Caetano; migmatitos com intercalação de rochas metamáficas e metaultramáficas do Complexo Belém do São Francisco; gnaisses migmatíticos com intercalações de quartzitos, mármore e rochas máficas a ultramáficas metamorfizadas pertencentes ao Complexo Cabrobó-Ibó e; biotita-anfibólio, granitos e granodioritos da Suíte Intrusiva Itaporanga (BRASIL, 2018).

Sobre os terrenos cristalinos, desenvolveu-se uma vasta superfície de aplainamento (Figura 2) com altitudes entre 300 e 560 metros e declividades predominantemente entre 0 e 5%, inserida na Depressão Sertaneja. Ocorrem pedimentos recobertos por Planossolos e Luvisolos; e inselbergues, com ocorrência de Neossolos litólicos e Neossolos Regolíticos. Em geral, são solos rasos, mal drenados, com baixa permeabilidade, mudança textural abrupta e com alta concentração de sais, favorecendo a remoção dos horizontes superficiais por ação do escoamento superficial difuso (BARBOSA NETO et al., 2020). Nesse contexto, as argilas expansivas do horizonte B são flocladas e facilmente transportadas, havendo o acúmulo de seixos que dão origem aos pavimentos detríticos. Os sais, por sua vez, ao se associarem com as argilas por capilaridade, contribuem para a formação de crostas que diminuem a permeabilidade dos solos (PESSOA, 2012) e favorecem a erosão linear.

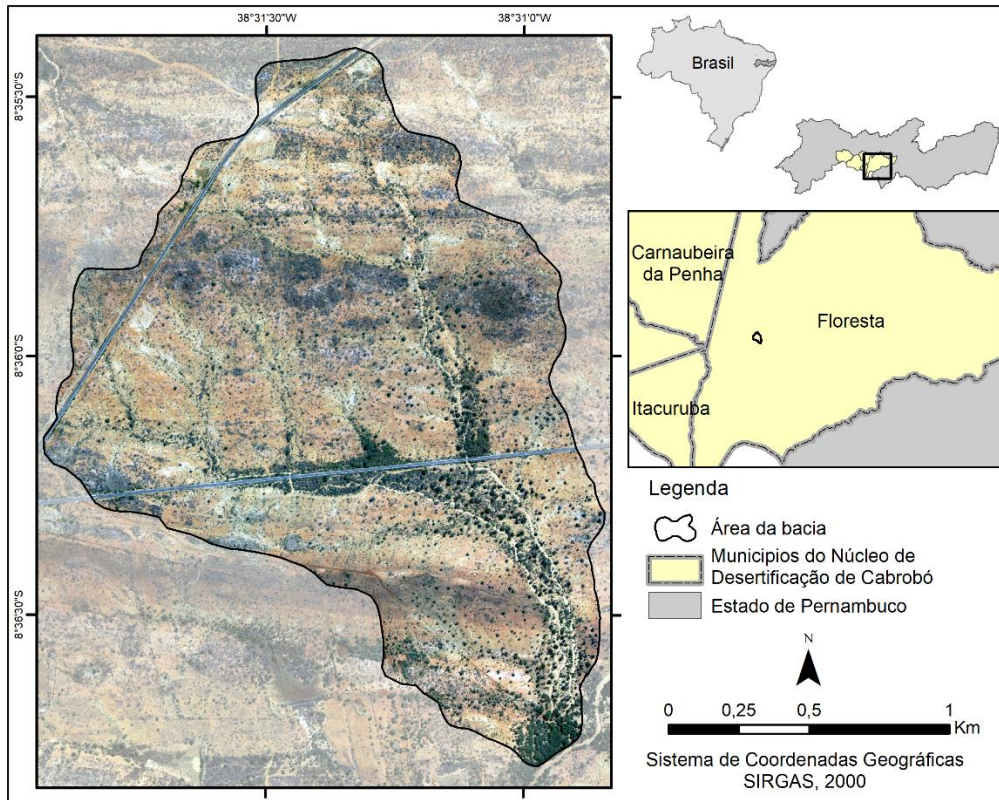


Figura 2. Vista geral da área em estudo, inserida na superfície de aplainamento que compõe a Depressão Sertaneja. Fonte: trabalho de campo realizado em outubro de 2022.

3. Materiais e Métodos

3.1. Produtos derivados do LiDAR

Foram obtidos produtos de alta resolução do ano de 2016, gerados por perfilamento a laser, produzidos pelo Projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D), desenvolvido pela Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco e disponibilizado gratuitamente pela Agência Pernambucana de Águas e Clima - APAC. Utilizou-se para a identificação e extração das feições erosivas e demais elementos, ortoimagens com resolução de 1x1 m e MDT com resolução de 0,5x0,5 m (Figura 3).

A partir do MDT, foram extraídas curvas de nível (equidistância de 5 e de 1 metro), e foram gerados dois sombreamentos do relevo no software @ArcGIS 10.6.1. O sombreamento com azimute 45° e altitude 30° foi sobreposto com transparência de 50% ao sombreamento com azimute 315° e altitude 45°, com o objetivo de realçar e melhor definir visualmente as incisões (ĐOMLIJA et al., 2019). O mapeamento das feições erosivas lineares foi realizado de modo semiautomático, empregando-se o método de interpretação visual por composição de informações (MOHAMMADKHAN; AHMADI, 2011; ZHANG; LIU, 2019).

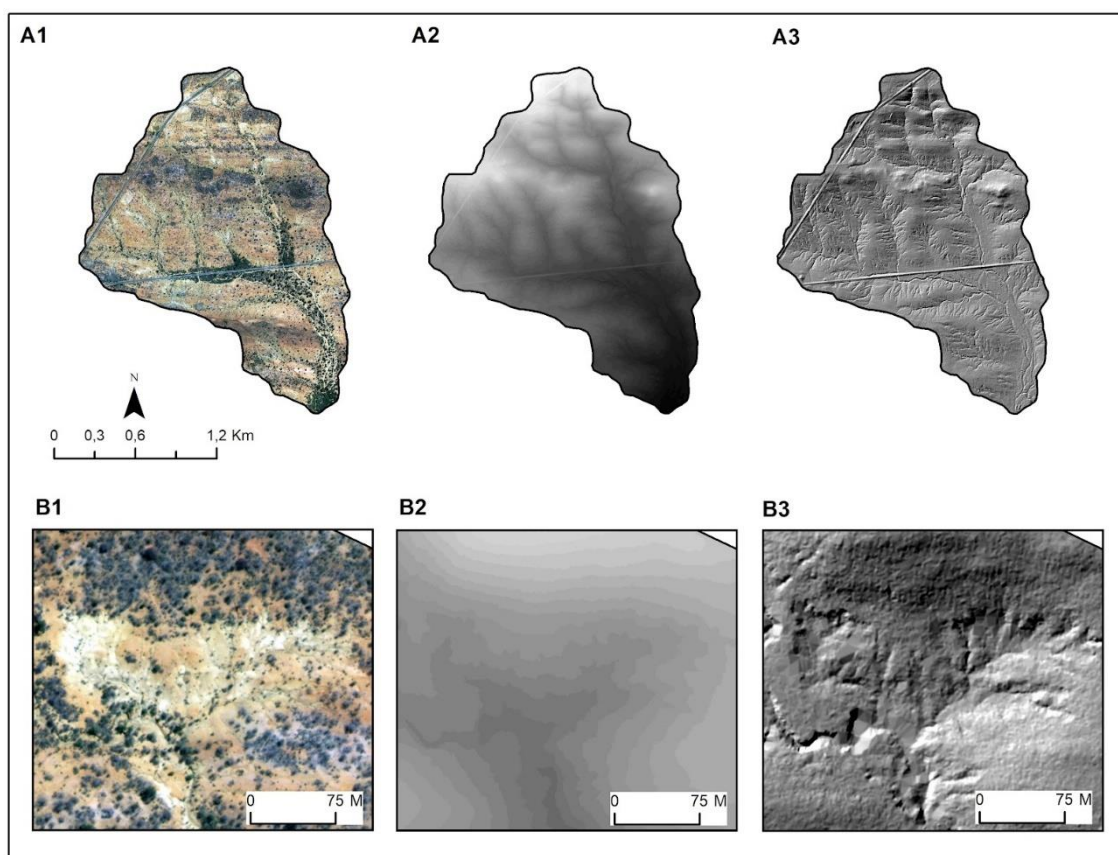


Figura 3. Produtos do PE3D, recortados para a área de estudo: ortoimagem (A1) e MDT (A2), além de sombreamento do relevo (A3), gerado a partir do MDT. De B1 a B3, trecho representativo da bacia com visualização dos produtos em detalhe.

3.3. Aerolevantamento com ARP

Para a obtenção dos dados necessários a identificação das feições lineares, utilizou-se ARP e um par de GNSS de precisão (L1/L2). O levantamento aerofotogramétrico com a ARP seguiu a técnica de estrutura a partir do movimento - Structure-from-motion (WESTOBY et al., 2012; JAMES et al., 2019; CÂNDIDO et al., 2020; MEINEN; ROBINSON, 2020a, 2020b). A partir da definição do nível de detalhe, foi realizada a etapa de campo, considerando as condições meteorológicas e o horário para a realização do voo, tendo em vista que quanto mais próximo o horário for do sol no zênite, menor será o sombreamento nos produtos gerados. A aeronave utilizada para a aquisição das imagens foi o Mavic Pro, com câmera de 12 megapixel (imagens com dimensões de 4.000 × 3.000). O

vo foi realizado a uma altura relativa ao solo de 60 m e sobreposição lateral e frontal de 75%. Ao todo, foram capturadas 992 imagens da área.

De modo a garantir acurácia dos produtos gerados, foram coletados 9 pontos de controle (PC) em solo com o GNSS, a partir do método RTK (Real Time Kinematic - cinemático em tempo real). Definiu-se que todos os PC seriam coletados unicamente se a solução fosse fixa e com o desvio padrão menor que 0,8 cm na horizontal e 1 cm na vertical. Posteriormente, a acurácia dos pontos GNSS foi corrigida a partir do processamento do ponto do receptor base, através do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), disponibilizado pelo IBGE. Em seguida todos os pontos foram individualmente processados para a conversão da altitude geométrica em ortométrica pelo Datum vertical oficial do Brasil, o hgeoHNOR. Pelo tamanho da área, obteve-se para todos os pontos o valo único de conversão de -9,55 m com incerteza de 0,06 m. Tal transformação se faz necessária tendo em vista que a influência gravitacional é indispensável quando se trata de processos erosivos. Com os PC corrigidos, utilizou-se o software Agisoft Metashape Pro para a geração da nuvem de pontos densa, do modelo digital de superfície e do ortomosaico, todos georreferenciados com acurácia total inferior a 2 cm.

3.2. Propostas metodológicas de mapeamento geomorfológico em escala de detalhe

Para este cenário, elaborou-se a carta de feições erosivas lineares e a carta de morfoconservação. A carta de feições erosivas lineares foi desenvolvida a partir de adaptações da proposta de Stefanuto (2019). Considerada como um produto de síntese, esta carta permite ao leitor compreender a distribuição espacial das feições erosivas lineares em uma determinada área e suas relações com elementos potencialmente associados ao desenvolvimento de processos erosivos locais. Neste caso, os elementos foram representados em escala 1:5.000. Com base na carta de feições lineares, foi selecionado um setor representativo para a aplicação da segunda proposta.

A carta de morfoconservação é uma proposta de mapeamento geomorfológico de detalhe apresentada pelo *International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences - ITC (VERSTAPPEN; ZUIDAM, 1975)*. Com foco na conservação dos terrenos, essa proposta compreende que as modalidades de uso da terra podem desencadear e/ou acelerar processos morfodinâmicos de gênese erosiva. Assim, a representação das formas vinculadas a processos erosivos apresenta aspectos que permitem a compreensão do estágio evolutivo. No contexto da área de estudo, a carta de morfoconservação foi elaborada em escala 1:1.000, com adaptações dos elementos representados e respectivas simbologias.

Dessa forma, os agrupamentos temáticos apresentados na carta, foram: [i] elementos gerais – divisor de água, declividade da vertente, curva de nível e canal de drenagem; [ii] uso e cobertura da terra; [iii] formas e processos erosivos gerais; [iv] erosão linear. Como feições derivadas de escoamento difuso, considerou-se as marcas sobre o solo exposto que demonstram a transição entre o escoamento superficial difuso e o escoamento concentrado. Quanto à erosão linear, as feições foram classificadas de acordo com o arranjo espacial, sendo representadas em três modalidades: [a] incisão conectada a outra; [b] incisão conectada ao canal fluvial e; [c] incisão desconectada do canal fluvial.

Optou-se pela utilização do termo incisão para generalizar as diferentes classes de erosão linear, uma vez que os limites entre as diferentes modalidades (sulco, ravina e voçoroca), são difíceis de serem estabelecidos no semiárido, além de serem vagos e imprecisos (POESEN et al., 2002). Conforme pode ser observado na Figura 4A, nos produtos derivados de sensores LiDAR utilizados nesta pesquisa, há possibilidade de imprecisão na distinção de tais feições. Por outro lado, as incisões fluviais foram distinguidas das demais, a partir de critérios visuais das imagens, como cor, textura e sombra, bem como indicativos de feições erosivas e deposicionais no leito. Nas imagens obtidas com ARP, ravinhas e voçorocas foram identificadas (Figuras 4b – 4e), a partir de critérios dimensionais (SSSA, 2008), complementadas com dados obtidos em campo.

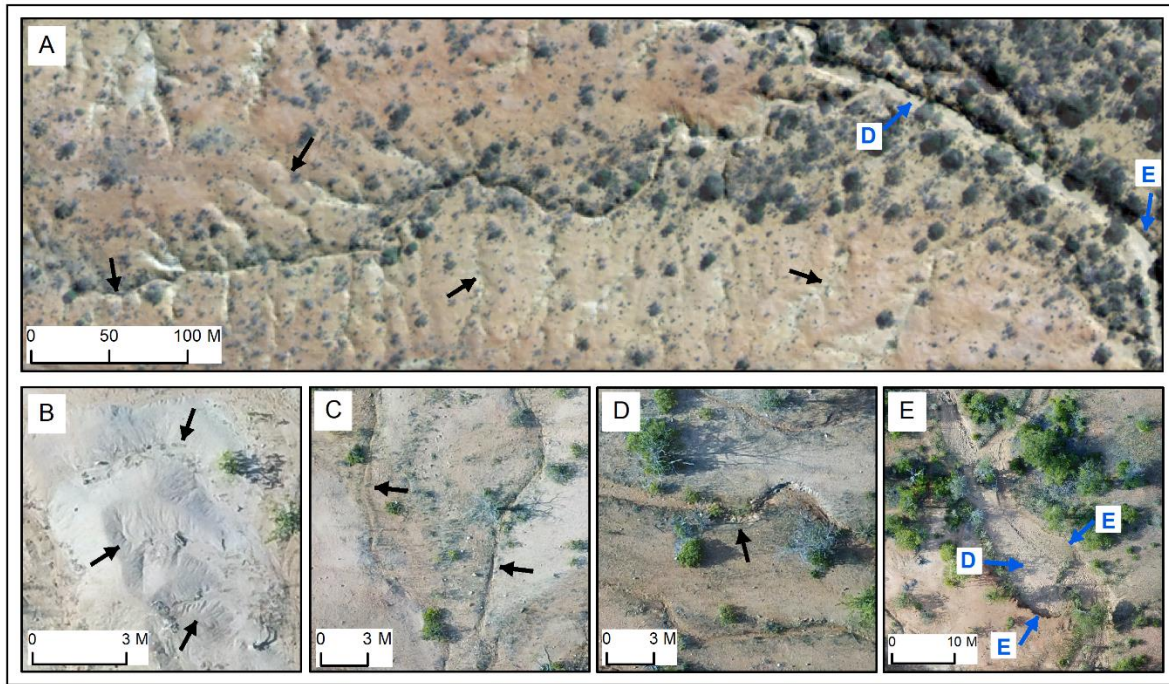


Figura 4. Modalidades de incisão erosiva (seta preta) e incisão fluvial (seta azul): erosões lineares e canal fluvial efêmero com indicação de formas erosivas e deposicionais em imagens de sensor LiDAR (a); incisões em imagens obtidas com ARP – feições derivadas de escoamento difuso (b); ravina (c); voçoroca (d) e canal fluvial com indicação de formas erosivas e deposicionais (e).

4. Resultados e discussões

A partir dos produtos derivados do LiDAR, foram obtidos aspectos quantitativos (Tabela 1), que permitiram a análise do grau de desenvolvimento das feições lineares no contexto geral da bacia, e correlações entre as variáveis associadas as feições lineares. Esses dados convergiram com dados obtidos por Barbosa Neto et al. (2020) e Xavier et al. (2020), em outras áreas do Núcleo de Desertificação de Cabrobó, que apontaram, sob outras abordagens teórico-metodológicas, o avançado estágio de degradação regional dos terrenos por erosão.

Tabela 1. Aspectos quantitativos levantados para a bacia do riacho Floresta (PE).

Parâmetro	Unidade de medida	Resultado
Área	km ²	2,92
Perímetro	km	7,58
Número de feições lineares	-	600
Densidade de feições lineares	n ^o /m ²	205,4
Extensão total das feições lineares	km	41,6
Extensão média das feições lineares	m	69,4
Extensão máxima das feições lineares	m	620,2
Extensão mínima das feições lineares	m	7,43
Área com solo exposto	m ²	1.892
Densidade de feições lineares/área de solo exposto	n ^o /m ²	31,7

A densidade de feições lineares por área de solo exposto expressou o alto grau de vulnerabilidade do terreno sem cobertura vegetal, onde a baixa profundidade dos Luvisolos Crômicos e a transição abrupta entre os horizontes superficiais e o horizonte B dos Planossolos, favorecem o escoamento superficial difuso na bacia. A extensão média das incisões na bacia experimental demonstrou o estágio avançado de evolução, onde grande parte das feições encontram-se conectadas em rede. De acordo com Sun et al. (2013), o comprimento das incisões é reconhecido como um índice que demonstra o grau de severidade dos processos erosivos, evidenciado na bacia experimental, pela extensão total das feições lineares.

Quanto a distribuição espacial da erosão linear, constatou-se por meio do mapeamento em escala 1:5000, a maior incidência no setor central, seguido pelo setor norte (incisões com menor extensão), em contraponto ao setor sul, onde predominam as feições mais extensas (figura 5). O setor norte apresenta maior desnível topográfico entre os topos e vales (Figura 3-A3), assim como uma frequência maior de incisões, associadas as áreas com solo exposto. Observou-se que diversas incisões nos setores norte e central, se iniciam nas proximidades da rodovia, o que pode ser considerado um elemento potencializador para a formação de erosão (MOHAMMADKHAN; AHMADI, 2011).

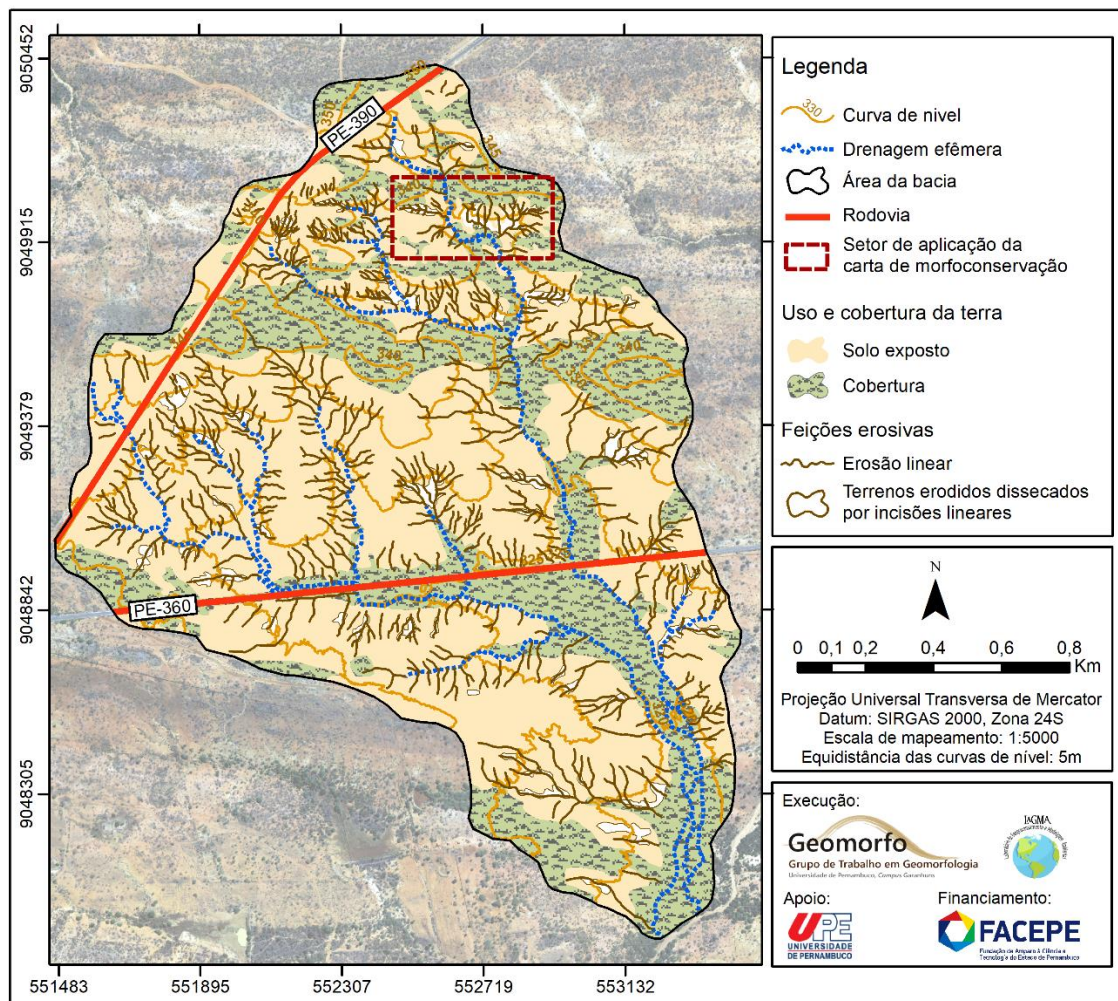


Figura 5. Carta de feições erosivas lineares da área de estudo (2016), elaborada a partir de imagens LiDAR.

Verificou-se por meio da carta de morfoconservação (Figura 6), que nas vertentes com declividade suave, as áreas de solo exposto se estenderam dos divisores de água até os canais de drenagem, com formação de extensas incisões. Em vertentes com maior gradiente, os solos expostos se estenderam do terço médio às drenagens, com incisões apresentando maior número de bifurcações. O setor mais declivoso, no quadrante nordeste, que atinge 8% de inclinação, é marcado por crenulações das curvas de nível as quais se devem a frequência das incisões. Essas crenulações corresponderam também à micro topografia do terreno, que favorece a concentração do fluxo hortoniano, cisalhamento do solo e, conseqüentemente, causa a formação de erosão linear (WELLS; MOMM; CASTILLO, 2017; SIDLE et al., 2019).

Quanto ao arranjo espacial, predominaram incisões erosivas organizadas em rede, integradas aos canais de drenagem fluvial. Esse padrão pode ser interpretado como resposta à conectividade vertente-canal (HOOKE, 2003; SOUZA; HOOKE, 2021), onde há a transferência sazonal de sedimentos entre esses locais através de fluxos hidrológicos resultantes de eventos pluviométricos significativos, durante a estação chuvosa. Como apontado por Souza e Corrêa (2020), a conectividade controla a evolução dos ambientes fluviais, as dinâmicas da paisagem como um todo, assim como o seu potencial de recuperação. Nesse sentido, acredita-se que a erosão acentuada tem como fatores locais os solos erodíveis, associados a cobertura vegetal esparsa e amplas áreas com solo exposto. Essa combinação promove a formação de trechos dissecados pelo escoamento superficial e pelo escoamento concentrado. Os terrenos classificados como erodidos, dissecados por incisões lineares, são caracterizados pela remoção dos horizontes do solo, que expõe, tanto o horizonte B, quanto o horizonte C e a rocha. Esses terrenos favorecem a geração e concentração de escoamento em declive, mesmo nos gradientes muito suaves, cujas feições lineares são as mais extensas na área de estudo, havendo a formação de headcut (cabecейras).

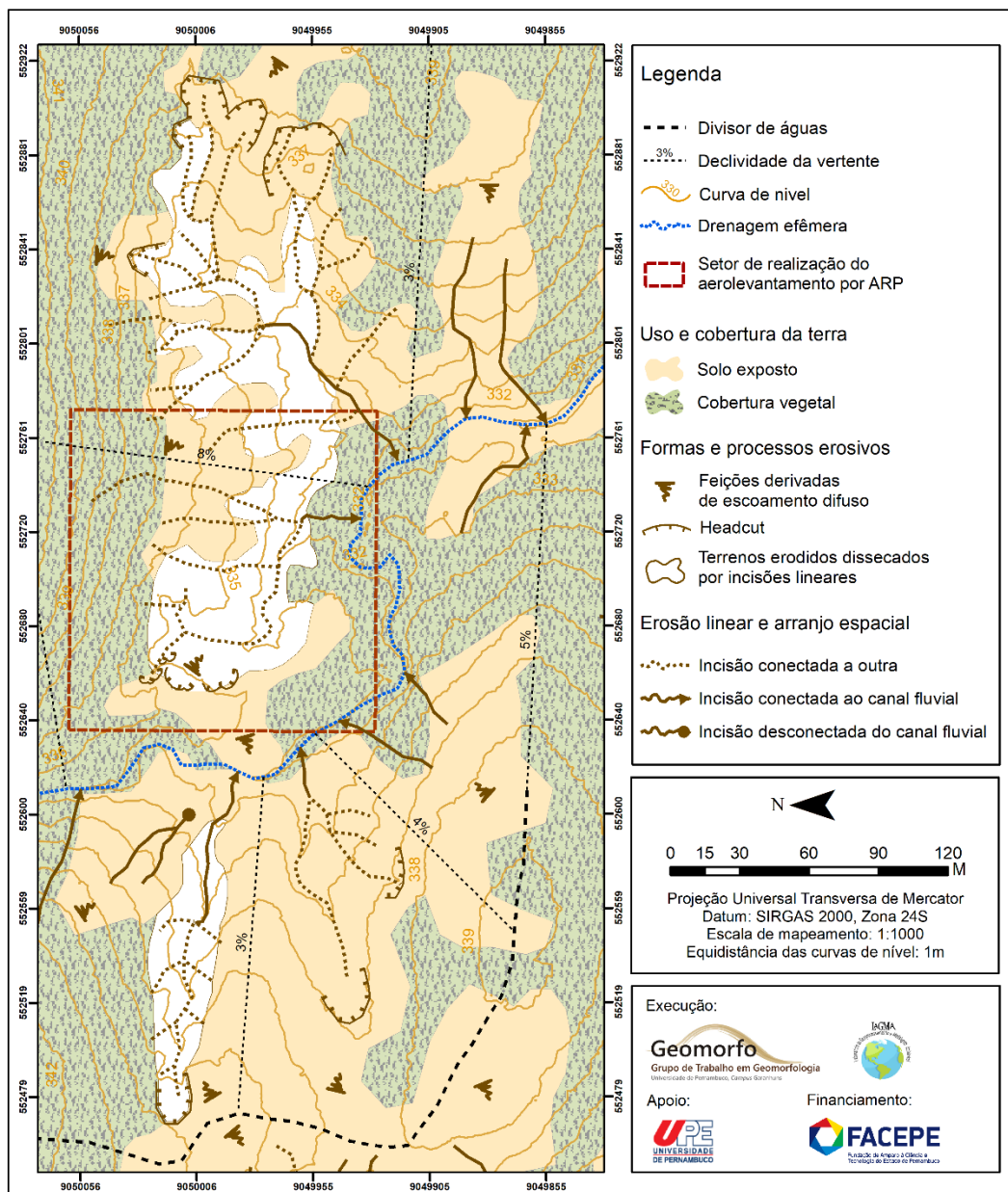


Figura 6. Setor representativo da Carta de Morfoconservação (2016), elaborada a partir de imagens LiDAR.

Outros componentes associados aos processos erosivos na bacia experimental foram possíveis de serem identificados em maior nível de detalhe, a partir das imagens obtidas com ARP (figura 7). Nessa escala, foi possível identificar que a vegetação ocorre em estrato arbustivo e herbáceo, entremeadas a crostas biológicas e clareiras de

solo exposto com pavimento detritico. Headcut's demarcam as áreas com remoção dos solos, onde os terrenos dissecados pelas incisões, apresentam remanescentes que testemunham a severidade dos processos erosivos na bacia experimental.

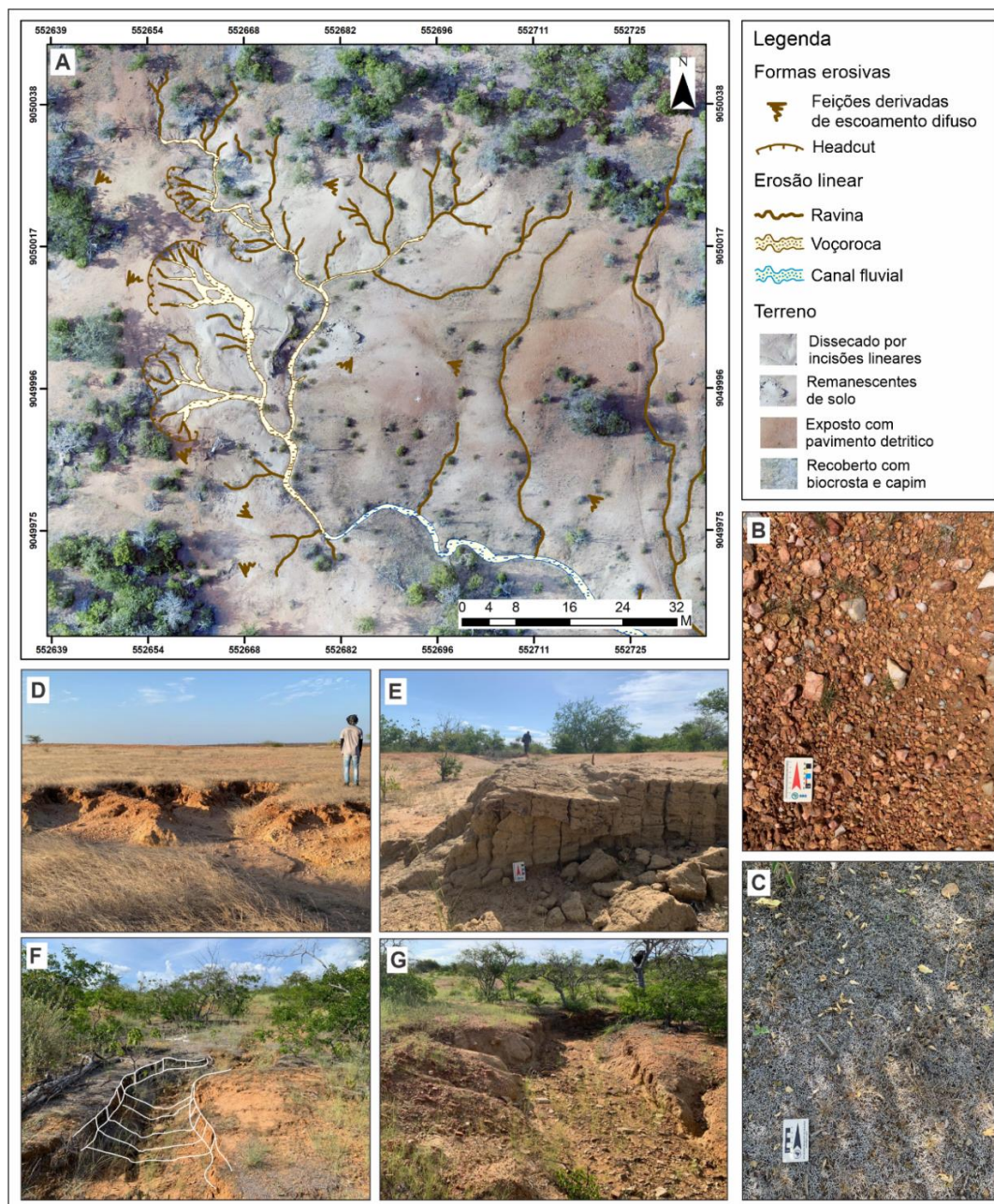


Figura 7. Imagem obtida com ARP de setor representativo da bacia experimental (a), com ocorrência de pavimento detritico (b); biocrosta (c); headcut (d); remanescentes de solo (e); ravinas (f); e voçorocas (g). Fonte: trabalhos de campo realizados em março e outubro de 2022.

No contexto da bacia experimental, considera-se que a erosão atual resultou da pré-disposição natural do ambiente que favorece o balanço denudacional positivo frente aos processos pedogenéticos, além do uso inadequado que priorizou o cultivo de pastagens para a criação de gado (ARAÚJO FILHO et al., 2001). A pressão exercida por essa atividade excedeu a capacidade de suporte dos solos e alterou as propriedades do solo, favorecendo a sua degradação e o desenvolvimento de processos erosivos acentuados. A remoção das camadas superficiais e perda das estruturas dos solos verificados na área, apontaram para níveis severos de desertificação, cujas possibilidades de recuperação ambiental são pequenas.

5. Conclusões

A representação cartográfica da erosão a partir das propostas utilizadas, possibilitou compreender-se a erosão e o seu grau de evolução na bacia analisada, bem como evidenciou a fragilidade dos terrenos em diferentes escalas de análise, a partir da carta de feições erosivas lineares e da carta de morfoconservação, elaboradas com base nos produtos derivados do LiDAR, além das ortoimagens obtidas com ARP. Entende-se, desse modo, que os produtos derivados de sensores remotos utilizados nesta pesquisa, apresentaram desempenho satisfatório, ao favorecerem a identificação e interpretação de feições erosivas que dificilmente seriam visualizadas em produtos com resolução inferior.

Tendo em vista os aspectos identificados por meio das duas cartas, como a espacialização das feições erosivas, quantificação de elementos relacionados à erosão, identificação de setores mais críticos e a análise conjunta com outros componentes da paisagem; considera-se que ambas podem ser utilizadas como instrumentos técnicos que contribuam para ações de planejamento e gestão de áreas degradadas, bem como com projetos que visem a recuperação de áreas intensamente afetadas por processos erosivos. Desse modo, pode-se definir, por exemplo, os setores que devem ser preservados, sem manejo ou com manejo restrito do solo, ou ainda, os setores cuja recuperação deve ser prioritária.

Observa-se que os dados obtidos nessa área são representativos do grau de vulnerabilidade à erosão, aos quais diferentes setores do Núcleo de Desertificação de Cabrobó estão submetidos, sendo necessária a ampliação das áreas mapeadas nesse nível de detalhe, a partir das técnicas empregadas ou adaptação dessas.

Assim, acredita-se que o desenvolvimento de produtos cartográficos com base geomorfológica para a compreensão de processos erosivos é essencial para a gestão dos recursos naturais, podendo ser desenvolvidos para outros cenários cuja erosão apresente relação com a fragilidade natural dos terrenos e/ou com a degradação provocada por fatores antrópicos.

Contribuições dos Autores: Kleber Carvalho Lima contribuiu com a concepção da pesquisa, organização e participação nos trabalhos de campo, organização e discussão dos dados e com a redação do manuscrito. Cenira Maria Lupinacci contribuiu com a concepção da pesquisa, organização e discussão dos dados e com a redação do manuscrito. Daniel Dantas Moreira Gomes contribuiu com os trabalhos de campo e com a organização e discussão dos dados. Sirius Oliveira Souza contribuiu com os trabalhos de campo e com a discussão dos dados. Fernando da Silva Alexandre contribuiu com os trabalhos de campo e com a redação do manuscrito.

Financiamento: Esta pesquisa recebeu auxílio a projeto de pesquisa da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), processo nº APQ-0899-7.06/21. Ao quinto autor, foi concedida bolsa na modalidade Pós-graduação pela Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), processo nº IBPG 0723-7.06/21.

Agradecimentos: Os autores agradecem à Universidade de Pernambuco e à Universidade Federal do Vale do São Francisco pelo apoio logístico nos trabalhos de campo, ao doutorando Renilson Ramos (Universidade Federal do Ceará – UFC), e aos discentes Ilamar Silva e Sidney Silva (Universidade de Pernambuco – UPE), pelo suporte nas atividades de campo.

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

1. AFZALI, S. F; KHANAMANI, A.; MASKOONI, E. K.; BERNDTSSON, R. Quantitative Assessment of Environmental Sensitivity to Desertification Using the Modified MEDALUS Model in a Semiarid Area. *Sustainability*, v. 13, n.14, 2021, p. 817. DOI: 10.3390/su13147817
2. ALENCAR, P.H. L.; ARAÚJO, J.C.; TEIXEIRA, A.S. Physically based model for gully simulation: application to the Brazilian semiarid region. *Hydrology and Earth System Science*, 24, p. 4239–4255, 2020. DOI: 10.5194/hess-24-4239-2020
3. ALEXANDRE, F. S.; CANDEIAS, A. L. B.; GOMES, D. D. M. Análise das mudanças morfológicas em escala de detalhe em voçoroca urbana utilizando perfilamento a laser e veículo aéreo não tripulado. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 14, n. 02, p. 758-769, 2021. DOI: 10.26848/rbgf.v14.2.p758-769
4. ARAUJO FILHO, J.C.; SILVA, A.B.; SILVA, F.B.R.; LEITE, A.P. **Diagnóstico ambiental do Município de Floresta, Pernambuco**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2001. 20 p. Circular técnica 10.

5. AVNI, Y.; PORAT, N.; PLAKHT, J.; AVNI, G. Geomorphic changes leading to natural desertification versus anthropogenic land conservation in an arid environment, the Negev Highlands, Israel. **Geomorphology**, v. 82, n. 3-4, p. 177-200, 2006. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.05.002
6. BACHRI, S.; IRAWAN, L. Y.; FATHONI, M. N.; FAWAID, A. M.; NURAINI, S. G.; UTOMO, K. S. B.; ALDIANTO, Y. E. Developing land capability to reduce land degradation and disaster incident in Bendo Watershed, Banyuwangi. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2021. p. 012004. DOI: 10.1088/1755-1315/630/1/012004
7. BARBOSA NETO, M.V.; ARAÚJO, M.S.B.; ARAÚJO FILHO, J.C.; SAMPAIO, E.V.S.B.; ALMEIDA, B.G. Rill and sheet soil erosion estimation in an area undergoing desertification in the Brazilian semi-arid region. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 6, p. 1-9, 2020. DOI: 10.1007/s40808-020-01026-y
8. BEKIN, N.; PROIS, Y.; LARONNE, J. B.; EGOZI, R. The fuzzy effect of soil conservation practices on runoff and sediment yield from agricultural lands at the catchment scale. **Catena**, v. 207, p. 105710, 2021. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105710
9. BISHOP, M. P.; JAMES, L. A.; SHRODER JR, J. F.; WALSH, S. J. Geospatial technologies and digital geomorphological mapping: Concepts, issues and research. **Geomorphology**, v. 137, n. 1, p. 5-26, 2012. DOI: 10.1016/j.geomorph.2011.06.027
10. BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Serviço Geológico do Brasil. **Carta Geológica-Geofísica Folha SC.24-X-A-IV-Floresta**. Brasília: MME, 2018. 1 mapa, Escala 1:100.000.
11. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos. **Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca PAN-Brasil**. Brasília: MMA, 2004. 214 p.
12. CÂNDIDO, B. M.; JAMES, M.; QUINTON, J.; LIMA, W. D.; SILVA, M. L. N. Sediment source and volume of soil erosion in a gully system using UAV photogrammetry. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, 2020. DOI: 10.36783/18069657rbcs20200076
13. CHELLI, A.; BORDONI, M.; CAPPADONIA, C.; PEPE, G.; ROTIGLIANO, E.; SMITH, M. Geomorphological tools for mapping natural hazards. **Journal of Maps**, v. 17, n. 3, p. 1-4, 2021. DOI: 10.1080/17445647.2021.1920794
14. COSTA, B. S. C. D.; SLUTER, C. R.; IESCHECK, A. L.; RODRIGUES, É. L. D. S. Large-scale cartographic representation of relief features from sandzation process. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 26, n. 4, e2020019, 2020. DOI: 10.1590/s1982-21702020000400019
15. D'OLEIRE-OLTMANN, S.; MARZOLFF, I.; PETER, K. D.; RIES, J. B. Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco. **Remote Sensing**, v. 4, n. 11, p. 3390-3416, 2012. DOI: 10.3390/rs4113390
16. D'ODORICO P.; BHATTACHAN, A.; DAVIS, K.F.; RAVI, S.; RUNYAN, C.W. Global desertification: Drivers and feedbacks. **Advances in Water Resources**, 51, p. 326-344, 2013. DOI: 10.1016/j.advwatres.2012.01.013
17. ĐOMLIJA, P.; BERNAT GAZIBARA, S.; ARBANAS, Ž.; MIHALIĆ ARBANAS, S. Identification and mapping of soil erosion processes using the visual interpretation of LiDAR imagery. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 8, n. 10, p. 438, 2019. DOI: 10.3390/ijgi8100438
18. DREGNE, H. E. Land degradation in the drylands. **Arid Land Research and Management**, v. 16, n. 2, p. 99-132, 2002. DOI: 10.1080/153249802317304422
19. FORNO, M. G.; FUBELLI, G.; GATTIGLIO, M.; TADDIA, G.; GHIGNONE, S. Object-Based Geomorphological Mapping: Application on an Alpine Deep-Seated Gravitational Slope Deformation Contest (Germanasca Valley, Western Alps—Italy). **Applied Sciences**, v. 12, n. 2, p. 778, 2022. DOI: 10.3390/app12020778
20. GAD, A. Qualitative and Quantitative Assessment of Land Degradation and Desertification in Egypt Based on Satellite Remote Sensing: Urbanization, Salinization and Wind Erosion. In: ELBEIH, S.; NEGM, A.; KOSTIANOV, A. (Eds). **Environmental Remote Sensing in Egypt**. Cham: Springer Geophysics, 2020. p. 443-497. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39593-3_15
21. HOOKE, J. Coarse sediment connectivity in river channel systems: a conceptual framework and methodology. **Geomorphology**, v. 56, n. 1-2, p. 79-94, 2003. DOI: 10.1016/S0169-555X(03)00047-3
22. INSA. **Núcleo de Desertificação Cabrobó (Pernambuco)**. Campina Grande, 2014. 1 mapa, Escala 1:25.000. Disponível em: <<http://insa.gov.br/sigsab/static/themes/v1/lib/elfinder/Arquivos/Mapoteca/N%C3%BAcleo%20de%20Desertifica%C3%A7%C3%A3o%20Cabrob%C3%B3%20%28Pernambuco%29%20Fomato%20A1.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2022.
23. JAAFARI, A.; JANIZADEH, S.; ABDO, H.G.; MAFI-GHOLAMI, D.; ADEL, B. Understanding land degradation induced by gully erosion from the perspective of different geoenvironmental factors. **Journal of Environmental Management**, v. 315, 115181, 2022. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115181
24. JAMES, M. R.; CHANDLER, J. H.; ELTNER, A.; FRASER, C.; MILLER, P. E.; MILLS, J. P.; NOBLE, T.; ROBSON, S.; LANE, S. N. Guidelines on the use of structure-from-motion photogrammetry in geomorphic research. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 44, n. 10, p. 2081-2084, 2019. DOI: 10.1002/esp.4637

25. KOČI, J.; JARIHANI, B.; LEON, J. X.; SIDLE, R. C.; WILKINSON, S. N.; BARTLEY, R. Assessment of UAV and ground-based structure from motion with multi-view stereo photogrammetry in a gullied savanna catchment. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 6, n. 11, p. 328, 2017. DOI: 10.3390/ijgi6110328
26. KRENZ, J.; GREENWOOD, P.; KUHN, N. J. Soil degradation mapping in drylands using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) data. **Soil Systems**, v. 3, n. 2, p. 33, 2019. DOI: 10.3390/soilsystems3020033
27. LATOCHA, A. The geomorphological map as a tool for assessing human impact on landforms. **Journal of Maps**, v. 5, n. 1, p. 103-107, 2009. DOI: 10.4113/jom.2009.1047
28. LOPES, L.S.O.; SOARES, R.C. Suscetibilidade à desertificação das terras secas de Gilbués (estado do Piauí) e Cabrobó (estado de Pernambuco), Nordeste do Brasil. **Revista Geográfica de América Central**, v. 1, n. 56, p. 307-323, 2016.
29. MACEDO, R.S.; BEIRIGO, R.M.; MEDEIROS, B.M.; FELIX, V.J.L.; SOUZA, R.F.S.; BAKKER, A.P. Processos pedogenéticos e susceptibilidade dos solos à degradação no semiárido brasileiro. **Caminhos de Geografia**, v. 22, n. 81, p. 176-195, 2021. DOI: 10.14393/RCG228155397
30. MEINEN, B. U.; ROBINSON, D. T. Mapping erosion and deposition in an agricultural landscape: Optimization of UAV image acquisition schemes for SfM-MVS. **Remote Sensing of Environment**, v. 239, p. 111666, 2020. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111666
31. MEINEN, B. U.; ROBINSON, D. T. Streambank topography: An accuracy assessment of UAV-based and traditional 3D reconstructions. **International Journal of Remote Sensing**, v. 41, n. 1, p. 1-18, 2020. DOI: 10.1080/01431161.2019.1597294
32. MOHAMMADKHAN, S.; AHMADI, H. Relationship between soil erosion, slope, parent material and distance to road (Case study: Latian Watershed, Iran). **Arabian Journal of Geoscience**, v. 4, p. 331-338, 2011. DOI: 10.1007/s12517-010-0197-z
33. MYERS, N. Environmental refugees: A growing phenomenon of the 21st century. *Philosophical Transactions of the Royal Society Biological Sciences*, v. 357, n.1420, p. 609-613, 2002. DOI: 10.1098/rstb.2001.0953
34. NICULIȚĂ, M.; MĂRGĂRINT, M. C.; TAROLLI, P. Using UAV and LiDAR data for gully geomorphic changes monitoring. In: **Developments in earth surface processes**. Elsevier, 2020. p. 271-315. DOI: 10.1016/B978-0-444-64177-9.00010-2
35. NIKPOUR, N.; FOTOOHI, S.; HOSEINI, S. Z.; NEGARESH, H.; BAHRAMI, S. An assessment of land degradation and its effects on geomorphology using LADA model: a case study of Ilam Province, west of Iran. **Environment Earth Science**, v.81, n. 274, 2022. DOI: 10.1007/s12665-022-10292-1
36. NOBRE, P. Mudanças climáticas e desertificação: os desafios para o Estado brasileiro. In: LIMA, R.C.C.; CAVALCANTE, A.M.B.; MARIN, A.M.P. (org.) **Desertificação e mudanças climáticas no semiárido brasileiro**. Campina Grande: INSA, 2011. p. 25-35.
37. PEREZ -MARIN, A.M.; CAVALCANTE, A. M.B.; MEDEIROS, S.S.; TINÔCO, L.B.M.; SALCEDO, I.H. Núcleos de desertificação no semiárido brasileiro: ocorrência natural ou antrópica? **Parcerias Estratégicas**, v. 17, p. 87 -106, 2012.
38. PERNAMBUCO. Lei nº 14.091, de 17 de junho de 2010. Institui a política estadual de combate à desertificação e mitigação dos efeitos da seca, e dá outras providências. Recife, PE, 2010. Disponível em: <<http://200.238.101.22/docreader/docreader.aspx?bib=2010&pasta=Junho\Dia%2017>>. Acesso em: 07 abr. 2022.
39. PESSOA, L. G. M. **Análise de solos afetados por saís nas paisagens do semiárido de Pernambuco, Brasil**. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Departamento de Agronomia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2012.
40. PETSCH, C.; VOLPATO SCCOTI, A. A.; SOUZA ROBAINA, L. E. de; TRENTIN, R. Controlling factors and mapping of linear erosive features in Santa Maria river watershed –RS. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 23, n. 4, p. 1876-1892, 2022. DOI: 10.20502/rbg.v23i4.2151
41. POESEN, J.; VANDEKERCKHOVE, L.; NACHTERGAELE, J.; OOSTWOUW WIJDENES, D.; VERSTRAETEN, G.; VAN WESEMAEL, B. Gully erosion in dryland environments. In: BULL, L. J.; KIRKBY, M. J. (Ed.). **Dryland rivers: hydrology and geomorphology of semi-arid channels**. John Wiley & Sons, 2002. p. 229-262.
42. PRĂVĂLIE, R.; PATRICHE, C.; SĂVULESCU, I.; SÎRODOEV, I.; BANDOC, G.; SFÎCĂ, L. Spatial assessment of land sensitivity to degradation across Romania: A quantitative approach based on the modified MEDALUS methodology. **Catena**, 187, 104407, 2020. DOI: 10.1016/j.catena.2019.104407
43. RADEMANN, L. K.; TRENTIN, R. Novas geotecnologias aplicadas ao estudo geomorfológico: exemplo de morfometria da Voçoroca do Areal, Cacequi-RS. **GeoTextos**, v. 16, n. 1, p. 209-230, 2020.
44. SANTOS, J.M. Indicadores de desertificação: um olhar caleidoscópico desde o contexto científico internacional e nacional. In: ARAÚJO, S.M.S.; LIMA, E.R.V. (org.) **Desertificação no semiárido brasileiro e paraibano: abordagens conceituais, metodologias e indicadores**. Paulo Afonso: SABEH, 2019. p. 18-54.
45. SEMAS. **Zoneamento das áreas suscetíveis à desertificação do estado de Pernambuco**. Recife: SEMAS, 2020. 120 p.
46. SIDLE, R.C.; JARIHANI, B.; KAKA, S.I.; KOČI, J.; AL-SHAIBANI, A. Hydrogeomorphic processes affecting dryland gully erosion: Implications for modelling. **Progress in Physical Geography**, v. 43, n. 1, p. 46-64, 2019. DOI: 10.1177/0309133318819403

47. SIMPLÍCIO, A. A.; COSTA, C. A.; NAVARRO-HEVIA, J.; DE ARAÚJO, J. C. Erosion at hillslope and micro-basin scales in the Gilbués desertification region, Northeastern Brazil. **Land Degradation and Development**, v. 32, n.3, p. 1487-1499, 2021. DOI: 10.1002/ldr.3809
48. SSSA. **Glossary of Soil Science Terms 2008**. John Wiley & Sons, 2008. 84 p. DOI: 10.2136/2008.glossarysoilscienceterms
49. SOUZA, J.; HOOKE, J. Influence of seasonal vegetation dynamics on hydrological connectivity in tropical drylands. **Hydrological Processes**, v. 35, n. 11, p. e14427, 2021. DOI: 10.1002/hyp.14427
50. SOUZA, J.O.P.; CORREA, A.C.B. Cenários Evolutivos da Conectividade da Paisagem em Ambiente Semiárido – Bacia do Riacho do Saco, Serra Talhada, Pernambuco. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 1, p.63-77, 2020. DOI: 10.20502/rbg.v21i1.1529
51. STEFANUTO, E.B. **Análise da dinâmica erosiva linear e seu potencial evolutivo em área agrícola**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2019.
52. SUN, L.; FANG, H.; QI, D.; LI, J.; CAI, Q. A review on rill erosion process and its influencing factors. **Chinese Geographical Science**, v.23, n.4, p. 389-402, 2013. DOI: 10.1007/s11769-013-0612-y
53. VERSTAPPEN, H.T.; ZUIDAM, R.A.V. **ITC System of geomorphological survey**. 3. ed., Enschede: ITC, 1975. 52 p.
54. VIEIRA, R. M. D.; TOMASELLA, J.; BARBOSA, A. A.; MARTINS, M. A.; RODRIGUEZ, D. A.; REZENDE, F. S.; CARRIELLO, F.; SANTANA, M. D. Desertification risk assessment in Northeast Brazil: Current trends and future scenarios. **Land Degradation and Development**, v. 32, n. 1, p. 224-240, 2021. DOI: 10.1002/ldr.3681
55. WELLS, R.R.; MOMM, H.G.; CASTILLO, C. Quantifying uncertainty in high-resolution remotely sensed topographic surveys for ephemeral gully channel monitoring. **Earth Surface Dynamics**, 5, p. 347–367, 2017. DOI: 10.5194/esurf-5-347-2017
56. WESTOBY, M. J., BRASINGTON, J., GLASSER, N. F., HAMBREY, M. J., & REYNOLDS, J. M. Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, v. 179, p. 300-314, 2012. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021
57. XAVIER, J.P.S.; BARROS, A.H.C.; WEBBER, D.C.; ACCIOLY, L.J.O.; MARQUES, F.A.; ARAUJO FILHO, J.C.; SILVA, A.B. Estimativa da erosividade da chuva por diferentes métodos e seu impacto na equação universal de perdas de solo, no semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.12, n.3, p. 859-875, 2019.
58. XAVIER, J.P.S.; COUTINHO, E.A.T.; TAVARES, K.C.O.; LISTO, D.G.S.; LISTO, F.L.R. Erosões lineares no semiárido pernambucano: avaliação de uma parcela erosiva em microescala na Depressão São Franciscana. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 6, n. 2, p. 106-111, 2020. DOI: 10.21680/2447-3359.2020v6n2ID19303
59. XU, S.; FU, P.; QUINCEY, D.; FENG, M.; MARSH, S.; LIU, Q. UAV-based geomorphological evolution of the Terminus Area of the Hailuoguo Glacier, Southeastern Tibetan Plateau between 2017 and 2020. **Geomorphology**, p. 108293, 2022. DOI: 10.1016/j.geomorph.2022.108293
60. ZHANG, W.; LIU, Y. Research on visual interpretation and spatial distribution pattern of the erosion gully in Luoyugou Watershed of China. **Environment and Natural Resources Research**, v. 9, n. 3, p. 23-31, 2019. DOI: 10.5539/enrr.v9n3p23
61. ZWEIG, R.; FILIN, S.; AVNI, Y.; SAGY, A.; MUSHKIN, A. Land degradation and gully development in arid environments deduced by mezzo-and micro-scale 3-D quantification–The Negev Highlands as a case study. **Journal of Arid Environments**, 153, p. 52-65, 2018. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2017.12.006



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.