

ANÁLISE ESTRUTURAL DO CARSTE DO LAJEDO DA ESCADA (BARAÚNA-RN) E SUA ASSOCIAÇÃO À NEOTECTÔNICA ATUANTE NA BACIA POTIGUAR

DANIEL MATEUS DA SILVA SOBRAL

Mestrando, Universidade do Estado do Rio Grande do Norte

Email: danielmateus.sobral@hotmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1573-0747>

GUTEMBERG HENRIQUE DIAS

Doutor, Universidade do Estado do Rio Grande do Norte

Email: gutembergdiass@uern.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2147-8647>

FILIPE DA SILVA PEIXOTO

Doutor, Universidade do Estado do Rio Grande do Norte

Email: felipepeixoto@uern.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5409-3001>

ROBSON FERNANDES FILGUEIRA

Doutor, Universidade do Estado do Rio Grande do Norte

Email: robsonfilgueira@uern.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8638-154X>

Recebido:01/26

Avaliado:02/26

Publicado:03/26

RESUMO

A pesquisa consistiu em um estudo descritivo dos atributos estruturais de uma área situada em exposição de calcários Mesozóicos da Formação Jandaíra, amplamente aflorante na parte emersa da Bacia Potiguar. Mais especificamente um extenso pavimento cárstico superior, denominado Lajedo da Escada, localizado na comunidade de Olho D'água da Escada, no município de Baraúna, estado do Rio Grande do Norte. A metodologia contou com a interpretação de imagens de satélites, através da plataforma Google Earth para identificar preliminarmente a área total de exposição cárstica e para elaboração de um mapa prévio da área de estudo. Foram consultados dados cartográficos já existentes de órgãos como Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (Cecav), Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), Agência Nacional de Mineração (ANM), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), bem como, foram realizados aerolevantamento por meio de drone, o que permitiu a análise detalhada das feições estruturais e auxiliou na identificação de áreas representativas para as coletas de dados de campo. Foram identificados os esforços neotectônicos atuantes na Bacia Potiguar foram responsáveis pelo alinhamento das fraturas com direções preferenciais NW-SE e NE-SW. A maior frequência a abertura da primeira direção de fratura, correlata ao sistema de falhas de Afonso Bezerra (NW-SE) é inferida por reativações desse sistema durante o período Cenozóico.

Palavras-chave: Semiárido Brasileiro; Geomorfologia Cárstica; Geologia Estrutural; Geotecnologias; Fotogrametria Digital.

STRUCTURAL ANALYSIS OF THE LAJEDO DA ESCADA KARST (BARAÚNA-RN) AND ITS ASSOCIATION WITH NEOTECTONICS ACTING IN THE POTIGUAR BASIN

ABSTRACT

This research consists of a descriptive study of the structural attributes within an area of Mesozoic limestone exposure of the Jandaíra Formation, which widely outcrops in the onshore portion of the Potiguar Basin. Specifically, the study focuses on an extensive upper karst pavement, known as Lajedo da Escada, located in the Olho D'água da Escada community, in the municipality of Baraúna, Rio Grande do Norte state. The methodology involved the interpretation of satellite imagery via the Google Earth platform for preliminary identification of the total karst exposure area and the elaboration of a preliminary map of the study site. Pre-existing cartographic data were consulted from agencies such as the National Center for Research and Conservation of Caves (CECAV), the Geological Survey of Brazil (CPRM), the National Mining Agency

(ANM), and the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE). Furthermore, UAV-based aerial surveys were conducted, allowing for a detailed analysis of structural features and aiding in the identification of representative areas for field data collection. Results indicate that neotectonic stresses acting on the Potiguar Basin were responsible for the alignment of fractures with preferential NW-SE and NE-SW directions. The higher frequency of open fractures in the former direction, correlated to the Afonso Bezerra fault system (NW-SE), is attributed to reactivations of this system during the Cenozoic period.

Keywords: Brazilian Semi-arid Region; Karst Geomorphology; Structural Geology; Geotechnologies; Digital Photogrammetry.

INTRODUÇÃO

As rochas cársticas são marcadas por processos de dissolução, no qual a água interage com os minerais, em geral de calcita, produzindo a retirada de material diluído. Tal característica do intemperismo químico por dissolução, atuante conforme a distribuição e volume pluviométrico da área, dá origem a uma série de feições geomorfológicas específicas. O território brasileiro possui aproximadamente 7% da sua área recoberta por rochas carbonáticas, destacando-se paisagens bem características no que se refere a feições geológicas e geomorfológicas (Karmann, 2003).

De acordo com Klimchouk e Ford (2000) determinados tipos de feições cársticas são fundamentalmente superficiais como lapiás (rillenkarren), fraturas, sumidouros nas rochas expostas, a essência deste sistema é a circulação subterrânea, criando vazios e cavernas na rocha carbonática.

Esta condição proporciona ao carste propriedades diferentes nas rochas, seja por sua composição mais ou menos puros de calcário, seja pela disposição estratigráfica, muitas vezes o carste subsuperfície não é expresso de modo claro em superfície. Um sistema cárstico pode operar no subsolo sem qualquer relação com a superfície, sendo representado exclusivamente por formas subterrâneas (Klimchouk; Ford, 2000, p.46).

Estruturas cársticas podem ser avaliadas através dos aspectos morfodinâmicos, visto que, a partir do estudo dos processos que conduzem à dissecação do relevo é possível perceber a intensidade da sua alteração, resultante do dinamismo dos agentes externos, os quais são responsáveis pelos mais variados graus de rugosidade e esculturação da superfície cárstica.

A Bacia Potiguar se destaca por peculiaridades encontradas em seus ambientes cársticos, que são capazes de expressar episódios de tectonismo, incluindo-se reativações Cenozóicas, que possibilitam compreender sua história evolutiva (Gomes, 2008).

De acordo com Gomes (2008), a maior área reconhecida em terrenos carbonáticos de todos os estados brasileiros (à exceção da Bahia), são os calcários cretáceos do Grupo Apodi, que ocorrem em sua maior parte no Rio Grande do Norte.

A formação Jandaíra é constituída por calcarenitos bioclásticos e calcilutitos da formação homônima, compondo um sistema hidrogeológicos cárstico-fraturado, com circulação de água por zonas de dissolução que formam expressivos carstes em superfície ou no subterrâneo (Peixoto; Dias, 2023). Sua litologia é constituída por calcários bioclásticos, calcarenitos e calcários dolomíticos, com coloração predominantemente creme e cinza. São duros, finos, com intercalações de argilitos e com bancos ricamente fossilíferos (Lima et al., 2006).

Por se tratar de sedimentos depositados na porção pós-rifte da bacia, o afloramento da Formação Jandaíra forma uma ampla e extensa plataforma carbonática, cuja morfologia varia de acordo com a posição da plataforma com relação aos limites da bacia e à posição relativa ao rifte. Segundo Diniz et al., (2017) ela é classificada como tabuleiros interiores, na maior parte de sua área aflorante, e de chapada do Apodi, na sua porção oeste, a partir da margem esquerda do rio Apodi Mossoró, até a limite com o estado do Ceará, onde a bacia se limita, por meio de uma feição de Cuesta escarpada e sustentada por rochas da Formação Açu.

A região onde se localiza a área de estudo se encontra no contexto geomorfológico da chapada do Apodi, onde a plataforma carbonática se encontra mais elevada com relação a sua porção oriental, e onde as rochas também sobrem influência de rios de primeira e segunda ordem de caráter intermitente, e que interagem com exocartes, caracterizando sua forma criptorréica.

A região do Lajedo da Escada compreende um afloramento de rochas carbonáticas que, em decorrência da ação do intemperismo químico, seja pluvial, seja de maneira linear, apresenta feições cársticas características, como cavernas, dolinas, campos de lapíais, sumidouros, ravinas de dissolução, além de abatimentos estruturais e falhamentos).

Apesar do seu potencial para estudos sobre a geodiversidade, particularmente os relacionados a identificação e classificação de cavernas e outros tipos de endocarstes e mesocarstes, à evolução tectônica desse trecho da Bacia Potiguar pode esclarecer a relação entre a evolução das feições e os eventos de reativação de falhas identificados na bacia. Como identificado por Maia (2012) e Diniz (2024) que colocam em evidência a marcante direção dos relevos da Serra Mossoró e da serra do Mel, dispostas na direção NE – SW, além de altitudes similares, portanto influenciadas pelas falhas da mesma direção, datadas do período cretáceo.

E Os estudos que estão sendo realizados por Dias et al., (2020) na chapada do Apodi, particularmente na Serra Mossoró, que tem sido associada a reativação de falhas, também do período cretáceo. Entretanto, de fato, é importante salientar que a região carece de estudos mais aprofundados, visto que sua geologia é mencionada apenas através de levantamentos superficiais, que fornecem dados sucintos.

Além disso, a evolução do relevo do nordeste do Brasil tem sido explicada nos últimos anos pela condição estrutural, ligada a movimentos tectônicos intraplaca. Sobretudo na província Borborema, o estiramento crustal e os rifteamentos, produzidos no início do período cretáceo, constitui-se bacias sedimentares intracratônicas. Das quais a bacia potiguar, marcada significativamente por formas estruturais horsts e grábens, influenciando na atual morfologia de superfície associada a reativação de falhas genéticas (Bezerra et al., (2023)

É suspeito que reativações ocorreram em período recente, e podem ser entendidas como neotectonismo. Obruchev (1948) introduziu os termos “neotectônica” para se referir a movimentos tectônicos ocorridos no fim do terciário e no quaternário, tendo papel determinante na topografia contemporânea. Para outros autores como Morner (1993), apesar de constantes modificações na definição de neotectônica, admite-se que os últimos 3 a 2,5 milhões de anos foram caracterizados por intensas atividades tectônicas, causando soerguimentos e subsidências.

A Bacia Potiguar nos últimos anos vem sendo objeto de pesquisas voltadas aos estudos da neotectônica que se evidenciam na perturbação de sedimentos Cenozóicos, desde o período Paleoceno até o Neogeno, por eventos relacionados a reativação de grandes estruturas geológicas antigas como o Sistema de Falhas Carnaubais e Afonso Bezerra (CREMONINI; KRANER, 1995).

O presente artigo apresenta os resultados de uma pesquisa realizada na área do Lajedo da Escada, localizado no município de Baraúna (RN), na porção oeste da Bacia Potiguar, a partir de um levantamento geológico-estrutural, realizado por checagem de campo e imageamento aéreo através de fotogrametria com drone. Este trabalho tem por objetivo compreender a relação entre a neotectônica regional e a formação do exocarste descrito no Lajedo da Escada (Baraúna-RN).

A neotectônica tem relação direta com o processo de carstificação na Bacia Potiguar, fato já evidenciado por Maia et al. (2012). No âmbito da área de estudo é observado um sistema de cavernas, similar às áreas próximas, como o Parque Nacional da Fuma Feia, localizado entre os municípios de Mossoró e Baraúna.

Esforços tectônicos, durante e após o desenvolvimento da Bacia Potiguar, causaram o surgimento de falhas e fraturas. A existência de rochas calcárias fraturadas constitui um ambiente propício para o desenvolvimento de um relevo cárstico, formado por dolinas, sumidouros, salões de abatimento, cavernas e outras formações. (Santos et al., 2011). As quais refletem característica de posição relativa, aberturas de dissolução e carstificação em subsuperfície no que tange ao direcionamento das fraturas, as quais condicionam processo de carstificação mais desenvolvido.

A interação entre os processos tectônicos, juntamente com alterações climáticas, e diferenciação dos processos de intemperismo ocorridos ao longo do tempo geológico, são fundamentais para a estruturação do relevo. Visto que, garantem que a paisagem cárstica permaneça em constante evolução, desde sua fase de origem, seguida pela de desenvolvimento, até chegar ao estado destrutivo, no qual predomina o intemperismo e a erosão, que tendem a degradar completamente o relevo (Gomes, 2008).

Segundo Cruz et al. (2010), diferente do que ocorreu na Era Mesozóica, a atividade tectônica do Cenozóico não tem uma maior influência na formação de zonas de rifteamento continental tampouco na origem de bacias sedimentares. Contudo, a Bacia Potiguar, ao longo do Cenozóico passa a ter a reativação de importantes falhamentos, como os Sistema de Falhas Carnaubais e Afonso Bezerra, dobramentos com grandes comprimentos de onda e eixos orientados na direção N-S, resultantes de esforços compressivos E-W que afetaram essa bacia no Paleógeno (Cremonini, 1993).

A presença de rochas fraturadas, particularmente rochas carbonáticas, como o calcário presente na Bacia Potiguar, evidenciam episódios de neotectonismo (falhamento e fraturamento), que ocorreram durante e após o desenvolvimento dessa bacia, o que contribuiu para que se tornasse um ambiente altamente propício ao aparecimento de cavidades cársticas (Santos et al., 2011).

Outros aspectos que podem ser identificados em campo, quando se trata das fraturas NW-SE e NE-SW existentes na Bacia Potiguar, são atributos morfológicos, como comprimento, profundidade, abertura e espaçamentos, que sugerem que essas descontinuidades tenham sofrido grandes influências do tectonismo regional, em específico o sistema de falhas de Afonso Bezerra (NW-SE) e de Carnaubais (NE-SW) (Santos et al., 2011).

O Lajedo da Escada, situado no município de Baraúna (RN), é constituído por aproximadamente dois pavimentos cársticos que sobressaem em meio à vegetação de caatinga arbórea-arbustiva (Barbosa, 2013). Esses afloramentos são facilmente identificados em imagens de satélite de alta resolução. As feições cársticas deste local são caracterizadas pela presença de lapíás, sulcos, fraturas, grutas e galerias com dezenas de metros. Essas galerias funcionam como um sistema hidrodinâmico de fluxo subterrâneo, sendo observado em superfície apenas um sistema difuso de drenagens incipientes (Carvalho et al., 1966; Oliveira et al., 1985, 1986).

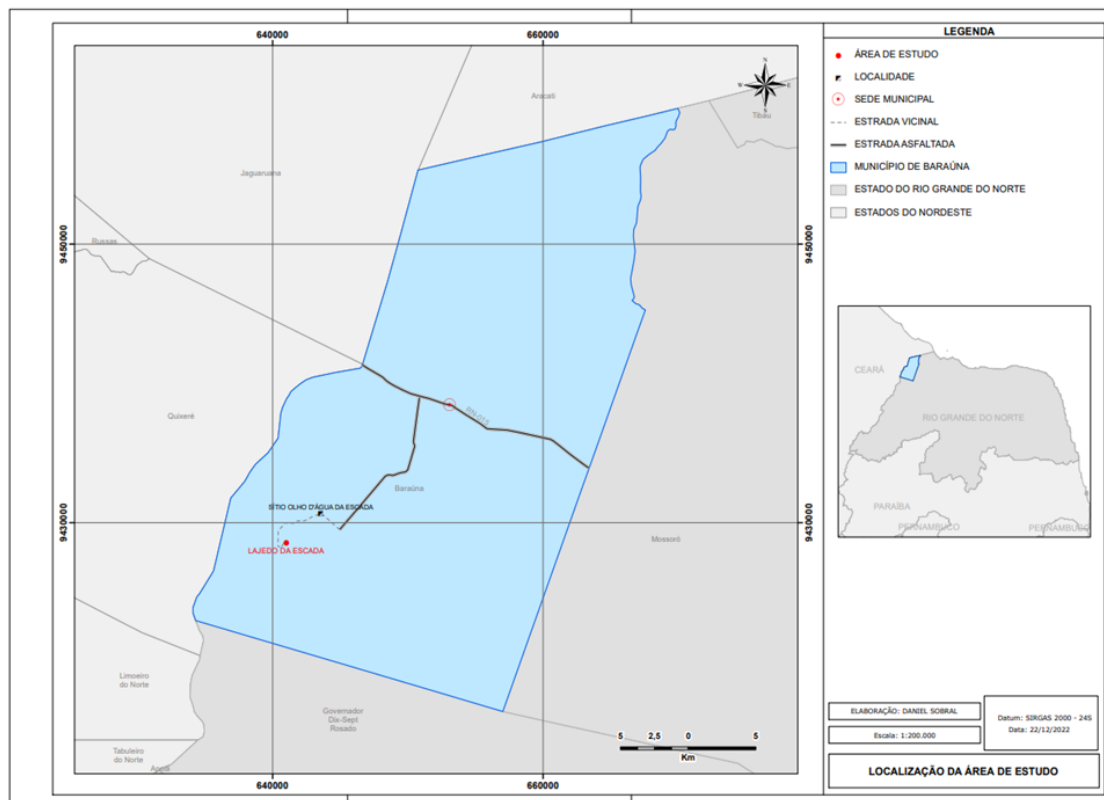
Carvalho et al. (1966) afirma que o carste do Lajedo da Escada encontra-se estagnado em sua evolução, pois, atualmente, a intensidade da dissolução não é tão intensa quanto fora no passado, observando-se o predomínio de desabamentos nas estruturas. Para os autores, o retardamento na evolução desse carste seria resultado da diminuição na pluviometria local, após a instalação de condições de clima semiárido.

O relevo da área é plano, típico da Chapada do Apodi, e insere-se na bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró. O clima é semiárido quente (BSh'), segundo Köppen-Geiger (Dubreuil, 2018), com verões áridos, chuvas entre de outono fevereiro e maio, temperaturas médias de 21°C a 38°C. Por sua localização no Nordeste setentrional, onde as condições de clima semiárido remontam há milhares de anos, o clima na região do Lajedo da Escada é do tipo semiárido quente (BSh), de acordo com a classificação de Köppen-Geiger,

MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa tem o enfoque em uma área denominada Lajedo da Escada, localizada na comunidade Olho D'água da Escada, no município de Baraúna (Figura 2). Ela está compreendida na plataforma carbonática da Bacia Potiguar sobre as rochas da Formação Jandaíra.

Figura 2 – Mapa de localização do Lajedo da Escada.



Fonte: Autores (2024).

O acesso a Baraúna, a partir de Mossoró, é feito pela RN-015. Parte do acesso à comunidade rural Olho D'água da Escada é feito por estrada asfaltada e parte por estrada vicinal, culminando numa área agrícola (fruticultura irrigada), onde se observa parte do afloramento cárstico.

A primeira etapa do trabalho consistiu na identificação e delimitação da área (afloramentos de calcários) por meio da interpretação de imagens de satélite para uma posterior verificação e refinamento em campo. A utilização de ferramentas como softwares de geoprocessamento (QGIS na versão 3.22 e Arcmap na versão 10.2.2) foram indispensáveis nesta etapa de georreferenciamento das áreas cársticas aflorantes. Foram utilizadas imagens de satélite do Google Earth (gratuitas), inseridas através do plugin “QuickMapServices” no QGIS, ou no caso do Arcmap, pela função “Add Basemap”.

Em seguida foram levantados dados secundários. Uma busca de materiais cartográficos (arquivos shapefiles), que mostrassem atributos de relevância ou tratassem dos aspectos geológicos/geomorfológico, bem como, das demais características da área analisada.

Foi consultada a base de dados de órgãos como Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (ICMBio/CECAV), Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a fim de identificar a localização de estruturas cársticas existentes na área de estudo. A base de dados do CECAV (2020), mostrou a presença

de sete cavernas na área. Os dados disponibilizados pelo CPRM foram muito importantes para todas as etapas da pesquisa, sobretudo, durante a caracterização geológica, particularmente no que concerne às litologias e ao arcabouço estrutural da área de estudo. Dados do IBGE (2020) foram empregados na delimitação dos limites municipais e divisas estaduais.

Na etapa de campo foi realizada incursões para reconhecimento inicial e para o aerolevantamento a partir de DRONE, que serviu para realizar ortofotogrametria que teve como produto a geração de um ortomosaico. O plano de voo foi estabelecido em uma quadrícula de 10 hectares, com altitude de 70 metros, tendo sido coletadas um total de 206 fotos. Ainda durante a fase de campo foram feitas medidas de largura e profundidade das fraturas, documentação fotográfica da condição atual do carste e a descrição das estruturas de superfície e subsuperfície, essa última quando foi possível o acesso.

Para geração de imagem em ortomosaico, foram processadas todas as 206 imagens da área, utilizando o software Agisoft Metashape com versão 1.8. Este processo também dependeu da identificação de pontos de controle em solo, nos quais foram necessários para uma maior acurácia durante a etapa de alinhamento das imagens. O resultado é uma grande imagem, “costurada” e corrigida, que representou, com maior exatidão, a realidade da área mapeada e não foi possível de visualizar e identificar as estruturas superficiais do exocarste (linhas correspondentes aos fraturamentos), bem como facilitasse a identificação dos respectivos alinhamentos.

Na última etapa, foi realizada uma nova análise estrutural do exocarste, tendo como base a ortofoto, gerada pelo drone. Por meio desse procedimento, as fraturas visíveis foram georreferenciadas para serem inseridas na etapa de elaboração da planta estrutural e do mapa do arcabouço geológico-estrutural. A direção preferenciais do sistema de fraturas das fraturas foram descritas no diagrama de roseta.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após análises realizadas durante a etapa de campo, foi possível e coletar os dados, identificando a condição geológica e estrutural do Lajedo da Escada. A extensão do pavimento cárstico superior é marcada pelo direcionamento em fraturas (NW-SE) em avançado grau de evolução. Seus comprimentos e profundidades puderam ser visualizadas por imagens de satélite e em campo, onde se comprovou as fraturas bem evoluídas e alargadas. (Figura 3).

Figura 3 – (A) Pavimento cárstico superior. (B, C, e D) Fraturas alargadas no local de estudo.



Fonte: Autores (2024)

O mapa realizado na primeira etapa do trabalho, e posteriormente aprimorado em campo com base imagem do Google Earth, mostra o pavimento cárstico do lajedo e a existência de pelo menos 11 (onze) fraturas facilmente identificadas por imagem de satélite, devido ao seu avançado grau de evolução (Figura 4). Elas estão relacionadas ao alinhamento regional (NW- SE), sendo originadas a partir de esforços neotectônicos, atuantes na Bacia Potiguar (Santos et al, 2011).

Figura 4 – Imagem do lajedo mostrando as fraturas mapeadas pelo Arcmap 10.2.2 utilizando imagem do Google Earth.



Fonte: Google Satellite/2021.

Após o imageamento utilizando o drone, obteve-se uma imagem de maior acurácia, fato que garantiu uma excelente condição de visibilidade e detalhamento das estruturas do lajedo, mostrando uma maior expressividade das fraturas, bem como da sua estruturação cárstica, através de imagem ortomosaico (Figura 5).

Figura 5 – Imagem ortomosaico do Lajedo da Escada.

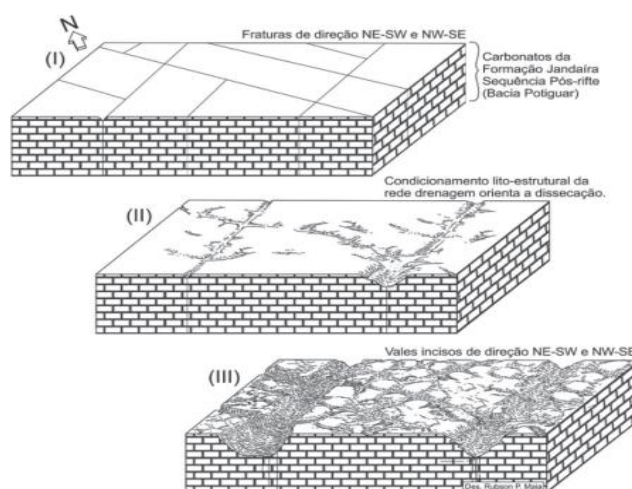


Fonte: Autores (2024).

A análise comparativa entre as escalas de observação revelou a limitação das imagens orbitais convencionais, comumente utilizadas a partir Google Earth ou Google Satellite, na detecção de microfeições cársticas. Enquanto o sensoriamento remoto orbital permitiu apenas a identificação das 11 fraturas principais (>10m de largura), o aerolevanteamento com VANT revelou 82 descontinuidades. Isso demonstra que a densidade de fraturamento do Grupo Apodi é significativamente maior do que aqueles mapeados em escalas regionais, sugerindo um potencial de infiltração hídrica subestimado em modelos hidrogeológicos clássicos.

Foi checado a direção dos lineamentos das fraturas superficiais, as quais se correlacionaram as direções de outros estudos que destacam a participação da neotectônica na formação destes ambientes, em específico, principalmente os alinhamentos do sistema de falhas de Afonso Bezerra (NW-SE) e de Carnaubais (NE-SW) que influenciaram na evolução do modelo cárstico da Bacia Potiguar (Santos et al, 2011) e, consequentemente, da área de estudo (Figura 6).

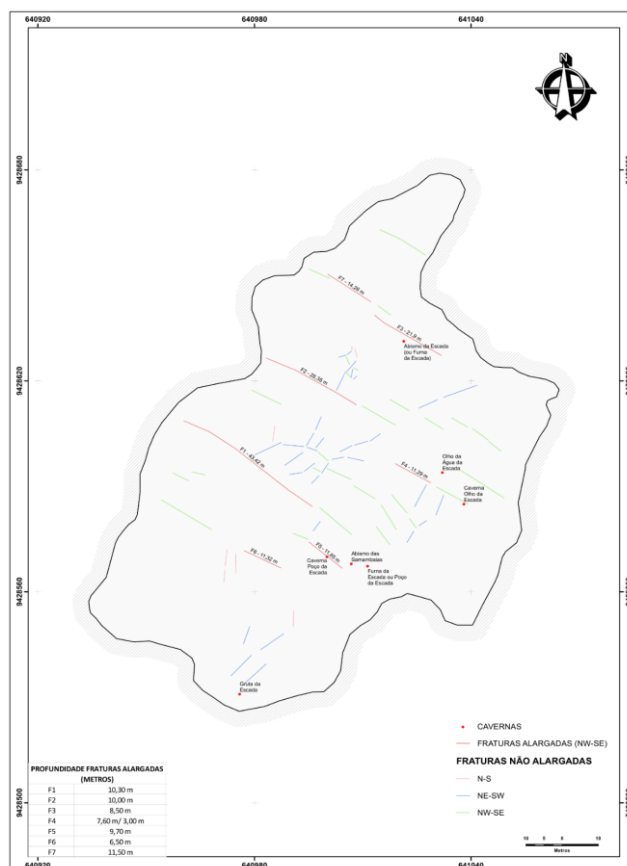
Figura 6 – Evolução do modelado cárstico a partir de superfície fraturada.



Fonte: Maia et al.; (2013).

Através do imageamento aéreo de toda a superfície cárstica, foi possível identificar 82 fraturas que se expressam em diversas direções como N-S, NE-SW e NW-SE. Um maior destaque foi dado às fraturas consideradas como alargadas, que possuem direção preferencial NW-SE, salienta-se que essas são as únicas capazes de serem realizadas medidas de profundidade. O levantamento de campo mostra que o padrão é variável, com profundidades superiores a 10 metros e larguras médias de 1,50m. As dimensões foram introduzidas em formato de tabela na planta das fraturas (Figura 7)

Figura 7 – Evolução do modelado cárstico a partir de superfície fraturada.

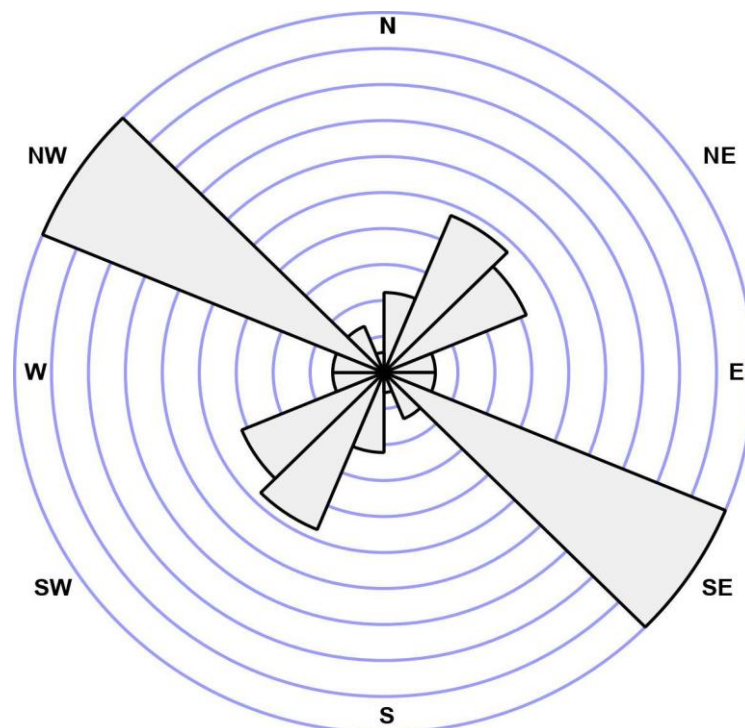


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Um diagrama de roseta considerando as direções preferenciais das 82 fraturas foi elaborado (Figura 8). A fim de mostrar os segmentos e comprovar que as direções seguem os padrões regionais. A ferramenta mostrou que a maior parcela das fraturas mapeadas, no âmbito do Lajedo da Escada, segue o padrão NW-SE (43,75%), seguida do NE-SW (41,25%).

A predominância dos lineamentos NW-SE não são uma coincidência, mas o reflexo do controle direto da Zona de Cisalhamento de Afonso Bezerra sobre a plataforma carbonática. Diferentemente de estudos em outras áreas da bacia onde o sistema predominante é NE-SW, no Lajedo da Escada a reativação cenozóica parece ter privilegiado a abertura e expansão das fraturas NW-SE, tornando-as os principais vetores de carstificação. Esse dado enfatiza as compreensões de Bezerra et al., (2023) sobre a neotectônica intraplaca.

Figura 8 – Evolução do modelado cárstico a partir de superfície fraturada.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A condição do exocarste se manifesta, principalmente, pelas inúmeras fraturas, das quais aquelas consideradas como alargadas, provavelmente, dão origem a um grande sistema cárstico subterrâneo, caracterizado pela existência de sumidouros (Figura 9).

Figura 9 – Profundo sumidouro situado ao meio de fratura, com profundidade de 10,5 metros.



Fonte: Autores (2024).

As condições dos lapiás são de formas bem preservadas, denotando uma ação contínua dos processos de dissolução por água meteórica e, também, pela não ocorrência de atividades antrópicas sobre o lajedo. Possuem vertentes íngremes, com arestas pontiagudas, indicando que houve a existência de escoamento superficial (Figura 10). Essas características retratam lapiás do tipo “rillenkarrren” ou em caneluras (Figura 11).

Figura 10 – Campo de Lapiás com morfologias irregulares, e microbacias de dissolução.



Fonte: Autores (2024).

Figura 11 – Lapiás do tipo “rillenkarren” ou em caneluras.



Fonte: Autores (2024).

CONCLUSÕES

Inicialmente é importante frisar que as imagens de satélites em diferentes escalas são bastante úteis para identificação prévia de áreas com sistemas cársticos aflorantes. Já para identificação de sistemas de fraturas e para o refinamento dos dados coletados em campo o uso de imagens adquiridas a partir de imageamento por drones é imprescindível.

Os dados coletados em campo comprovaram que o Lajedo da Escada está estruturado sobre um sistema de fraturas com direção preferencial NW-SE e NE-SW que são correlatos aos sistemas de falhas de Afonso Bezerra (NW-SE) e Carnaubais (NE-SW), que tiveram reativações no Cenozóico. Essas fraturas apresentam padrões variáveis e profundidades que passam dos 10 metros e larguras médias de 1,50 metros. Esses dados corroboram resultados com trabalhos anteriores que mostram que a morfoestrutura da área de estudo é produto do neotectonismo que ocorreu na Bacia Potiguar.

Constatou-se que, na área, a dinâmica de castificação não favorece, aparentemente, a construção de espeleotemas, sendo primordialmente responsável pela estruturação de cavernas ou cavidades alinhadas que formam um sistema hidrogeológico de escoamento subterrâneo.

É importante o detalhamento e a reprodução de estudos semelhantes nessa área da bacia (chapada do Apodi), ao considerar que os processos, ainda que reduzidos de inversão de relevo estão associados a falhamentos na direção NW-SE. Por outro lado, a evolução dos carstes estão associados diretamente a estes padrões de lineamento, evidenciado a importância do direcionamento estrutural no fluxo das águas subterrâneas.

A comparação e correlação de outros evocastes pode promover maior entendimento da evolução deste setor da bacia. Compreendendo também uma contribuição para o entendimento das condições estruturais que produzem o escoamento subsuperficial, sempre muito complexo numa região de rochas de composição cárstica.

AGRADECIMENTOS

A equipe da Projetos Geológicos Ltda (Progel), pela oportunidade de bolsa de estágio em geoprocessamento e a cessão de equipamentos e softwares para geração do imageamento da área. A Diego Duarte, pela colaboração na etapa de campo e, sobretudo, na estruturação do plano de voo do drone e sua pilotagem. Ao LAGEF - Laboratório de Geografia Física e LABGEO – Laboratório de Geoprocessamento, ambos do Departamento de Geografia FAFIC/UERN pela disponibilização de espaço físico e processamento inicial dos dados prévios da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA, H. S. B. **Análise paleopatológica em megafauna pleistocênica do Lajedo da Escada, Baraúna, Rio Grande do Norte, Brasil**. Recife: [s. n.], 2013. 80 p.
- BENTO, D. M. Complexo espeleológico da Furna Feia e áreas cársticas adjacentes: a maior concentração de cavernas do Rio Grande do Norte. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 31., 2011, Ponta Grossa. **Anais [...]**. Ponta Grossa: SBE, 2011. p. 63-71.
- BERTOTTI, L. G. *et al.* Técnicas de geotecnologias na análise do relevo e da declividade para estudos regionais. **Revista Geográfica de América Central**, [s. l.], v. 2, n. 47E, [s. p.], 2011.
- BEZERRA, F. H. *et al.* Review of tectonic inversion of sedimentary basins in NE and N Brazil: Analysis of mechanisms, timing and effects on structures and relief. **Journal of South American Earth Sciences**, [s. l.], v. 126, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104356>. Acesso em: 28 dez. 2025.
- CÂMARA, G.; CLODOVEU, D. Introdução: por que geoprocessamento? In: **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001. p. 1-5.
- CARNEIRO, M. A.; BEZERRA, F. H. R.; SILVA, C. C. N.; MAIA, R. P. Controle estrutural do sistema cárstico epigenético na Formação Jandaíra - Bacia Potiguar. **Geociências**, São Paulo, v. 34, p. 199-214, 2015.
- CARVALHO, J. N. C. *et al.* Informação sobre a jazida fossilífera pleistocênica do Lajedo da Escada, município de Mossoró, Rio Grande do Norte. **Arquivos do Instituto de Antropologia**, Natal, p. 391-404, 1966.
- CECAV - CENTRO NACIONAL DE PESQUISA E CONSERVAÇÃO DE CAVERNAS. **Diagnóstico espeleológico do Rio Grande do Norte**. Organizado por J. B. Cruz *et al.* Brasília: CECV, 2010.
- CREMONINI, O. A. **Caracterização estrutural e evolução da área de Ubarana, porção submersa da Bacia Potiguar, Brasil**. 1993. 136 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1993.
- CREMONINI, O. A.; KARNER, G. D. Soerguimento termal e erosão na Bacia Potiguar submersa e seu relacionamento com a evolução da margem equatorial brasileira. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 16., 1995, Recife. **Boletim [...]**. Recife: SBG/NE, 1995. p. 181-184.

CRUZ, J. B. *et al.* Diagnóstico espeleológico do Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Espeleologia**, Brasília, v. 1, n. 1, p. 1-24, 2010.

DANTAS, E. P. *et al.* **Projeto geologia e recursos minerais do Estado do Rio Grande do Norte: Mapa geológico e Mapa de recursos minerais**. [s. l.]: CPRM, 2021. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/22401>. Acesso em: 1 abr. 2023.

DIAS, G. H. *et al.* Extração de atributos morfométricos da Serra Mossoró (Mossoró-RN) a partir do Modelo de Elevação Digital (MDE). **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 12, n. 6, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/241241>. Acesso em: 28 dez. 2025.

DINIZ, M. T. M.; OLIVEIRA, G. P. D.; MAIA, R. P.; FERREIRA, B. Mapeamento geomorfológico do estado do Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 18, n. 4, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.20502/rbg.v18i4.1255>. Acesso em: 28 dez. 2025.

DINIZ, M. T. M.; OLIVEIRA, G. P. D.; MAIA, R. P.; FERREIRA, B. Geomorphology of Rio Grande do Norte State. In: **Geomorphology of the Northeast Region of Brazil**. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. p. 123-144.

DUBREUIL, V. *et al.* Os tipos de climas anuais no Brasil: uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015. **Confins - Revue franco-brésilienne de géographie**, [s. l.], n. 37, 2018.

GOMES, M. P.; VITAL, H. Revisão da compartimentação geomorfológica da plataforma continental norte do Rio Grande do Norte, Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 40, n. 3, p. 321-328, 2010.

GOMES, P. G. **A importância das fraturas no desenvolvimento de feições cársticas em calcários da Formação Jandaíra (Cretácio da Bacia Potiguar)**, Felipe Guerra – RN. Fortaleza: [s. n.], 2008. 154 p.

HACKSPACHER, P. C. *et al.* 1985. *apud* DANTAS, E. P. **Gravimetria e sensoriamento remoto: uma aplicação ao estudo da tectônica recente entre Macau e São Bento do Norte**. 1998. 97 f. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 1998.

KARMANN, I. Ciclo da água: água subterrânea e sua ação geológica. In: **Decifrando a terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003. p. 113-138.

KLIMCHOUK, A. B. The formation of epikarst and its role in vadose speleogenesis. In: KLIMCHOUK, A. B.; FORD, D. C.; PALMER, A. N.; DREYBRODT, W. (ed.). **Speleogenesis: evolution of karst aquifers**. Huntsville: National Speleological Society, 2000. p. 91-99.

KLIMCHOUK, A. B. The karst paradigm: changes, trends and perspectives. **Acta Carsologica**, Postojna, v. 44, n. 3, p. 289-313, 2015.

KLIMCHOUK, A. B.; FORD, D. C. Types of karst and evolution of hydrogeologic settings. In: KLIMCHOUK, A. B.; FORD, D. C.; PALMER, A. N.; DREYBRODT, W. (ed.). **Speleogenesis: evolution of karst aquifers**. Huntsville: National Speleological Society, 2000. p. 45-53.

LIMA, E. A. *et al.* Mapeamento hidrogeológico das folhas sb.24-x-b / -x-d - Areia branca / Mossoró. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 14., 2006, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba: ABAS, 2006. p. 1-13.

MAIA, R. P. *et al.* Importância do controle tectônico para a formação da paisagem cárstica na Bacia Potiguar, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 13, n. 4, p. 451-463, 2012.

MAIA, R. P.; BEZERRA, F. H. R. **Tópicos de geomorfologia estrutural: Nordeste brasileiro**. Fortaleza: Edições UFC, 2014a. 132 p.

MAIA, R. P.; BEZERRA, F. H. R. Condicionamento estrutural do relevo no Nordeste setentrional brasileiro. **Mercator**, Fortaleza, v. 13, n. 1, p. 127-141, 2014b.

MÖRNER, N. A. Paleoseismology and neotectonics. **Bulletin of the INQUA Neotectonics Commission**, [s. l.], n. 12, p. 104, 1989.

OBRUCHEV, V. A. Osnovnye cherty kinetiki i plastiki neotektoniki. **Izvestiya Akademii Nauk SSSR, Seriya Geologicheskaya**, Moscou, v. 5, p. 13-24, 1948.

OLIVEIRA, L. S. B.; BEZERRA, F. H. R. Identificação de falhas carstificadas na Bacia Potiguar utilizando imagens de VANT/DRONE. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 17., 2015, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: INPE, 2015.

PEIXOTO, F. S.; DIAS, G. H. Hidrogeologia da porção oeste da Bacia Potiguar: aspectos quantitativos e problemáticas para gestão da água subterrânea. In: PEIXOTO, F. S. *et al.* (org.). **Hidrogeografia e gestão das águas no semiárido**. Mossoró: Edições UERN, 2023. p. 89-112.

PESSOA NETO, O. D. C. *et al.* Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 357-369, 2007.

RODRIGUES, M. L. Classificação e tipologia dos lapiás: contributo para uma terminologia das formas cársticas. **Finisterra**, Lisboa, v. 47, n. 93, p. 147-158, 2012.

SANTOS, L. S. *et al.* Controle estrutural na gênese da caverna Furna Feia, município de Baraúna - RN. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 31., 2011, Ponta Grossa. **Anais [...]**. Ponta Grossa: SBE, 2011. p. 33-39.

SOARES, W.; SALGADO, A. A.; OLIVEIRA, C. K. R. Geomorfologia: ciência interdisciplinar? **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 13, n. 3, p. 351-354, 2012.

TRAVASSOS, L. E. P. *et al.* **Princípios de carstologia e geomorfologia cárstica**. Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - ICMBio, 2019.

UAGODA, R. E. S.; FERREIRA, C. F. Tipologias do carste e classificações de dolinas: uma revisão. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 20, n. 70, 2019. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/44169>. Acesso em: 28 dez. 2025.