

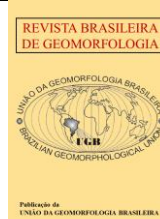


<https://rbgeomorfologia.org.br/>  
ISSN 2236-5664

## Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 25, nº 3 (2024)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v25i3.2565>



Artigo de Pesquisa

# Controle litoestrutural no desenvolvimento de marmitas no leito rochoso do rio Carnaúba, Seridó Geoparque Mundial da UNESCO, NE do Brasil

*Lithostructural control in the development of potholes in the rock bed of the Carnaúba River, Seridó UNESCO Global Geopark, NE Brazil*

João Rafael Vieira Dias<sup>1</sup>, Abner Monteiro Nunes Cordeiro<sup>2</sup>, Frederico de Holanda Bastos<sup>3</sup>, Rubson Pinheiro Maia<sup>4</sup> e Marcos Antônio Leite do Nascimento<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Curso de Geografia, Centro de Ensino Superior do Seridó, Caicó, Brasil. [jrafael.ufrn@gmail.com](mailto:jrafael.ufrn@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0811-1093>

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Geografia, Centro de Ensino Superior do Seridó, Caicó, Brasil. [abner.cordeiro@ufrn.br](mailto:abner.cordeiro@ufrn.br)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4867-7083>

<sup>3</sup> Bolsista Produtividade em Pesquisa 2 (CNPq), Universidade Estadual do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Fortaleza, Ceará, Brasil. [fred.holanda@uece.br](mailto:fred.holanda@uece.br)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4330-7198>

<sup>4</sup> Universidade Federal do Ceará, Departamento de Geografia, Fortaleza, Ceará, Brasil. [rubsonpinheiro@yahoo.com.br](mailto:rubsonpinheiro@yahoo.com.br)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1688-5187>

<sup>5</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Geologia, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil. [marcos.leite@ufrn.br](mailto:marcos.leite@ufrn.br)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8158-7186>

Recebido: 03/04/2024; Aceito: 13/06/2024; Publicado: 23/07/2024

**Resumo:** Formas graníticas resultantes do fluxo turbulento, com vórtices hidráulicos, caracterizam o leito rochoso do baixo curso do rio Carnaúba, em um geossítio do Geoparque Seridó, na microrregião do Seridó Oriental, NE do Brasil. Essas formas compreendem uma variedade de tipos de marmitas que representam, individualmente, vários estágios de evolução, além de refletir a variação do potencial erosivo do fluxo fluvial no decorrer do Quaternário. A partir de revisões bibliográficas, trabalhos de campo (quantificação e medições dos eixos das marmitas), fotogrametria de alta resolução e análise morfoestrutural dos produtos cartográficos gerados, foi possível estabelecer uma correlação entre a orientação preferencial das marmitas e a direção dos planos de fraqueza, assim como a classificação das marmitas por parâmetros morfométricos. Neste trabalho foi demonstrado que a eficiência dos vórtices hidráulicos está associada às estruturas de descontinuidades e à composição mineralógica das fácies graníticas, sendo o desgaste abrasivo responsável por esculpir marmitas, com dimensões e geometrias distintas. Foram identificadas, no leito rochoso do rio Carnaúba, marmitas incipientes que se aprofundam e aumentam de diâmetro gradualmente em formas cilíndricas à medida que o fluxo turbulento vertical aumenta, evoluindo, em seguida, para formas sigmoidais. As marmitas laterais, maiores em profundidade do que em largura, que representam uma fase destrutiva da evolução, foram observadas, somente, nas paredes do canal fluvial.

**Palavras-chave:** Corrosão; Erosão fluvial; Rios intermitentes; Semiárido brasileiro.

**Abstract:** Granitic forms resulting from turbulent flow, with hydraulic vortices, characterize the rocky bed of the lower course of the Carnaúba River, in a geosite of the Seridó Geopark, in the Seridó Oriental microregion, Northeast Brazil. These forms constitute a variety of types of potholes that individually represent various stages of evolution, in addition to reflecting the variation in the erosive potential of river flow throughout the Quaternary. From a bibliographical review, fieldwork (quantification and measurements of the potholes), high-resolution photogrammetry and morphostructural analysis of the generated cartographic products, it was possible to establish a correlation between the preferential orientation of the potholes and the direction of the planes of weakness, as well as the classification of potholes by morphometric parameters. In this work it was demonstrated that the efficiency of hydraulic vortices is associated with discontinuity structures and the mineralogical composition of granite facies, with abrasive erosion being responsible for sculpting potholes, with different dimensions and geometries. In the rocky bed of the Carnaúba River, the small potholes deepen and their diameter evolves into cylindrical shapes as the turbulent vertical flow increases, eventually becoming sigmoidal. The lateral potholes, located on the walls of the river channel, are deeper than they are wide, and represent a destructive phase of evolution.

**Keywords:** Corrosion; River erosion; Intermittent rivers; Brazilian semi-arid region.

## 1. Introdução

Marmitas (*potholes*) são formas erosivas associadas a rios de leito rochoso (*bedrock rivers*), comuns, principalmente, em afloramentos de granito e arenito (TWIDALE; ROMANÍ, 2005), mas que também ocorrem em leitos basálticos (COTTON, 1963) e gnáissicos (ORTEGA-BECERRIL; GARROTE, 2023). Tratam-se de formas resultantes da ação combinada da dinâmica hidráulica com os processos de incisão fluvial, em escala de tempo geológico ( $>10^3$ ) (PEIFER et al., 2022), que atuam sobre canais rochosos (HOWARD, 1994; LIMA, 2010), comandada pelas variações climáticas no decorrer do Quaternário (BEHLING et al., 2000; MORAIS NTO et al., 2009; FONSÊCA, 2018).

Na literatura geomorfológica, muitos trabalhos têm analisado a morfologia e os processos fluviais responsáveis pela gênese e evolução das marmitas, especificamente em afloramentos granítico-gnáissico e, ocasionalmente, em litologia sedimentar, a exemplo dos trabalhos de Lorenc; Barco; Saavedra (1994), Richardson e Carling (2005), Ortega-Becerril et al. (2014), Pelletier et al. (2015), Dhali e Biswas (2017), Costa et al. (2021) e Ortega-Becerril e Garrote (2023).

Esses trabalhos demonstram a importância da interação dos sistemas erosivos (e.g., corrosão/evorsão) e de intemperização química com as características litoestruturais do leito rochoso (e.g., fraturas, falhas, diques, veios e predisposição mineralógica) para o padrão, a gênese e a evolução das marmitas em diferentes litologias (ORTEGA et al., 2014). As marmitas podem ocorrer isoladamente ou aglomeradas e, em alguns casos, apresentar sedimentos mal selecionados em seu interior (ORTEGA-BECERRIL; GARROTE, 2023).

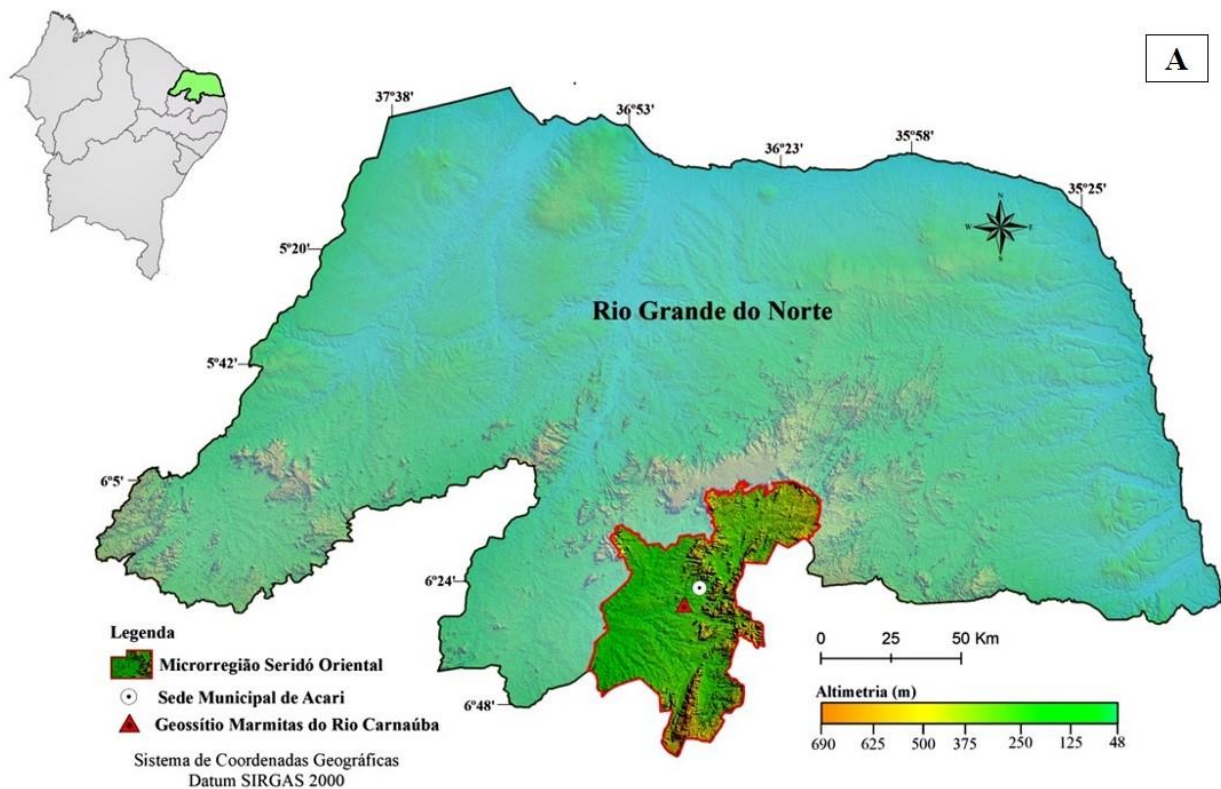
No entanto, essas depressões com geometrias diversas, comuns em todo o mundo, independente da latitude, ainda não são completamente compreendidas (LIMA, 2010; DHALI; BISWAS, 2017). As pesquisas sobre as formas erosivas de leito fluvial, a exemplo das marmitas, são incipientes, sobretudo na literatura brasileira, mesmo reconhecendo que elas constituem elementos comuns nas diversas paisagens do território nacional (WALDHERR; ARAÚJO-JÚNIOR; RODRIGUES, 2017; LIMA et al., 2023).

No NE brasileiro, poucos trabalhos atestam os efeitos do processo de evorsão na esculturação das marmitas, sejam de ênfase estrutural, a partir da análise das colisões energéticas entre os sedimentos detríticos transportados pelas águas fluviais e as superfícies de discontinuidades (LIMA, 2010), sejam enfatizando a relação entre a eficiência da erosão fluvial, em escala de tempo geológico, e a resistência do substrato rochoso do leito exposto em superfície, que pode estar diretamente associado ao tipo e a composição mineralógica das rochas expostas no canal (COSTA et al., 2021).

Nessa perspectiva, o presente trabalho pretende demonstrar como os condicionantes litoestruturais podem constituir o ponto inicial para o processo de evorsão em canais fluviais graníticos. Para tanto, foi selecionado o Geossítio Marmitas do Rio Carnaúba, no Seridó Geoparque Mundial da UNESCO, NE do Brasil, como área amostral. Nesse *hotspot* de geodiversidade (NASCIMENTO et al., 2021), o leito rochoso do rio Carnaúba está sujeito a processos de erosão hidráulica comandados pelas oscilações no grau de aridez, verificadas ao longo do Quaternário, pelo gradiente erosivo produzido ao longo perfil longitudinal e pela predisposição mineralógica e petrográfica do embasamento granítico.

## 2. Área de Estudo

O Seridó Geoparque Mundial da UNESCO, com uma área de 2.802 km<sup>2</sup> (SILVA; NASCIMENTO; COSTA, 2022), exibe um dos mais completos e belos geopatrimônio do NE do Brasil, com paisagens que refletem os inúmeros processos naturais em que a região foi submetida no decorrer do tempo geológico. O Geoparque Seridó, conta com 21 geossítios, distribuídos em 6 municípios, localizados na porção oriental do Domínio Rio Piranhas-Seridó-DRPS (NASCIMENTO; MEDEIROS; GALINDO, 2015). Dentre esses *hotspots* de geodiversidade destaca-se o Geossítio Marmitas do Rio Carnaúba (GMRC), situado em um pequeno trecho de leito rochoso do rio Carnaúba, próximo à sua desembocadura no rio Acauã, no município de Acari-RN, na microrregião do Seridó Oriental, sob as coordenadas geográficas 6°29'43''S e 36°41'32''W (Figura 1). Geologicamente, esse geossítio está inserido no contexto da atividade plutônica ediacarana (ANGELIM et al., 2006), uma das mais importantes unidades geológicas da Província Borborema, ocupando pequena porção do setor SW do Plúton Acari.



**Figura 1.** (A) Localização do GMRC, Microrregião do Seridó Oriental, Rio Grande do Norte, NE do Brasil; (B) Setor I do GMRC (Vale da Lua Potiguar); (C) Setor II do GMRC (Pedra da Caveira). Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

A Província Borborema (PB) é uma das principais unidades geotectônicas do NE brasileiro, sendo subdividida, por zonas de cisalhamento (ZC) de direção E-W (ZC de Pernambuco e ZC de Patos) em três domínios: Meridional, Transversal e Setentrional (ANGELIM et al., 2006; ARCHANJO et al., 2013). Neste último, encontra-se o Plúton Acari, que ocupa grande parte do setor oriental do DRPS (NASCIMENTO; MEDEIROS; GALINDO, 2015), delimitada por zonas de cisalhamento de direção NE-SW (ANGELIM et al., 2006).

O Plúton Acari, aflorante no município homônimo com  $\approx 300 \text{ km}^2$  (CAMPOS, 2016), é intrusivo nos ortognaisses foliados e gnaisses bandados paleoproterozoicos (Complexo Caicó) e nas metassupracrustais neoproterozoicas (Grupo Seridó) que repousam discordante sobre a variada gama de litologias do Complexo Caicó (ARCHANJO et al., 2013).

Os granitos do Plúton Acari são leuco e mesocráticos de granulação grossa a porfirítica (megacristais de feldspato de até 5 cm) (CABRAL NETO et al., 2018). Esse corpo granítico, na área objeto de estudo, está associado a dioritos/gabros de textura fina a média da Suíte São João do Sabugi, além de apresentar fácies intermediárias de mistura magmática (DANTAS et al., 2012; NASCIMENTO; MEDEIROS; GALINDO, 2015).

Do ponto de vista geomorfológico, o GMRC localiza-se na superfície erosiva rebaixada dos Sertões do Piranhas, onde os processos denudacionais cenozoicos conduziram à progressiva exumação do embasamento ígneo, revelando um diversificado mostruário de formas graníticas, a exemplo de maciços, *inselbergs* e lajedos. Nessa perspectiva, em se tratando da evolução de relevos graníticos, merece destaque a Teoria da Etchplanação (BÜDEL, 1982), a qual afirma que a evolução do modelado terrestre deriva de diferentes situações paleoclimáticas e estruturais, considerando não apenas a dinâmica climática atual, mas também a noção de poligenia, relacionando-se a um ciclo de etchplanação-pediaplanação (SALGADO, 2007).

As marmitas que constituem esse *hotspot* de geodiversidade formaram-se sobre a base do lajedo “Cai Peixe” (LCP), o qual apresenta forma dômica alongada elípticamente, tipo *whalebacks* (dorso de baleia), com altitude de  $\approx 260 \text{ m}$ .

Essa superfície erosiva é caracterizada por uma precipitação média anual que varia de 460 a 670 mm/ano, com chuvas de verão-outono, sendo o trimestre mais chuvoso de fevereiro a abril (EMPARN, 2010). Os processos denudacionais atuantes, na área de estudo, estão subordinados ao clima semiárido (DINIZ; PEREIRA, 2015), com temperatura média anual de  $27,5^\circ\text{C}$ , com máxima de  $33^\circ\text{C}$  e mínima de  $21^\circ\text{C}$  (MUTZENBERG, 2007; LUCENA, 2016; TAVEIRA, 2019), insolação de  $\approx 2.455$  horas/ano (BEZERRA JÚNIOR; SILVA, 2007), o que justifica as altas taxas de evapotranspiração, baixa umidade do solo e balanço hídrico negativo ao longo do ano.

A vegetação predominante é a caatinga arbustiva decídua hiperxerófila, com porte variável, apresentando cactáceas (e.g., *Melocactus zehntneri* – Coroa de frade) e bromeliáceas (e.g., *Encholirium spectabile* – Macambira). No entanto, em consequência dos desmatamentos indiscriminados associados às lavouras temporárias (milho e feijão) e à pecuária extensiva, a cobertura vegetal nessa área tem apresentado redução fisionômica e florística, sendo substituída por espécies herbáceas.

### 2.1. Aspectos Gerais e Morfogênese Regional

Na porção setentrional da PB, os soerguimentos associados as fases *rift* e *pós-rift* (Jurocretáceo), durante a abertura do Atlântico (MATOS, 2000), e *drift*, relacionados à inversão tectônica, atuante desde o Paleogeno, resultante de esforços compressivos de direção NW-SE e W-E (CREMONINI; KARNER, 1995), assim como os movimentos flexurais entre o Eoceno e Mioceno (PEULVAST; CLAUDINO SALES, 2006) e ao magmatismo intraplaca de natureza basáltica (KNESEL et al., 2011) afetaram o potencial erosivo fluvial ao desajustar os gradientes fluviais das bacias hidrográficas do NE setentrional.

Essa história morfotectônica regional foi responsável pela atual organização hidrográfica, a exemplo da bacia hidrográfica do rio Carnaúba situada a oeste da vertente ocidental do Planalto da Borborema (Figura 2), cuja evolução, de provável idade pós-paleogena, está associada ao desmantelamento do recobrimento laterítico da Formação Serra do Martins (CORRÊA, 2001; LIMA; CORRÊA; FONSÊCA, 2016).

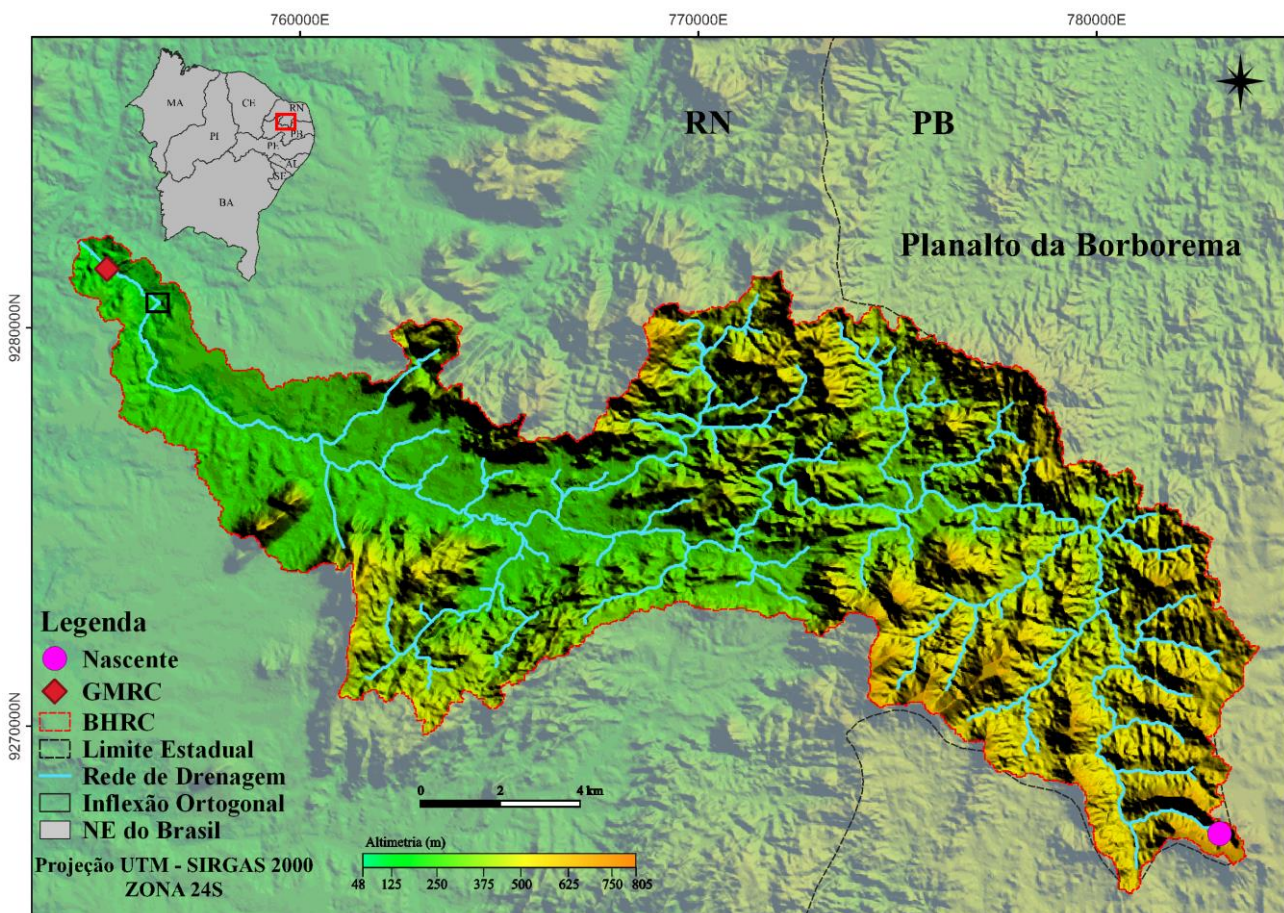
Em adição aos soerguimentos, evidências palinológicas e sedimentológicas demonstram que os processos erosivos foram intensificados do Neogeno até meados do Holoceno Médio, por oscilações no grau de aridez, com curtos intervalos de reumidificação, relacionados, por exemplo, aos eventos Heinrich (MORAIS NETO et al., 2009; WANG et al., 2004) e ao intervalo denominado de ótimo climático (máximo da umidificação), que ocorreu entre 7.500 e 4.500 anos A.P., no NE brasileiro (BEHLING et al., 2000; CORRÊA, 2001; MISSURA, 2013).

Essas oscilações climáticas foram responsáveis pela remobilização de espessos regolitos, bem como pelo aumento na capacidade de transporte de sedimentos com maior aporte granulométrico, tanto em ambientes de encostas como em ambientes fluviais (LIMA; CORRÊA; FONSÊCA, 2016; FONSÊCA, 2018). Morais Neto et al. (2012) apontaram taxas de erosão entre 15-22 m.Ma<sup>-1</sup> para as superfícies erosivas rebaixadas da PB.

Para Mutzenberg (2007), o período entendido como Holoceno Médio apresentou, na área da BHRC, um regime pluviométrico mais estacional e regular (ótimo climático), associado a condições paleoambientais mais úmidas, de maior dinâmica e fluxo fluvial, com sedimentos aluviais e coluviais, presentes sob a forma de terraços fluviais, espacialmente disjuntos, e leques em média encosta.

Portanto, o maior potencial erosivo do rio Carnaúba esteve associado aos soerguimentos pós-Paleógeno, responsáveis pelo rejuvenescimento dos gradientes fluviais, e as oscilações climáticas verificadas entre o Neogeno e o Holoceno Médio. A presença de inflexões ortogonais no canal do rio Carnaúba, denunciam a adaptação, progressiva, do fluxo às estruturas de deformação rúpteis de orientação NW-SE e W-E, divergindo da direção tectônica predominante NE-SW. As reativações tectônicas pós-miocênicas (MAIA; BEZERRA, 2013; OLIVEIRA et al., 2023) resultaram dos esforços compressivos W-E e NW-SE, ao longo das estruturas de deformação dúcteis e rúpteis, associados a expansão do assoalho oceânico mesoatlântico, a compressão da Cadeia Andina e ao evento termotectônico “Magmatismo Macau” (BEZERRA; VITA-FINZI, 2000; ASSUMPÇÃO et al., 2016; BEZERRA et al., 2020).

Na transição do Pleistoceno/Holoceno houve um ambiente bem mais úmido que o atual (CORRÊA, 2001; MISSURA, 2013), com maior precipitação e aumento da umidade devido ao rápido aquecimento do planeta. Esse clima quente e úmido e com precipitação possivelmente regular, verificado regionalmente, ocorreu até o Holoceno Médio (MUTZENBERG, 2007). No entanto, foi, somente, a partir do início do Holoceno, que a atuação da Zona de Convergência Intertropical-ZCIT se fez mais presente nas regiões a oeste do Planalto da Borborema (CORRÊA, 2001).



**Figura 2.** Delimitação e altimetria da bacia hidrográfica do rio Carnaúba (BHRC). Fonte: Elaborado pelos autores (2023), a partir de edição de imagem SRTM.

Em outras palavras, uma certa estabilidade climática (reumidificação) parece ter caracterizado a BHRC, principalmente, durante o Ótimo Climático do Holoceno, onde foi verificado um fluxo fluvial mais regular e com maior capacidade de transporte de sedimentos detríticos (MUTZENBERG, 2007), podendo ser estas as condições necessárias para desencadear os processos de formação de *potholes* no LCP. Além de fatores ligados as influencias climáticas quaternárias, a existência de *Knickpoints* e a conseqüente exposição do leito rochoso do rio Carnaúba, na área de estudo, pode estar associada a movimentos de origem neotectônica.

### 3. Materiais e Métodos

O percurso metodológico do presente trabalho contou, primeiramente, com uma ampla revisão bibliográfica acerca de feições erosivas em leitos rochosos. As ferramentas de SIG proporcionaram, a partir da aquisição de imagens com veículo aéreo não tripulado (Vant) modelo Mavic 2 Pro, equipado com uma câmera 4K de 35 mm, a construção de um ortomosaico de imagens aéreas que subsidiou a elaboração de um banco de dados geoespaciais com arquivos matriciais e vetoriais, os quais viabilizaram a extração detalhada das estruturas de descontinuidades do leito rochoso do rio Carnaúba, a descrição dos parâmetros morfométricos das marmitas, assim como a determinação da direção preferencial tanto das marmitas quanto dos planos de fraqueza.

O levantamento aerofotogramétrico foi realizado com 70% de sobreposição frontal e lateral, processado no Agisoft PhotoScan (Licenciado para o Laboratório de Geomorfologia da Universidade Federal do Ceará). Os arquivos vetoriais das estruturas de descontinuidades, as rosetas e os mapas foram elaborados em ambiente SIG por meio do *software* livre QGIS versão 3.22. A confecção dos blocos diagramas, que demonstram a relação entre as descontinuidades estruturais e a distribuição das marmitas, foi realizada por meio do *software* CorelDRAW Graphics Suit (Windows).

As informações geológicas foram obtidas a partir da Folha Currais Novos (SB.24-Z-B-II), na escala de 1:100.000 (DANTAS et al., 2012), e do mapa geológico da Província Pegmatítica da Borborema, na escala de 1:250.000 (CABRAL NETO et al., 2018), sendo complementadas com descrição macroscópica das rochas encontradas na área do GMRC.

A descrição macroscópica, realizada no Laboratório de Mineralogia e Petrografia do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, envolveu o uso de microscópio estéreo binocular, modelo Olympus SZ40, canivete e imã. Esse procedimento passou pela identificação dos minerais presentes, com base em suas diferentes propriedades (e.g., cor, clivagem, dureza). Com isso, observou-se o destaque de minerais félsicos (quartzo e feldspatos), no Setor II. A caracterização petrográfica das 5 (cinco) amostras de rochas (duas das fácies granítica dominante; uma da fácies diorítica; uma das fácies dos gnaisses; e uma de diques de leucomicrogranito), relacionadas ao GMRC, envolveu ainda a relação entre os diferentes minerais caracterizando os aspectos texturais, como tamanho e forma dos diferentes grãos. Por fim, com os minerais identificados foi possível classificar as rochas com base no diagrama QAP (STRECKEISEN, 1976).

A identificação, em campo, das 849 marmitas, envolveu o uso de GPS Garmin 62s, bússola, trena métrica, câmera digital Canon R100, para registro fotográfico, e caderneta para registro das variáveis morfométricas (Comprimento [C], Largura [L] e Profundidade [P]).

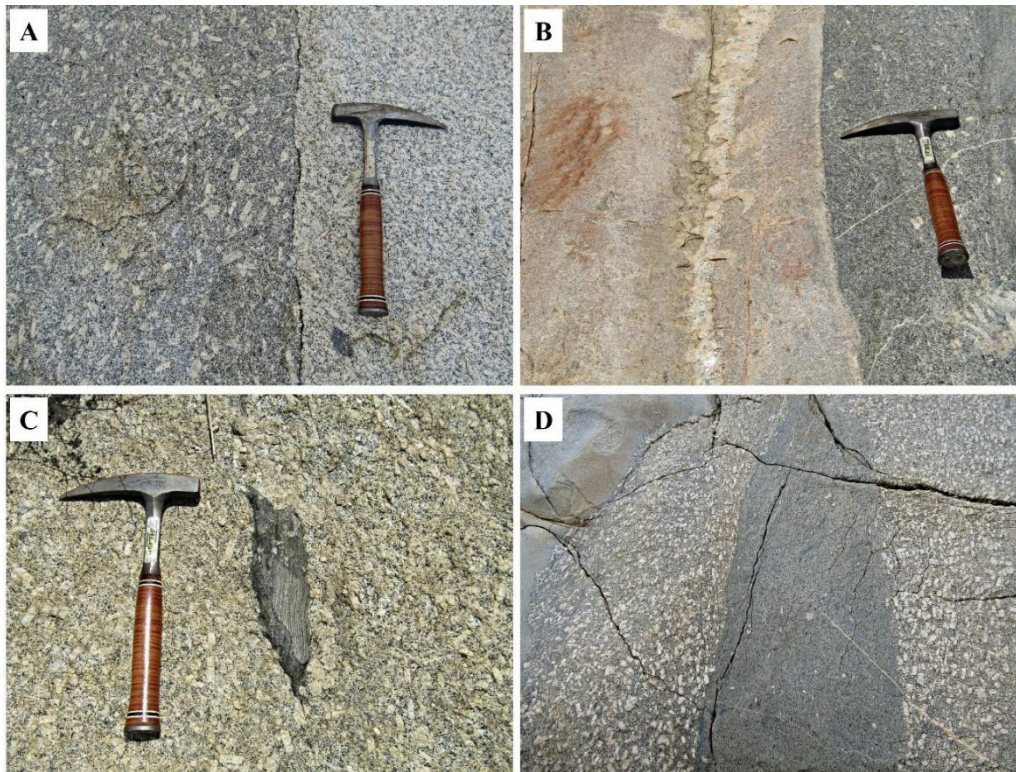
A categorização das marmitas foi realizada com base nos parâmetros morfométricos estabelecidos por Richardson e Carling (2005), em quatro grupos: incipientes, cilíndricas, sigmoidais (coalescentes) e laterais. As interpretações geológicas e paleoclimáticas cenozoicas permitiram correlacionar as marmitas com o contexto litoestrutural do GMRC.

### 4. Resultados

#### 4.1. Contexto Geológico do Geossítio Marmitas do Rio Carnaúba

Os granitos que compõem o LCP apresentam três fácies distintas: i) fácies granítica caracterizada por rochas leuco a mesocráticas (monzogranitos), de granulação grossa a porfírica, inequigranulares, tipo Itaporanga, com biotita representando o máfico principal (Figura 3A); ii) fácies granítica caracterizada por rochas leucocráticas (sieno a monzogranitos), equigranulares, com granulação fina a média (Figura 3B); iii) fácies diorítica (Figura 5B), mesocrática, inequigranular, disposta na forma de enclaves máficos de forma ovalada ou elipsoidal de dimensões

centimétricas a métricas (Figura 3D), granulometria fina a média, por vezes exibindo feições de coexistência de magma (*mingling*), com granitoides porfíricos.



**Figura 3.** Feições de campo para as rochas do LCP. (A) Contato entre granito porfírico, tipo Itaporanga, e granito de granulação fina a média, associado a Suíte Dona Inês. (B) Dique de leucomicrogranito equigranular que corta fácies granítica de granulação grossa, com biotita representando o máfico principal. (C) Xenólito de gnaiss mesocráticos bandados, de textura granolepidoblástica, em granito porfírico. (D) Enclave máfico (fácies diorítica) em granito porfírico. Fonte: Acervo dos autores (2023).

Além dessas unidades, o LCP é afetado por diques de pegmatitos cambrianos (leucogranitos homogêneos/heterogêneos), de textura média a grossa (Figura 4A); diques de aplíticos (leucomicrogranito equigranular) intrusivos nas fácies graníticas (Figura 3B), de textura fanerítica muito fina a fina, e de dimensões centimétricas a decimétricas, frequentemente associados a pegmatitos (Figura 5A); veios de quartzo, com larguras centimétricas, assim como juntas de distensão preenchidas por quartzo; e veios milimétricos a centimétricos de material rico em quartzo/feldspato, associado a óxidos (e.g., magnetita, ilmenita) (Figura 4B), os quais se apresentam oxidados, gerando manchas ferruginosas.

Há ainda a ocorrência de xenólitos e megaxenólitos de diorito (Suíte São João do Sabugi) e de gnaisses mesocráticos bandados e dobrados (Figura 3C), de textura granolepidoblástica, principalmente, nas fácies granítica de granulação grossa a porfírica, associada a Suíte Itaporanga.

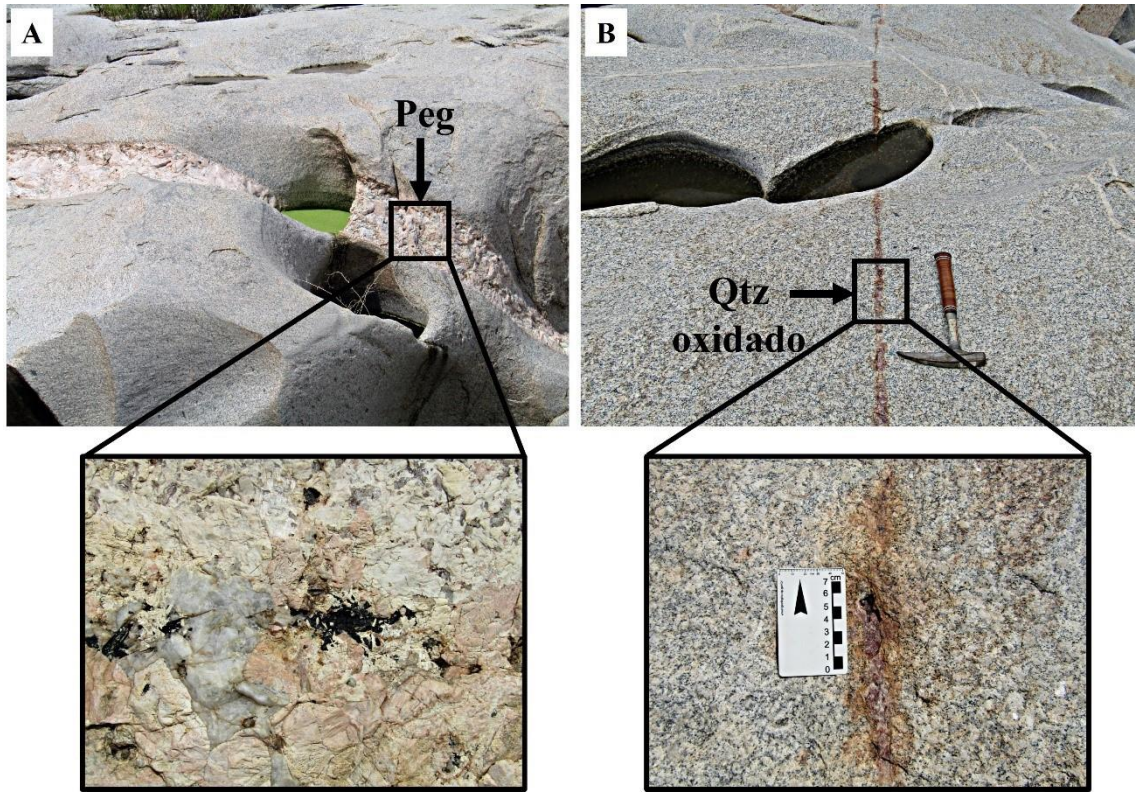


Figura 4. (A) Dique de pegmatito (Peg) em granito de granulação fina a média. (B) Granito de granulação fina a média cortado por veio de quartzo, com presença de minerais ferromagnesianos. Fonte: Acervo dos autores (2023).

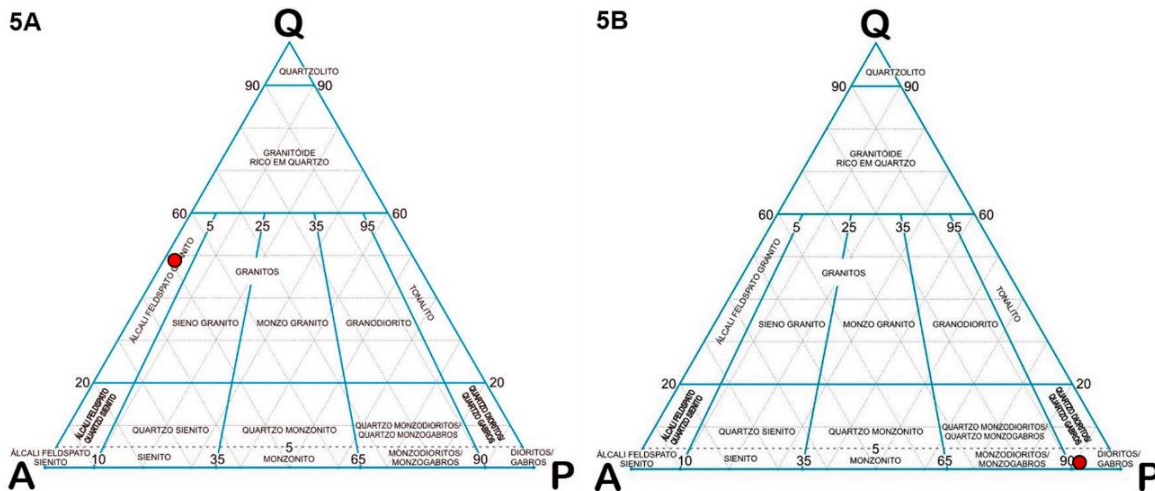


Figura 5. Classificação modal (Q-A-P) de Streckeis (1976) para os granitos aplíticos (5A) e rochas diorítica (5B). Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

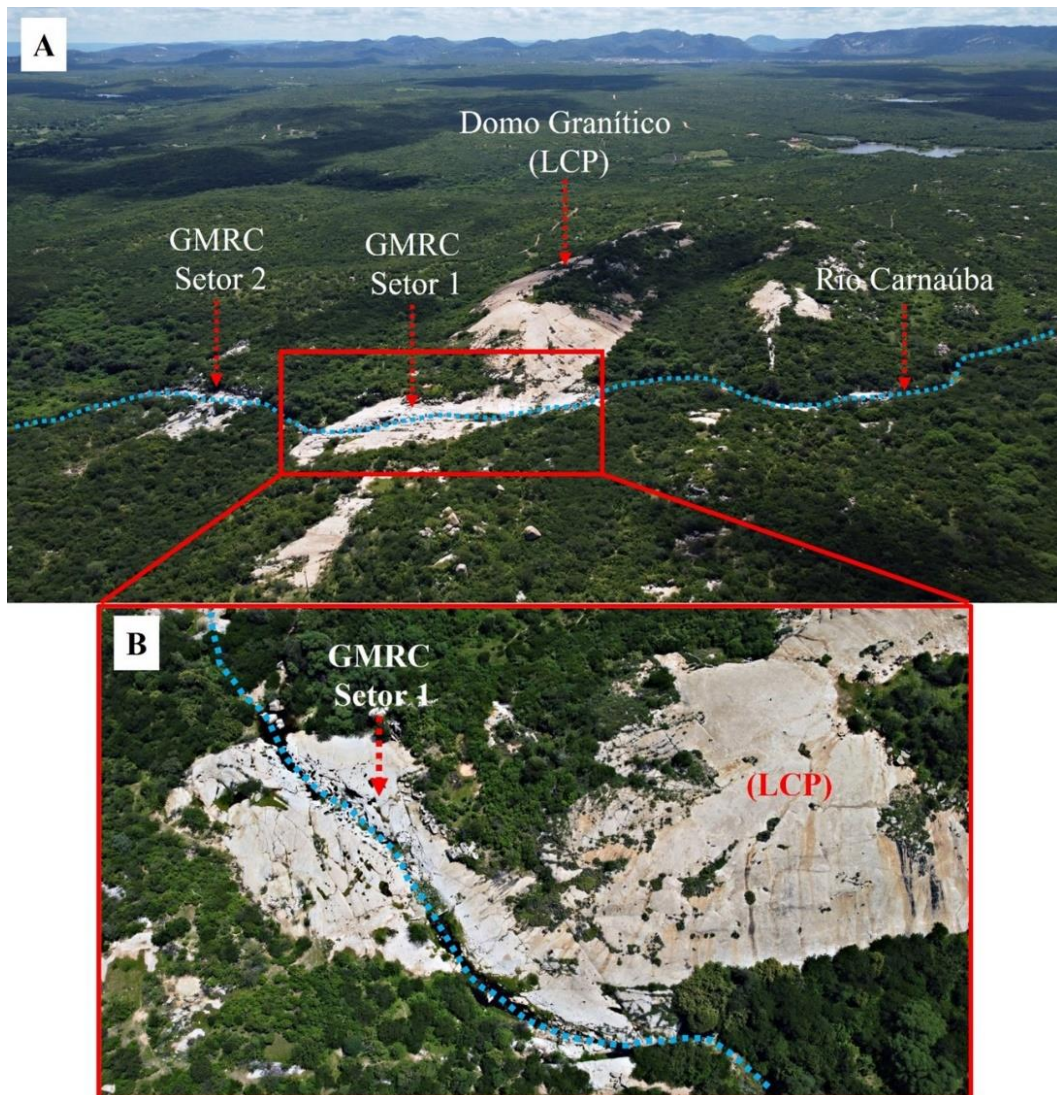
A ocorrência de distintas fácies litológicas (e.g., granitos, pegmatitos, leucomicrogranito, dioritos, gnaisses) e de discontinuidades estruturais (e.g., fraturas, fissuras, veios, diques), no LCP, denota reflexos morfológicos, associados, principalmente, ao desgaste abrasivo, responsável por esculpir nas fácies graníticas as paleomarmitas, cujos tamanhos podem variar de alguns centímetros a até vários metros de diâmetro.

4.2. Exumação do LCP e Origem das Formas de Leito Fluvial

A exumação do domo granítico de direção NE-SW, durante os ciclos denudacionais cenozoicos, associado a movimentos de origem neotectônica, viabilizou uma ruptura de declive de ≈11 m, no gradiente do canal do rio Carnaúba. Esse *knickpoint* e o encaixe do canal principal (Figura 6), em estruturas de deformações rúpteis de direção NW-SE, que seccionaram a base do LCP, proporcionaram a concentração da vazão, nessa seção fluvial e,



consequentemente, o aumento da energia potencial do fluxo, a competência e capacidade de transporte de sedimentos detríticos, assim como o desgaste do leito do rochoso, em função do material transportado.



**Figura 6.** (A) Imagem aérea do GMRC, no período chuvoso (Setor 1-Vale da Lua Potiguar; Setor 2-Pedra da Caveira) e do LCP. (B) destaque para o Setor 1, onde o rio Carnaúba secciona a base do LCP controlado por estruturas de descontinuidades. Fonte: Acervo dos autores (2023).

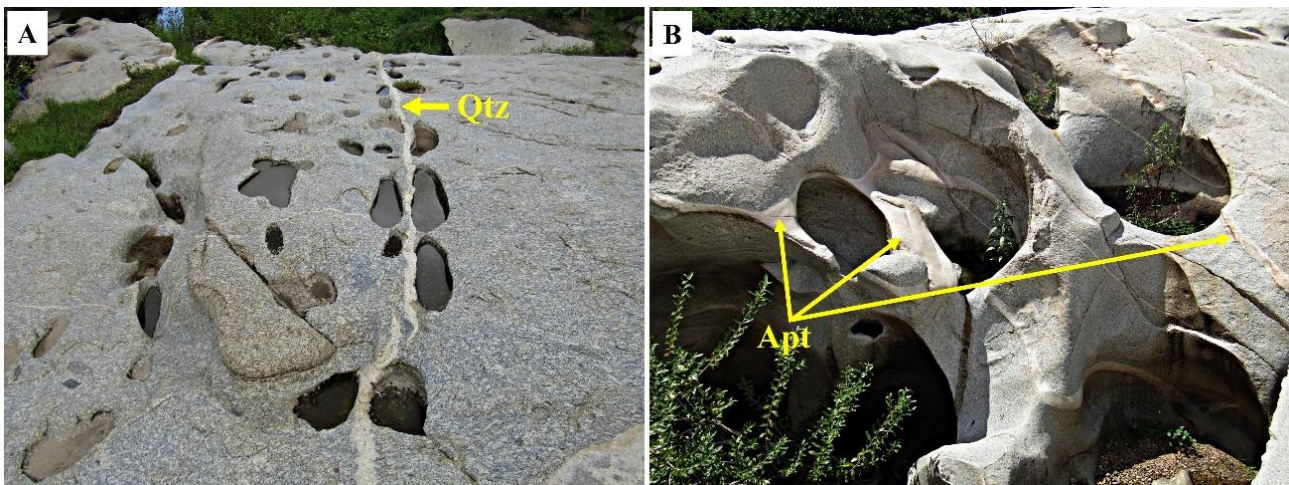
A divergência entre a direção do canal e do domo granítico indica a adaptação do rio Carnaúba, na área de estudo, onde apresenta declividade entre 1,5° a 4,2° (MUTZENBERG, 2007), a planos de fraqueza que exercem importante influência na dissecação fluvial. Nesse trecho de convexidade anômala no perfil longitudinal, o canal principal do rio Carnaúba apresenta características condizentes com um contexto de evolução de drenagem transversal por superimposição e vazão, em quadra chuvosa regular, suficientemente alta para proporcionar o desgaste abrasivo do leito rochoso (*bedrock*).

O desgaste abrasivo (corrasão) provocado pelas colisões energéticas entre os sedimentos detríticos, de composição e granulometria variada (e.g., areia e seixos), transportados pelo fluxo turbulento, com leito rochoso do rio Carnaúba, originaram depressões incipientes locais de aumento de pressão estática. A pressão exercida pelo movimento turbilhonar do fluxo hídrico (evorsão), na carga do leito estacionária, aprofundou e ampliou as depressões, cujas feições resultantes são denominadas de marmitas ou *potholes*, as quais apresentam diferentes formas e tamanhos.

Na área do GMRC, a propagação das marmitas é facilitada pelas características relativas a predisposição mineralógica das fácies graníticas, pela distribuição de descontinuidades estruturais (e.g., fraturas, veios e diques), assim como pela presença de xenólitos de gnaisses mesocráticos, megaenclaves de diorito e outros enclaves

máficos. A presença de estruturas rúpteis de direção predominante NW-SE potencializou a eficiência da erosão fluvial determinada pela resistência das fácies graníticas e pela limitação associada à morfogênese semiárida.

As superfícies de descontinuidades, assim como os xenólitos e enclaves condicionaram e continuam condicionando a seletividade do intemperismo e a eficiência dos processos erosivos fluviais (Figura 7), que modelaram e continuam modelando as marmitas no leito rochoso do rio Carnaúba, mesmo que em menor intensidade, em função da estabilização climática da paisagem semiárida, no Holoceno Superior (BEHLING et al., 2000; CORRÊA, 2001; MUTZENBERG, 2007) e, conseqüentemente, da intermitência do fluxo fluvial. Essa característica atual da BHRC proporciona longos períodos de baixa ou nula atividade fluvial, alternados com curtos períodos de escoamento de alto fluxo e energia, em função de eventos pluviométricos extremos, apresentando, assim, competência para o transporte de carga de fundo, bem como para a formação de marmitas e ampliação ou destruição das marmitas.

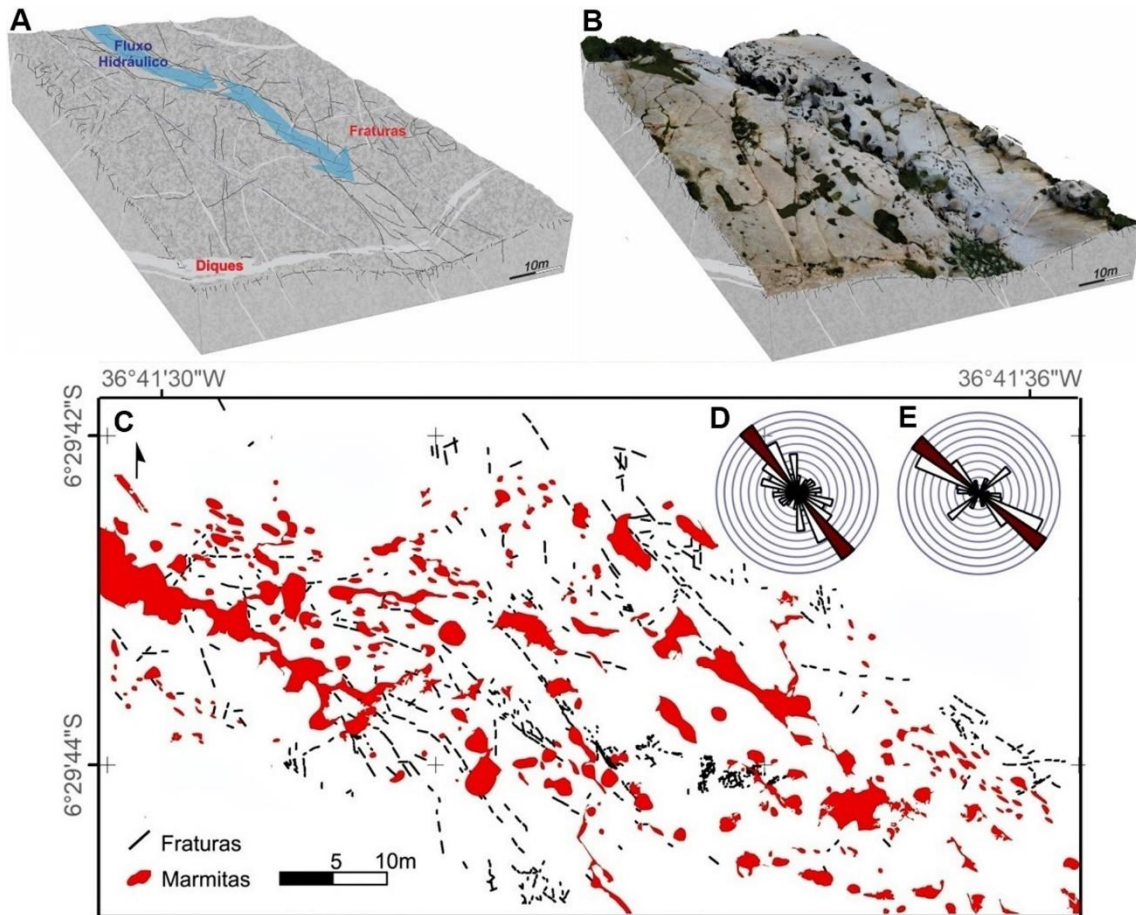


**Figura 7.** (A) Início da formação de marmitas dispostas ao longo de superfícies de descontinuidades representadas pelo contato entre veio de quartzo (Qtz) com a rocha hospedeira (granito inequigranular). (B) Marmitas dispostas ao longo do contato de diques aplíticos (Apt) com granito equigranular. Fonte: Acervo dos autores (2023).

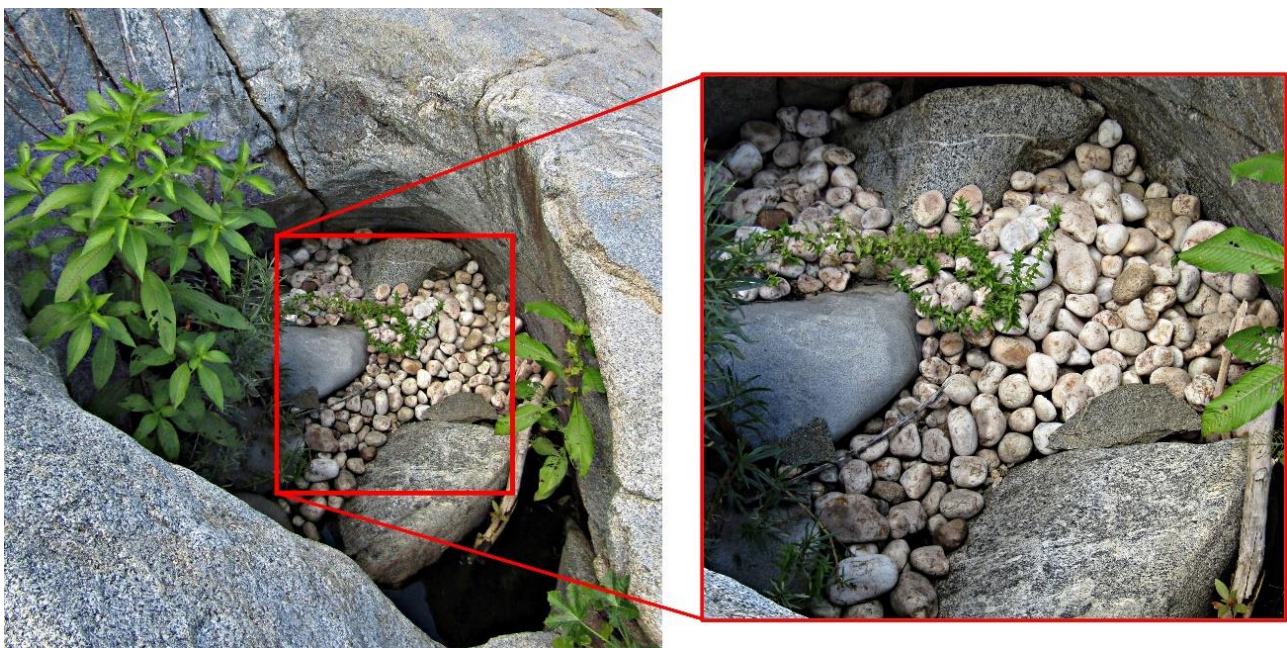
Os processos de corrasão e evorsão, no Setor I do GMRC, tendo em vista a maior resistência da fácies leucocrática, predominante nesse setor, tiveram os seguintes vetores facilitadores de formação e propagação das marmitas: i) o encaixe do canal principal do rio Carnaúba em planos de fraqueza; ii) a alta densidade de descontinuidades estruturais que seccionam as rochas expostas no canal (Figura 8); iii) o contato entre as fácies graníticas; e iv) a desagregação granular dos fenocristais de K-feldspato da fácies mesocrática, proporcionada pela maior solubilidade da biotita em comparação com os demais minerais analisados.

A análise acerca dos padrões de orientação revelou uma tendência de fraturamento NW-SE (Figura 8). Essa direção coincide com o eixo maior de desenvolvimento da maioria das marmitas que possuem forma variando de sigmoidal a elíptica.

O encaixe do canal principal do rio Carnaúba, em planos de fraqueza, potencializou tanto a competência quanto a capacidade do transporte fluvial. Essas características do rio Carnaúba, na área do GMRC, podem ser constatadas através do calibre e da quantidade de sedimentos encontrados tanto no leito do rio como no interior das marmitas (Figura 9).



**Figura 8.** Setor I do GMRC. (A) Bloco diagrama representativo do fluxo fluvial do rio Carnaúba e dos planos de fraqueza. (B) Ortomosaico demonstrando a relação entre os planos de fraqueza e a distribuição das marmitas. (C) Diagramas de roseta das estruturas relacionadas às marmitas, onde a letra “D” indica a direção predominante dos planos de descontinuidades e a letra “E” indica o sentido principal do eixo das marmitas. Fonte: Acervo dos autores (2023).



**Figura 9.** Calibre da carga abrasiva (seixos de quartzo) transportada pelo rio Carnaúba, preenchendo a marmita. Fonte: Acervo dos autores (2023).

A presença da brusca inflexão ortogonal do canal principal, da direção NNE-SSW para WNW-SSE (Figura 2), e a ocorrência de terraços fluviais abandonados (MUTZENBERG, 2007), verificados nas proximidades do GMRC, podem estar correlacionados a esforços neotectônicos verticais, os quais possivelmente alteraram o gradiente do canal em  $\approx 11$  m, influenciando, assim, os processos de erosão fluvial.

Mutzenberg (2007), analisando a distribuição espacial do índice de RDE (Relação Declividade-Extensão) na BHRC, afirmou que os valores de RDE tendem a aumentar ao longo da bacia, com os maiores valores próximos à sua desembocadura no rio Acauã, indicando uma forte tendência de influência de processos neotectônicos para os últimos quilômetros da bacia, onde se insere a área de estudo.

O intemperismo químico e físico ao longo das estruturas de descontinuidade e nas pequenas cavidades originadas pela desagregação granular de megacristais de microclina, assim como nos enclaves e xenólitos máficos, contribuíram para o enfraquecimento das fácies graníticas, facilitando, assim, o desgaste abrasivo e o turbilhonamento vertical do fluxo hídrico.

No setor II do GMRC verifica-se uma grande incidência de marmitas, bem desenvolvidas, em função das seguintes características: i) pequena ruptura de declividade de  $\approx 6$  m de desnível, que corresponde a uma quebra de gradiente do canal, entre o trecho a montante (Setor I do GMRC) e um a jusante; ii) predominância de duas fácies graníticas mesocráticas, uma diorítica, e outra porfirítica; e, iii) ocorrência significativa de diques/vênulas de leucomicrogranito equigranular, e de fraturas e fissuras.

A mudança de declividade no canal fluvial, gerando um *knickpoint*, determinou a alteração no gradiente do fluxo hidráulico, entre os dois setores do geossítio, e conseqüentemente potencializou a eficiência dos processos de corrasão e evorsão, sendo o enriquecimento das fácies graníticas em minerais máficos (e.g., biotita), que lhes conferem uma maior solubilidade, e a alta densidade de diques/vênulas de aplíticos, que proporcionam setores de fragilidade, os facilitadores dos processos associados à gênese e evolução das marmitas. Já as estruturas de deformação rúpteis, por serem áreas preferenciais ao intemperismo físico-químico, induziram os processos de coalescência das marmitas.

#### 4.3. Distribuição Espacial e Classificação Morfológica das Marmitas

No GMRC foram contabilizadas 849 marmitas, sendo 638, no Setor I (Vale da Lua Potiguar), e 211 no Setor II (Pedra da Caveira), com comprimento variando de 0,08 m a 24 m (média de  $\approx 0,87$  m), largura entre 0,03 a 11 m (média de  $\approx 0,48$ ) e profundidade entre 0,01 m a 3,7 m (média de  $\approx 0,23$  m).

Desse total, apenas 45 marmitas estão parcialmente preenchidas por sedimentos detríticos (areia e seixos), sendo que algumas destas encontram-se afastadas do canal principal, justificando a competência e capacidade do fluxo fluvial do rio Carnaúba, assim como um nível de fluxo de água mais elevado, decorrente tanto de paleoclima mais úmido quanto de episódios de chuvas torrenciais atuais. Além das influências climáticas quaternárias, a existências de marmitas afastadas do atual leito do rio Carnaúba pode estar, possivelmente, associada a mudança no talvegue por neotectônica, justificando, dessa forma, uma maior concentração de marmitas incipientes, na margem direita do rio Carnaúba, próximas do canal principal.

Apesar das variedades de formas, e embora cada setor do GMRC apresente características litoestruturais específicas, como, por exemplo, predisposição mineralógica às alterações químicas, categorizamos as marmitas do GMRC, segundo os parâmetros morfométricos adotados por Richardson e Carling (2005), em quatro grupos: incipientes, cilíndricas, sigmoidais (coalescentes) e laterais.

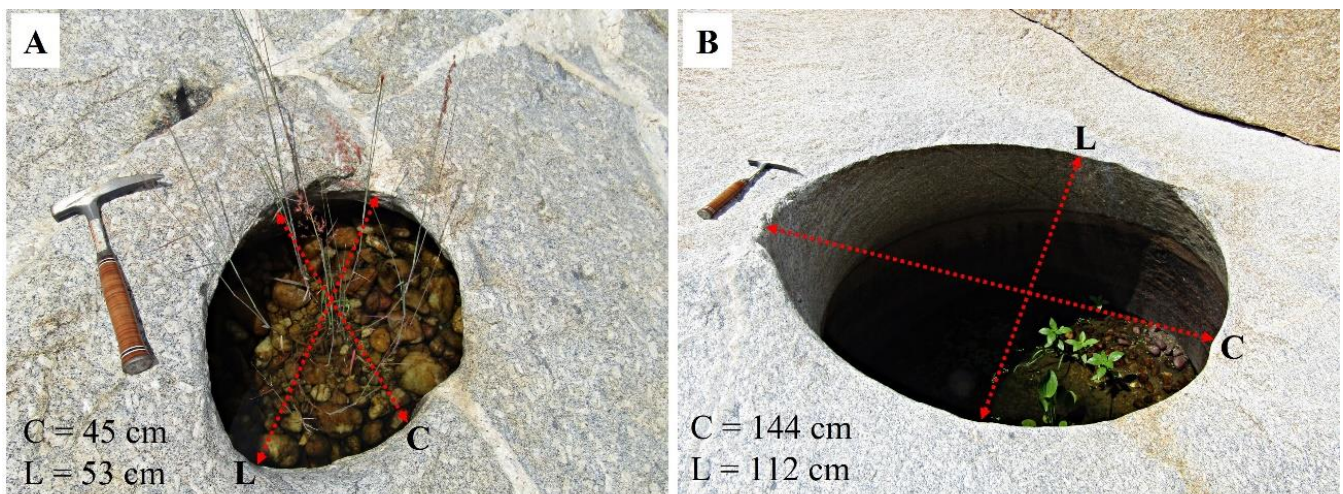
As marmitas incipientes ou elíptica são cavidades rasas e alongadas no sentido do fluxo (comprimento [C] > largura [L]), imaturas, localizadas próximas do canal fluvial, ou seja, do fluxo turbulento, representando o estágio inicial da formação, o qual está intimamente associado a vórtices hidráulicos, cujo sentido da pressão estática pode variar entre horizontal e vertical (Figura 10).

A evolução para a forma cilíndrica se dá, gradualmente, a partir do aprofundamento e alargamento, proporcionado pelo aumento da vorticidade vertical. Segundo Richardson e Carling (2005), nesse estágio de formação, as marmitas, muitas vezes, são incapazes de reter sedimentos em função de suas dimensões verticais limitadas.



**Figura 10.** Marmitas incipientes, em forma de “pegadas”, de orientação longitudinal ao fluxo do rio Carnaúba. “C” indica o comprimento e “L” largura. Fonte: Acervo dos autores (2023).

A maioria das marmitas cilíndricas ( $C \cong L$ ) ou subcilíndricas ( $C > L$ ) concentra-se, também, nas proximidades do canal principal, onde o fluxo hídrico ocorre durante períodos mais prolongados e, com vorticidade vertical, com competência para concentrar a energia estática e erodir o substrato rochoso. Essas feições negativas são relativamente simétricas (comprimento  $\cong$  largura) (Figura 11), no entanto, em alguns casos, apresentam forma circular alongada elipticamente, onde a elipticidade das seções horizontais varia com a profundidade da cavidade.



**Figura 11.** (A) Marmita de aspecto cilíndrico, apresentando dimensões relativamente simétricas. (B) Marmita incipiente com aspecto elipsoidal, onde o comprimento é muito maior que a largura. “C” indica o comprimento e “L” indica a largura. Fonte: Acervo dos autores (2023).

Essas cavidades correspondem ao segundo estágio de evolução de *potholes* proposto por Lorenc, Barco e Saavedra (1994), onde a profundidade e o diâmetro das cavidades permanecem aproximadamente proporcionais. Richardson e Carling (2005) afirmam que a forma quase circular é um indicador de fases iniciais de desenvolvimento das marmitas, ou seja, de baixa maturidade.

Sua gênese está associada à ação do vórtice hidráulico, o qual proporciona o desgaste abrasivo progressivo por partículas de areia e seixos que aumentam o tamanho das cavidades. No entanto, chega um momento em que a energia do fluxo é inadequada para levantar os sedimentos detríticos (e.g., seixos) em rotação e, conseqüentemente, o desgaste abrasivo torna-se menos eficaz na parte superior da marmita (LORENC; BARCO; SAAVEDRA, 1994; SPRINGER; TOOTH; WOHL, 2006). Com o passar do tempo e aumento da vorticidade lateral as formas cilíndricas evoluem para formas sigmoidais.

Em função da maior profundidade, a qual viabiliza o acúmulo de água durante o período de estiagem, assim como da densidade de estruturas de descontinuidade e do predomínio de fácies graníticas porfíricas e mesocráticas, podemos afirmar que a evolução dessa tipologia de marmita, no GMRC, tem sido intensamente influenciada pelo intemperismo químico. Além disso, o posicionamento de marmitas cilíndricas afastadas do canal fluvial ou “abandonadas” sugere uma recente diminuição da vazão do rio Carnaúba.

As marmitas sigmoidais (compostas) representam o estágio de evolução mais avançado, correspondendo à fase de coalescência, onde a ação do vórtice erosivo em uma das paredes da marmita é condicionada por estruturas de descontinuidades horizontais, às quais proporcionam a coalescência das cavidades (Figura 12). Na fase de coalescência verifica-se uma completa insubordinação entre o comprimento e a largura da cavidade.



**Figura 12.** Coalescência de marmitas induzidas por vênulações de leucomicrogranito. Contorno da marmita (tracejado amarelo), parede que delimitava as marmitas (tracejado vermelho), seta branca (sentido do fluxo secundário) e seta azul (orientação do vórtice vertical). Fonte: Acervo dos autores (2023).

O resultado da coalescência das marmitas é uma feição complexa côncava, geralmente com eixo vertical inferior ao eixo horizontal, apresentando, em alguns casos, relíquias de porções de paredes divisórias, que variam de arredondadas e suaves a cristas verticais pontiagudas e salientes.

A gênese dessas marmitas está relacionada à retomada da capacidade erosiva dos vórtices hidráulicos, que começam a ampliar a porção basal das marmitas, numa direção lateral, tornando o diâmetro da base cada vez maior que o do topo, à medida que a parte inferior da marmita se torna mais “bulbosa” (LORENC; BARCO; SAAVEDRA, 1994). Portanto, a sua evolução, em geral, está associada a um estágio evolutivo das marmitas cilíndricas (ORTEGA-BECERRIL et al., 2014).

Richardson e Carling (2005) afirmam que a conexão de cavidades individuais e o consequente desenvolvimento das formas sigmoidais/compostas se dá em função de esculturas secundárias interna, às quais proporcionam a formação de vórtices de pequena escala, na base ou nas paredes da marmita. A relação entre a morfologia dessas cavidades com a presença de juntas e fraturas apoia a ideia de diferentes estágios de desenvolvimento (aprofundamento e alargamento), ocorrendo simultaneamente (ÁLVAREZ-VÁZQUEZ; UÑA-ÁLVAREZ, 2017).

No GMRC, a direção de expansão das marmitas sigmoidais está condicionada pela orientação de superfícies de descontinuidade. No entanto, essa direção pode ser alterada, seja girando para seguir a orientação de um plano de fraqueza secundário, que cruza o caminho inicial de coalescência, ou porque um dique ou veio de maior resistência cria uma barreira à erosão fluvial e/ou aos processos intempéricos, de modo que o sentido do desgaste abrasivo das cavidades mude em direção às litologias mais fragilizadas.

Essa tipologia morfológica ocorre em ambos os setores do GMRC, porém com maior frequência no Setor II (Pedra da Caveira), onde se observa as cavidades de dimensões métricas, provavelmente, em função do predomínio de fácies mesocráticas. As de dimensões maiores encontram-se afastadas do canal fluvial. Já as menores, localizam-se próximas do canal fluvial. No entanto, todas estão associadas a estruturas de descontinuidades, independentemente de sua localização em relação ao canal do rio Carnaúba.

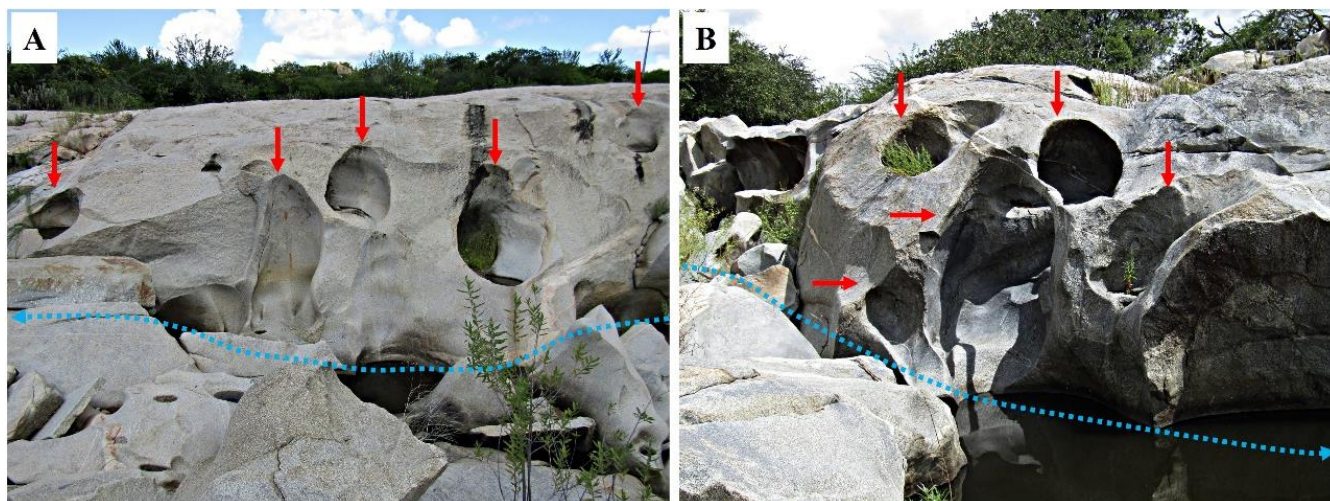
O posicionamento de grandes marmitas afastadas do canal fluvial sugere que o nível do fluxo de água no rio Carnaúba foi, possivelmente, no Holoceno Médio, mais elevado do que o atual, ou que ocorreu a migração lateral do talvegue fluvial, justificando, dessa forma, uma maior concentração de marmitas incipientes, na margem direita do rio Carnaúba, principalmente no Setor I do GMRC.

A existência de marmitas de dimensões métricas, também, sugere um estágio evolutivo “antigo”, ou seja, de maturidade erosiva. Já o número significativo de marmitas incipientes e cilíndricas, ou seja, de formas imaturas, em ambos os setores do GMRC sugere um desgaste erosivo do leito rochoso mais recente, caracterizando estágios de juventude.

As marmitas laterais são feição ligeiramente arredondas, maiores em profundidade do que em largura, localizadas nas paredes laterais do canal do rio Carnaúba, e ao longo dos flancos de obstáculos ao fluxo (blocos rochosos), representando a fase destrutiva, com piso e paredes rompidos, e um certo grau de maturidade (Figura 13).

Essas cavidades proporcionam a formação de pequenas reentrâncias nas paredes do canal e trechos com forte turbulência, a montante. No setor I do GMRC essas marmitas estão intimamente relacionadas a algum tipo de estrutura de descontinuidade, especialmente a diques de pegmatito ou de leucomicrogranito, os quais facilitam tanto o processo de evorsão quanto o destacamento (*plucking*). O colapso dessas feições, gradualmente, vai modificando a largura do canal rochoso.

Tais cavidades por terem suas estruturas rompidas, não apresentam capacidade de gerar vorticidade e, conseqüentemente, suas dimensões (diâmetro e profundidade), aparentemente, permanecem estáveis (ORTEGA-BECERRIL; GARROTE, 2023). A alta velocidade do fluxo nas paredes que confinam o canal, justifica a largura e profundidade das marmitas, assim como o colapso delas.



**Figura 13.** Cavidades laterais assimétricas com paredes verticais rompidas pelos vórtices do fluxo principal do rio Carnaúba. (A) Setor I GMRC, conhecido como Vale da Lua Potiguar. (B) Setor II – Pedra da Caveira. As setas vermelhas indicam as marmitas laterais, e o tracejado azul o canal principal do rio Carnaúba. Fonte: Acervo dos autores (2023).

## 5. Discussão

De forma genérica, a gênese das marmitas, independentemente da litologia do leito rochoso, é associada ao processo de evorsão (RICHARDSON; CARLING, 2005; SPRINGER; TOOTH; WOHL, 2006; PEIFER et al., 2022; ORTEGA-BECERRIL; GARROTE, 2023), como se tratasse de um processo único, independente. No entanto, a formação e o desenvolvimento dessas feições fluviais estão condicionados aos seguintes fatores: presença de descontinuidades estruturais e de *knickpoints*; predisposição mineralógica do substrato rochoso; e concentração de minerais máficos dispostos na forma de enclaves (LORENC; BARCO; SAAVEDRA, 1994; SPRINGER; TOOTH; WOHL, 2006; YIN et al., 2016; COSTA et al., 2021).

Springer, Tooth e Wohl (2006) afirmam que a alta velocidade do fluxo fluvial e a granulometria dos sedimentos em saltação, associada às irregularidades do leito rochoso são fatores que possibilitam a ocorrência de marmitas. No entanto, é importante ressaltar que na ausência de carga de fundo, o fluxo fluvial, por si só, não tem competência para esculpir nas rochas as formas erosivas de leito fluvial mais conhecidas, tais como as marmitas, estrias erosivas (*flutes*) e marcas de onda (*ripples*) (WIPPLE; HANCOCK; ANDERSON, 2000; YIN et al., 2016).

Os sedimentos detríticos são ferramentas necessárias para a evorsão (DHALI; BISWAS, 2017; ORTEGA-BECERRIL; GARROTE, 2023), porém, caso o aporte de sedimentos aumente a um ponto que supere a capacidade de transporte do fluxo fluvial, tal que o leito rochoso passe a estar recoberto, o desgaste abrasivo reduzirá, pois o leito recoberto estará protegido das colisões energéticas entre os sedimentos transportados e as rochas expostas (PEIFER et al., 2022). Como o GMRC encontra-se em um discreto *knickpoint* que justifica um maior gradiente energético, o leito é completamente rochoso e isso contribui para a densidade de marmitas, no entanto, tanto a jusante como a montante da área de estudo, a suavização topográfica justifica menor energia e maior deposição aluvial diminuindo a ocorrência de marmitas em função da limitada ocorrência de leitos rochosos.

Nesses leitos, fatores litoestruturais como orientação dos planos de foliação, presença de diques ou enclaves, assim como a própria composição do litotipo, são fatores que devem ser considerados para a formação de toda a morfologia de leito, quando esculpida diretamente sobre rochas do embasamento.

Na área de estudo, as fácies graníticas exibem elevada densidade de estruturas de descontinuidades, expondo planos de fraqueza aos processos de meteorização físico-químicos, os quais contribuem indiretamente na formação das marmitas. Tanto no Setor I quanto no Setor II do GMRC, as marmitas situam-se, preferencialmente, paralelas as falhas, fraturas, veios e diques, onde se instalam microambientes de maior umidade. A meteorização inicial se dá preferencialmente ao longo dos planos de fraqueza, especialmente nas zonas onde a água pode percolar ou mesmo residir por mais tempo (MAIA et al., 2022).

As diferentes formas e dimensões sugerem, em algumas áreas do GMRC, que as marmitas estão ligadas entre si numa sequência evolutiva, associada aos planos de fraqueza e à ação prolongada do intemperismo químico, por dissolução, principalmente, no Setor II, onde se verifica uma predominância de fácies mesocrática, seccionadas por



diques/vênulas de aplíticos. O papel desempenhado pela variação mineralógica no processo de meteorização, segundo Maia et al. (2022), deve ser ressaltado, tendo em vista que a solubilidade de determinados minerais pode favorecer o intemperismo químico (e.g., biotita) ou limitar sua atuação (e.g., quartzo).

As rochas graníticas são compostas por quantidades significativas de cristais de quartzo, que apresentam fraca solubilidade, além de feldspato e biotita, que são mais solúveis (PENTEADO, 1983). A heterogeneidade de minerais, no granito, reflete-se nas características químicas, texturais e, na densidade e no padrão de fraturamento, proporcionando diferentes padrões morfológicos (VIDAL ROMANÍ; TWIDALE, 2010).

A ocorrência de marmitas em um dos setores de menor índice de declividade da BHRC, entre 1,5° a 4,2° (MUTZENBERG, 2007), onde a energia potencial do fluxo de água da maioria dos canais fluviais é baixa, aponta para um exemplo típico de rejuvenescimento do nível de base local, possivelmente, em função de esforços neotectônicos verticais (MUTZENBERG, 2007), os quais alteraram o perfil longitudinal, no baixo curso, em ≈11 m. Para Dhali e Biswas (2017), as marmitas, em sua maioria, encontram-se no alto e médio curso dos canais de drenagem com leito rochoso, onde a energia do fluxo é máxima.

Essa alteração do nível de base local, associada ao encaixe do canal principal do rio Carnaúba, em estruturas de deformações rúpteis, proporcionaram a concentração da vazão e, conseqüentemente, o aumento da competência e capacidade de transporte de sedimentos detríticos.

Em função do contexto semiárido atual, o rio Carnaúba é um curso d'água tipicamente intermitente, apresentando escoamento superficial durante a estação chuvosa de fevereiro a maio. Essa característica atual da BHRC proporciona longos períodos de baixa ou nula atividade fluvial, alternados com curtos períodos de escoamento de alto fluxo e energia, em função de eventos pluviométricos extremos, apresentando, assim, competência para o transporte de sedimentos em saltação, bem como para a formação de marmitas e ampliação ou destruição das cavidades previamente desenvolvidas.

Em terras secas áridas e semiáridas, os sistemas fluviais não apresentam vazão competente para o transporte de sedimentos em saltação (GOUDIE, 2013), no entanto, em episódios de alta intensidade e energia, como em eventos pluviométricos extremos (POWELL, 2009), ou em circunstância de maior disponibilidade de água em função de estação chuvosa regular, como, por exemplo, no semiárido brasileiro, é que esses canais efetivam incisão e transportes de sedimentos em saltação.

Parâmetros hidrológicos como vazão, velocidade da água, variação sazonal da água e energia do curso fluvial desempenham um papel fundamental na formação de novas marmitas, sendo a variação sazonal do fluxo turbulento o mais importante nesse processo (MILLER, 1991). Já os fluxos turbulentos prolongados, segundo Dhali e Biswas (2017), também criam novas marmitas, mas também ampliam e destroem antigas cavidades, preenchendo as cavidades com sedimentos.

A existência de fluxos turbulentos contínuos, associados a um nível de fluxo de água, mais elevado do que o atual, na área de estudo, provavelmente, durante o Holoceno Médio, época na qual, segundo Mutzenberg (2007), a BHRC apresentava um regime pluviométrico mais estacional e regular, chamado de Ótimo Climático (CORRÊA, 2001; MISSURA, 2013), pode ser comprovado pela existência de marmitas sigmoidais de dimensões métricas, na margem esquerda do rio Carnaúba, afastadas do atual leito principal.

Além de fatores ligados as influências climáticas quaternárias, a existências de marmitas afastadas do atual leito do rio Carnaúba pode estar, possivelmente, associada a mudança no talvegue por neotectônica, justificando, dessa forma, uma maior concentração de marmitas incipientes, na margem direita do rio Carnaúba, próximas do canal principal.

## 6. Conclusões

O presente trabalho reafirma que a evorsão é o processo chave necessário para a formação das marmitas em leitos rochosos. No entanto, o GMRC apresenta uma ampla gama de fatores que influenciam na gênese, evolução e morfologia dessas feições. Dentre esses fatores destacam-se: i) alteração do gradiente do canal; ii) encaixe do canal principal do rio em estruturas de deformação rúpteis; iii) composição mineralógicas das rochas graníticas (predomínio de fácies mesocrática); iv) elevada densidade de descontinuidades estruturais; v) concentração de minerais máficos dispostos na forma de enclaves; e vi) variabilidade sazonal do fluxo fluvial.

O estrangulamento do canal do rio Carnaúba potencializou a eficiência da erosão fluvial, ditada pela resistência do substrato rochoso, e gerou setores de aumento de pressão estática em fluxos turbulentos com carga

de fundo, as quais exploraram as estruturas de descontinuidades, deflagrando, assim, o processo de formação das marmitas.

Portanto, as descontinuidades estruturais exercem influência na gênese, na evolução, na orientação e na morfologia das marmitas, especificamente em leito fluvial rochoso resistente e não direcional como o granítico. A orientação dos planos de fraqueza em relação à direção do fluxo fluvial e a presença de veios e diques resistentes favorecem o desgaste do leito rochoso por abrasão e evorsão. No GMRC a orientação do alongamento das marmitas e das estruturas de descontinuidades estão altamente correlacionadas.

**Contribuições dos Autores:** concepção, DIAS, J. R. V., CORDEIRO, A. M. N.: metodologia, DIAS, J. R. V., CORDEIRO, A. M. N., BASTOS, F. H.: *software*, DIAS, J. R. V., CORDEIRO, A. M. N., MAIA, R. P.: validação, CORDEIRO, A. M. N., BASTOS, F. H.: análise forma, CORDEIRO, A. M. N., BASTOS, F. H., MAIA, R. P., NASCIMENTO, M. A. L.: pesquisa, DIAS, J. R. V., CORDEIRO, A. M. N., BASTOS, F. H.: preparação dos dados, DIAS, J. R. V., CORDEIRO, A. M. N.: escrita do artigo, DIAS, J. R. V., CORDEIRO, A. M. N.: revisão, BASTOS, F. H., MAIA, R. P., NASCIMENTO, M. A. L.: supervisão, CORDEIRO, A. M. N. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

**Agradecimentos:** Agradecemos à PROPESQ/UFRN/PIBIC e ao CNPq (projetos: 310887/2021-6 e 403944/2023-6) pelo apoio financeiro.

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

## Referências

1. ÁLVAREZ-VÁZQUEZ, M. A.; UÑA-ÁLVAREZ, E. Growth of sculpted forms in bedrock channels (Mino River, Northwest Spain). *Current Science*, v. 112, n. 5, p. 996-1002, 2017. DOI: 10.18520/cs/v112/i05/996-1002.
2. ANGELIM, L. A. A.; NESI, J. R.; TORRES, H. H. F.; MEDEIROS, V. C.; SANTOS, C. A.; VEIGA JÚNIOR, J. P.; MENDES, V. A. **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte**. Texto Explicativo dos Mapas Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte. Escala 1:500.000. Recife: CPRM/FAPERNE, 2006, 233p.
3. ARCHANJO, C. J.; VIEGAS, L. G. F.; HOLLANDA, M. H. B.; SOUZA, L. C.; LIU, D. Timing of the HT/LP transpression in the Neoproterozoic Seridó Belt (Borborema Province, Brazil): Constraints from U-Pb (SHRIMP) geochronology and implications for the connections between NE Brazil and West Africa. *Gondwana Research*, v. 23, p. 701-714, 2013. DOI: 10.1016/j.gr.2012.05.005.
4. ASSUMPCÃO, M.; DIAS, F. L.; ZEVALLOS, I.; NALIBOFFI, J. B. Intraplate stress field in South America from earthquake focal mechanisms. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 71, p. 278-295, 2016. DOI: 10.1016/j.jsames.2016.07.005.
5. BEHLING, H.; ARZ, H. W.; PÄTZOLD, J.; WEFER, G. Late Quaternary vegetational and climate dynamics in northeastern Brazil, inferences from marine core GeoB 3104-1. *Quaternary Science Reviews*, v. 19, n. 10, p. 981-994, 2000. DOI: 10.1016/S0277-3791(99)00046-3.
6. BEZERRA, F. H. R.; VITA-FINZI, C. How active is a passive margin? Paleoseismicity in Northeastern Brazil. *Geology*, v. 28, n. 7, p. 591-594, 2000. DOI: 10.1130/0091-7613(2000)28<591:HAIAPM>2.0.CO;2.
7. BEZERRA, F. H. R.; CASTRO, D. L.; MAIA, R. P.; SOUSA, M. L.; MOURA-LIMA, E. N.; ROSSETI, D. F.; BERTOTTI, G.; SOUZA, Z. S.; NOGUEIRA, F. C. C. Postrift stress field inversion in the Potiguar Basin, Brazil – implications for petroleum systems and evolution of the equatorial margin of South America. *Marine and Petroleum Geology*, v. 111, p. 88-104, 2020. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2019.08.001.
8. BEZERRA JÚNIOR, J. G. O.; SILVA, N. M. Caracterização geoambiental da microrregião do Seridó Oriental do Rio Grande do Norte. *Holos*, v. 2, n. 23, p. 78- 91, 2007. DOI: 10.15628/holos.2007.102.
9. BÜDEL, J. Climatic Geomorphology. Princeton, Princeton University Press. 443p. 1982.
10. CABRAL NETO, I.; SILVEIRA, F. V.; FERNANDES, P. R.; PAES, V. J. C.; SANTOS, L. D.; MEDEIROS, V. C. **Mapa geológico e de recursos minerais de lítio – Província Pegmatítica da Borborema**. Escala 1:250.000. Natal: CPRM, 2018.
11. CAMPOS, B. C. S. **Petrografia, litoquímica mineral e termobarometria de rochas cálcio-alcálicas de alto K de textura porfirítica Ediacaranas, no extremo NE da Província Borborema (NE do Brasil)**. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica) – Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2016. 98p.
12. CORRÊA, A. C. B. **Dinâmica geomorfológica os compartimentos elevados do Planalto da Borborema, Nordeste do Brasil**. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 2001. 386p.

13. COSTA, S. S. S.; SARAIVA JUNIOR, J. C.; PINTO, Y. F. L. C.; NASCIMENTO, M. A. L. Marmitas do rio Potengi, Barcelona, Rio Grande do Norte: evolução e proposta de classificação. **Pesquisa em Geociências**, v. 48, n. 2, e095313, 2021. DOI: 10.22456/1807-9806.95313.
14. COTTON, C. A. Levels of planations of marine benches. **Zeitschrift für Geomorphologie**, v. 7, n. 2, p. 97-111, 1963.
15. 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, 1995, v. 14, p. 181-184.
16. DANTAS, E. P.; CRUZ, R. F.; NASCIMENTO, M. A. L.; DANTAS, A. R. Programa Geológico do Brasil. **Folha Currais Novos**, SB.24-Z-B-II. Carta Geológica, Escala 1:100.000. Recife: CPRM, 2012.
17. DHALI, M. K.; BISWAS, M. Geo-hydrological response to pothole formation: a quantitative study of Kharsoti River, India. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 3, n. 32, p. 1-11, 2017. DOI: 10.1007/s40808-017-0280-5.
18. DINIZ, M. T. M.; PEREIRA, V. H. C. Climatologia do estado do Rio Grande do Norte, brasil: Sistemas atmosféricos atuantes e mapeamento de tipos de clima. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 35, n. 3, p. 488-506, 2015. DOI: 10.5216/bgg.v35i3.38839.
19. EMPARN. Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte. **Análise pluviométrica do Rio Grande do Norte - período: 1963-2009**. Natal: EMPARN, 2010. 71 p.
20. FONSÊCA, D. N. **Evolução geomorfológica e sedimentação quaternária no setor oriental do piemonte da Borborema**. Tese (Doutorado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2018. 194p.
21. GOUDIE, A. S. **Arid and Semi-Arid Geomorphology**. 1ª ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 839p.
22. HARRIS, S. E.; MIX, A. C. Climate and tectonic influences on continental erosion of tropical South America, 0-13 Ma. **Geology**, v. 30, p. 447-450, 2002. DOI: 10.1130/0091-7613(2002)030<0447:CATIOC>2.0.CO;2.
23. HOWARD, A. D. A detachment-limited model of drainage basin evolution. **Water Resources Research**, v. 30, n. 7, p. 2261-2285, 1994. DOI: 10.1029/94WR00757.
24. KNESEL, K. M.; SOUZA, Z. S.; VASCONCELOS, P. M.; COHEN, B. E.; SILVEIRA, F. V. Young volcanism in the Borborema Province, NE Brazil, shows no evidence for a trace of the Fernando de Noronha plume on the continent. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 302, n. 1-2, p. 38-50, 2011. DOI: 10.1016/j.epsl.2010.11.036.
25. LIMA, A. G. Rios de leito rochoso: aspectos geomorfológicos fundamentais. **Ambiente Guarapuava**, v. 6, n. 2, p. 339-354, 2010.
26. LIMA, E. M.; CORRÊA, A. C. B.; FONSÊCA, D. N. Dinâmica geomorfológica quaternária da cimeira estrutural Pernambuco-Alagoas, Planalto da Borborema. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 31, p.142-155, 2016. DOI: 10.11606/rdg.v31i0.116542.
27. LIMA, G. R.; LISTO, D. G. S.; GUIMARÃES, T. O.; ARRUDA, I. R. P. Inventário do potencial científico das marmitas (weathering pits) no distrito de Fazenda Nova, Pernambuco, Nordeste do Brasil. **Revista do Instituto de Geociências**, v. 23, n. 2, p. 181-190, 2023. DOI: 10.11606/issn.2316-9095.v23-204661.
28. LORENC, M. W.; BARCO, P. M.; SAAVEDRA, J. The Evolution of potholes in granite bedrock, W Spain. **Catena**, v. 22, p. 265-274, 1994. DOI: 10.1016/0341-8162(94)90037-X.
29. LUCENA, R. L. **Análise climatológica do município de Caicó/RN: subsídios à avaliação do conforto humano**. 152f. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.
30. MAIA, R. P.; BEZERRA, F. H. R. Tectônica pós-miocênica e controle estrutural de drenagem no rio Apodi-Mossoró, Nordeste do Brasil. **Boletim de Geografia**, v. 31, n. 2, p. 57-68, 2013. DOI: 10.4025/bolgeogr.v31i2.18697.
31. MAIA, R. P.; BASTOS, F. H.; WALDHERR, F. R.; NASCIMENTO, M. A. L.; AULER, A. S. Breves considerações sobre Tafoni em inselbergs: aspectos genéticos e morfoestruturais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 23, n. 4, p. 1792-1811, 2022. DOI: 10.20502/rbg.v23i4.2090.
32. MATOS, R. M. D. Tectonic evolution of the equatorial South Atlantic. In: MOHRIAK, W.; TALWANI, M. (Ed.). **Atlantic rift and continental margin**. American Geophysical Union. Washington: Publisher Am. Geophys. Union, 2000. p. 331-354.
33. MILLER, J. R. The influence of bedrock geology on knickpoint development and channel-bed degradation along downcutting stream in south-central Indiana. **The Journal of Geology**, v. 99, n. 4, p.591-605, 1991.
34. MISSURA, R. **Bacia do riacho Pioré-PE, análise morfotectônica e morfoestratigráfica**. Tese (Doutorado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2013. 196p.
35. MORAIS NETO, J. M.; HEGARTY, K. A.; KARNER, G. D.; ALKMIM, F. F. Timing and mechanisms for the generation and modification of the anomalous topography of the Borborema Province, northeastern Brazil. **Marine and Petroleum Geology**, v. 26, n. 7, p. 1070-1086, 2009. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2008.07.002.

36. MORAIS NETO, J. M.; VASCONCELOS, P. M.; STONE, J.; LIMA, M. D. Denudation patterns in the Borborema Province, northeastern Brazil: constraints from cosmogenic <sup>10</sup>Be isotope analysis. In: International Geological Congress, 34., 2012, Brisbane. **Proceedings...** Brisbane, Australia, 2012, p. 2722.
37. MUTZENBERG, D. S. **Gênese e ocupação pré-histórica do sítio arqueológico Pedra do Alexandre**: uma abordagem a partir da caracterização paleoambiental do vale do rio Carnaúba-RN. Dissertação (Mestrado em Arqueologia) - Programa de Pós-Graduação em Arqueologia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2007. 142p.
38. NASCIMENTO, M. A. L.; MEDEIROS, V. C.; GALINDO, A. C. Ediacaran to Cambrian magmatic suites in the Rio Grande do Norte domain, extreme Northeastern Borborema Province (NE of Brazil): current knowledge. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 58, p. 281-299, 2015. DOI: 10.1016/j.jsames.2014.09.008.
39. NASCIMENTO, M. A. L.; SILVA, M. L. N.; ALMEIDA, M. C.; COSTA, S. S. S. Evaluation of typologies, use values, degradation risk, and relevance of the Seridó aspiring UNESCO geopark geosites, Northeast Brazil. **Geoheritage**, v. 12, n. 25, p. 1-17, 2021. DOI: 10.1007/s12371-021-00542-2.
40. OLIVEIRA, G. P.; CORRÊA, A. C. B.; TAVARES, B. A. C.; MONTEIRO, K. A. The influence of Cenozoic magmatism on drainage rearrangement processes of the northeast sector of the Borborema Highlands, northeastern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 121, 104124, 2023. DOI: 10.1016/j.jsames.2022.104124.
41. ORTEGA-BECERRIL, J. A.; GÓMEZ-HERAS, M.; PEREZ-LÓPEZ, R.; WOHL, E. Multiscale structural and lithologic controls in the development of stream potholes on granite bedrock rivers. **Geomorphology**, v. 204, p. 588-598, 2014. DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.09.005.
42. ORTEGA-BECERRIL, J. A.; GARROTE, J. Magnitude of formative flows in stream potholes. **Geomorphology**, v. 434, e108738, 2023. DOI: 10.2139/ssrn.4312979.
43. PEIFER, D.; CREMON, É. H.; VAL, P.; FERNANDES, N. F. Bases teóricas do modelo stream-power de incisão fluvial. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 23, n. 2, p. 1512-1523, 2022. DOI: 10.20502/rbg.v23i2.2143.
44. PELLETIER, J. D.; SWEENEY, K. E.; ROERING, J. J.; FINNEGAN, N. J. Controls on the geometry of potholes in bedrock channels. **Geophysical Research Letters**, v. 42, p. 797-803, 2015. DOI: 10.1002/2014GL062900.
45. PENTEADO, M. M. **Fundamentos de geomorfologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1983. 186 p.
46. PEULVAST, J-P.; CLAUDINO SALES, V. Reconstruindo a evolução morfotectônica da margem passiva do Nordeste brasileiro. In: SILVA, J. B.; LIMA, L. C.; ELIAS, D. (Org.). **Panorama da Geografia Brasileira**. 1 ed. São Paulo: AnnaBlume, 2006. p. 47-99.
47. POWELL, D. M. Dryland rivers: processes and forms. In: PARSONS, A. J.; ABRAHAMS, A. D. (Ed.). **Geomorphology of desert environments**. 2ª ed. Dordrecht: Springer, 2009. p. 333-373.
48. RICHARDSON, K.; CARLING, P. A. **A typology of sculpted forms in open bedrock channels**. Geological Society of American: Special Paper 392, 2005. 108p.
49. SALGADO, A. A. R. Superfície de aplainamento: antigos paradigmas revistos pela ótica dos novos conhecimentos geomorfológicos. **Revista Geografias**, Belo Horizonte, v. 3, n. 1, p. 64-78. 2007. DOI: 10.35699/2237-549X.13218.
50. SILVA, M. L. N.; NASCIMENTO, M. A. L.; COSTA, S. S. S.; Geohéritage of a Brazilian semi-arid Environment: the Seridó aspiring UNESCO Geopark. **Geoheritage**, v. 14, n. 36, p. 1-19. 2022. DOI: 10.1007/s12371-022-00662-3.
51. SPRINGER, G. S.; TOOTH, S.; WOHL, E. E. Theoretical modeling of stream potholes based upon empirical observations from the Orange River, Republic of South Africa. **Geomorphology**, v. 82, n. 1-2, p. 160-175, 2006. DOI: 10.1016/j.geomorph.2005.09.023.
52. STRECKEISEN, A. To each plutonic rock its proper name. **Earth-Science Reviews**, v. 12, n. 1, p. 1-33, 1976.
53. TAVEIRA, M. S. **Carnaúba dos Dantas: inventário turístico 2019**. Currais Novos: UFRN, 2019. 82 p.
54. TWIDALE, C. R.; VIDAL ROMANÍ, J. R. **Landforms and geology of granite terrains**. CRC Press Inc., Boca Raton, USA, 2005. 362p.
55. VIDAL ROMANÍ, J. R.; TWIDALE, C. R. Structural or climatic control in granite landforms? The development of sheet structure, foliation, boudinage, and related features. **Cadernos do Laboratório Xeolóxico de Laxe**, v. 35, p. 189-208, 2010.
56. WALDHERR, F. R.; ARAÚJO-JÚNIOR, H. I.; RODRIGUES, S. W. O. Origem e morfologia dos tanques naturais do Nordeste do Brasil. **Pesquisas em Geociências**, v. 44, n. 3, p. 467-488, 2017. DOI: 10.22456/1807-9806.83270.
57. WANG, X.; AULER, A. S.; EDWARDS, R. L.; CHENG, H.; CRISTALLI, P. S.; SMART, P. L.; RICHARDS, D. A.; SHEN, C. C. Wet periods in northeastern Brazil over the past 210 kyr linked to distant climate anomalies. **Nature**, v. 432, p. 740-743, 2004. DOI: 10.1038/nature03067.
58. YIN, D.; PEAKALL, J.; PARSONS, D.; CHEN, Z.; AVERILL, H. M.; WIGNALL, P.; BEST, J. Bedform genesis in bedrock substrates: insights into formative processes from a new experimental approach and the importance of suspension-dominated abrasion. **Geomorphology**, v. 255, p. 26-38, 2016. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.12.008.



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.