

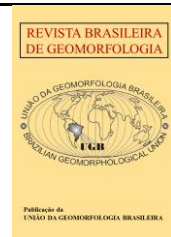


<https://rbgeomorfologia.org.br/>
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 25, nº 2 (2024)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v25i2.2469>



Artigo de Pesquisa

Origem e evolução de feições de dissolução em inselbergs graníticos

Origin and evolution of solutional features on granitic inselbergs

Guilherme Lima Brasil dos Santos¹, Rubson Pinheiro Maia², Luiz Eduardo Panisset Travassos³ e Anna Sabrina Vidal de Souza⁴

¹ Universidade Federal do Ceará, Departamento de Geografia, Fortaleza, Brasil. E-mail: guilhermelbrasil@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5342-9697>

² Universidade Federal do Ceará, Departamento de Geografia, Fortaleza, Brasil. E-mail: rubsonpinheiro@yahoo.com.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1688-5187>

³ Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Departamento de Geografia, Belo Horizonte, Brasil. E-mail: luizepanisset@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6264-2429>

⁴ Universidade Federal do Ceará, Departamento de Geografia, Fortaleza, Brasil. E-mail: annasabrinavidal@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5070-8208>

Recebido: 28/08/2023; Aceito: 08/03/2024; Publicado: 31/03/2024

Resumo: *Inselbergs* são formas de relevo modeladas por diferentes processos erosivos. Por vezes, predominam feições de dissolução, por vezes, de fraturamento e, em alguns casos, exibem escarpas maciças. Neste trabalho, serão demonstrados os principais mecanismos estruturais que levam à formação de feições de dissolução, tais como *gnammas*. Em rochas graníticas, enclaves elipsoidais máficos podem servir como ponto de partida para erosão diferencial. Os enclaves e sua orientação, condicionam os primeiros estágios (microcavidades elipsoidais e *gnammas*) da formação de feições de dissolução. No *inselberg* Pedra do Cruzeiro, em Quixadá, Nordeste do Brasil, foram analisados 99 enclaves, a partir de um transecto de 230 m a NE-SW na escarpa do *inselberg*. Os dados mostraram que a direção preferencial dos enclaves (86E em média) coincide com a orientação da maioria (97%) das feições de dissolução em seu primeiro e segundo estágios. Já nas fases avançadas de erosão, em que *megakarrens* são formados, estes não seguem unicamente padrões estruturais pré-definidos, mostrando a superimposição do escoamento na superfície do *inselberg* sobre a estrutura (foliação ígnea e orientação dos enclaves máficos).

Palavras-chave: *Inselberg*; *Karren*; *Gnamma*; Enclaves máficos.

Abstract: *Inselbergs* are landforms shaped by a number of erosion processes. They can be characterized either by a predominance of dissolution features or fracturing and occasionally exhibit massive slopes. In this study we demonstrate the main structural mechanisms driving the formation of dissolution features, such as *gnammas*. In granitic rocks, mafic ellipsoidal enclaves can act as a starting point for differential erosion. The enclaves and their orientation control the early stages of dissolution features (ellipsoidal microcavities and *gnammas*). In the Pedra do Cruzeiro *inselberg*, located in Quixadá, northeastern Brazil, 99 enclaves were analyzed in a 230m SW-NE transect on the *inselberg* slope. The data show that the primary trend of enclave orientation (86E on average) coincides with the orientation of the majority (97%) of dissolution features in their first and second stages. In advanced erosion phases in which *megakarren* are developed, they are not solely controlled by preexisting structural patterns, attesting to the superimposition of the surface runoff of the *inselberg* over the structure (e.g., magmatic foliation and mafic enclave orientation).

Keywords: *Inselberg*; *Karren*; *Gnamma*; Mafic enclaves.

1. Introdução

No mundo há exemplos notáveis de paisagens modeladas em rochas graníticas, tais como o *Spitzkoppe*, na Namíbia, com sua diversidade de formas como *boulders*, *gnammas* e *tafoni* (Migon, 2010); o *bornhardt* Pão de Açúcar no Rio de Janeiro (Fernandes *et al.*, 2010) e o campo de *inselbergs* em Itatim na Bahia (Lima; Corrêa-Gomes, 2015). No Nordeste brasileiro, diversas áreas apresentam relevos graníticos, incluindo campos de *inselbergs* com grande significância para os estudos sobre evolução geomorfológica (Maia *et al.*, 2015).

As paisagens graníticas são comumente interpretadas à luz dos modelos de etchplanação, trazido por Büdel (1948, 1982) e posteriormente por Thomas (1965, 1974), que considera a evolução da paisagem gradual com a exumação de uma planície em múltiplos estágios via intemperismo químico profundo. Nessa perspectiva, fatores como a resistência do substrato e processos de erosão superficial são fundamentais nos processos de modelagem das formas de subsuperfície (Twidale, 1982).

As feições que modelam as escarpas graníticas em *inselbergs* costumam se distribuir de modo heterogêneo. Algumas escarpas exibem mais formas de fraturamento, enquanto outras são caracterizadas por feições de dissolução. No tocante às últimas, a ação prolongada do intemperismo químico sobre rochas graníticas promove a modelagem, dentre diversas feições, das microformas de meteorização (Twidale; Vidal Romani, 2005), destacando-se as *gnammas* (bacias de dissolução, *rock basins* ou *weathering pits*) e *karren* (caneluras).

Bacias de dissolução são formas concavas e arredondadas, que variam tanto em dimensões como em formatos e não ocorrem apenas em afloramentos graníticos, sendo também reportadas em outras litologias (Twidale; Vidal Romani, 2005; Migon, 2006; Travassos, 2019; Lima, 2019). Apesar do reconhecimento e descrição dessas formas de dissolução em escarpas graníticas em diversos locais (Migon, 2006; Maia e Nascimento, 2018), pouco fora explorado a respeito da sua gênese e dos fatores condicionantes primários da sua origem.

Karren, por sua vez, é um termo utilizado genericamente para se referir a feições de dissolução em superfícies de rochas solúveis expostas, normalmente associadas a rochas carbonáticas, mas desenvolvendo-se também em outras litologias, como o granito. Os *karrens* possuem notável variedade de formas, como por exemplo os *Rillenstaine* (lapiás em microcaneluras), *rillenkarrren* (lapiás em caneluras) e *rinnenkarren* (lapiás em sulcos), formas que abrangem desde milímetros até mais de 10 metros de comprimento (Ginés, 2009; Travassos, 2019). Há extensões significativas de rochas esculpidas espalhadas por quilômetros quadrados, mostrando em muitos casos um padrão característico de sulcos e ranhuras, separados por cristas ou cumes acentuados e que se destacam na paisagem como *karrenfields* ou campos de *karren* ou lapiás (Travassos, 2019). Nesse sentido, o campo de *inselbergs* de Quixadá, no Nordeste do Brasil apresenta uma diversidade de formas associadas à dissolução química da rocha, muitas vezes caracterizando a maior parte das escarpas dos *inselbergs* (Maia *et al.*, 2015).

Em vista disso, este trabalho objetiva identificar e analisar os fatores estruturais e faciográficos que guiam a formação de feições de dissolução (particularmente *gnammas*) em *inselbergs* graníticos. Para tanto, fora escolhido para análise o *inselberg* Pedra do Cruzeiro situado em Quixadá (CE, Brasil), definido como *inselberg* caracterizado por feições de dissolução (Maia *et al.*, 2015), dada a ampla ocorrência dessas feições em suas escarpas.

2. Área de Estudo

O campo de *inselbergs* de Quixadá, localizado no município homônimo, a 200 km da capital do estado do Ceará, no Nordeste do Brasil, apresenta clima tropical quente semiárido, com temperaturas médias em torno de 27 °C (INMET, 2014). O regime pluviométrico de Quixadá é caracterizado por irregularidade de chuvas, sendo a média pluviométrica anual cerca de 700 mm e chuvas concentradas nos meses de março e abril (INMET, 2014; Maia *et al.*, 2015; Maia; Nascimento, 2018).

A área de estudo se insere no contexto geológico do Plúton Quixadá (Figura 1), intrusão neoproterozoica ligada ao ciclo Brasileiro (± 560 Ma – 60 Ma). O Plúton Quixadá pertence à Suíte intrusiva Itaporanga (Pinéo *et al.*, 2020), composta por monzonitos, monzogranitos, quartzo monzonitos e sienitos. Há ainda importante ocorrência de duas subfácies no plúton: fácies dioríticas caracterizada por enclaves máficos e fácies granítica composta de diques félsicos (Almeida, 1995).

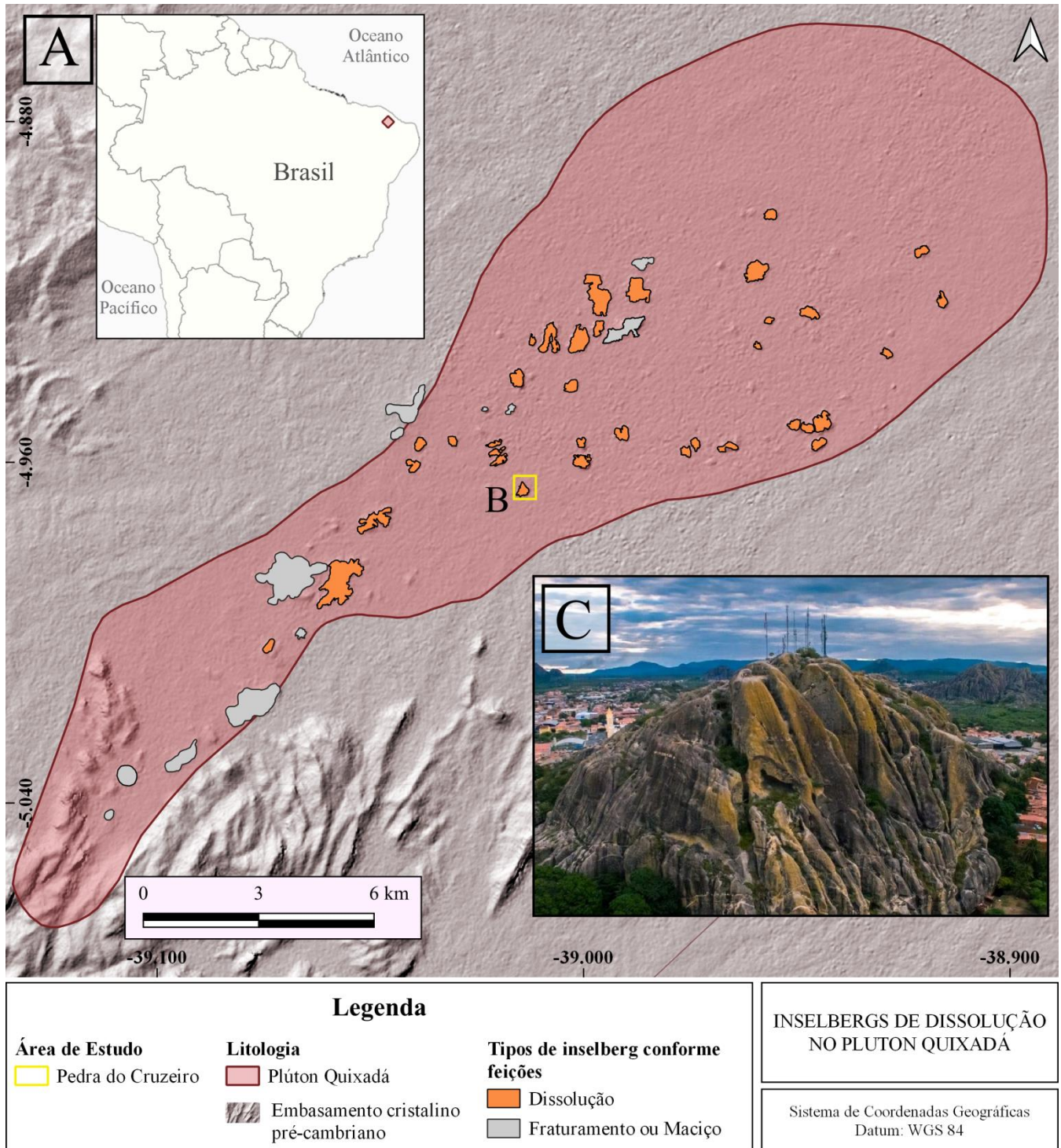


Figura 1. Mapa de localização dos *inselbergs* de caracterizados por feições de dissolução no Plúton Quixadá. A: Mapa de localização do plúton com identificação de *inselbergs* do tipo dissolução. B: Polígono de inserção da área de estudo. C: Fotografia do *inselberg* Pedra do Cruzeiro. Fonte: Elaborado pelo autor (A e B); Silva, 2018 (C).

O plúton possui distribuição heterogênea de organização de planos de foliação, marcada pela orientação dos megacristais de feldspato e de enclaves máficos, em sua maioria em direção NE-SW; o grau de foliação ígnea tende a diminuir das encaixantes (borda do plúton) para o centro do plúton (Nogueira, 2004).

A área de estudo se situa, geomorfologicamente, na Superfície Sertaneja 1, com altitude entre 50 metros e 250 metros e de morfologia plana ou levemente ondulada (Costa *et al.*, 2020). Nas superfícies de alguns *inselbergs* em Quixadá, desenvolvem-se formas resultantes de colapso, como rampas de tálus com incidência de *boulders*.

Ademais, microformas de meteorização, do tipo *gnamma*, *karren*, *tafone*, alvéolos e *flared slopes* também são abundantes nas escarpas (Maia; Nascimento, 2018). Nesse sentido, Maia *et al.* (2015) classificaram os tipos de *inselbergs* com base na predominância das feições que os caracterizam, a saber: 1 – de dissolução, referente à marcada incidência de microformas de meteorização; 2 – de fraturamento, em virtude das formas resultantes de colapso; 3 – maciços, identificados pela forma dômica e escarpas sem feições de dissecação significativas (Maia *et al.*, 2015).

O *inselberg* Pedra do Cruzeiro (Figura 1 B) (4°58'S; 39°00'51.7"W) situa-se no centro da cidade de Quixadá. É considerado um *inselberg* do tipo 1 – marcado por feições de dissolução (Maia *et al.*, 2015); possui 60 metros de altura, com escarpas íngremes evidentes na porção E e SE; e bordas mais suaves na porção N e SW, sendo a segunda o acesso mais comum ao *inselberg*.

3. Materiais e Métodos

O presente trabalho foi realizado em cinco etapas. A primeira consistiu em levantamento bibliográfico sobre feições de dissolução em rochas graníticas e relevos graníticos no Nordeste e no mundo; a segunda, na aquisição e processamento digital de dados regionais relativos à geomorfologia e geologia da área; a terceira consistiu em fotogrametria via drone do *inselberg* Pedra do Cruzeiro e processamento digital deste; na quarta etapa realizou-se em trabalhos de campo para coleta de dados geomorfológicos e geológicos nos *inselbergs* e na quinta etapa, organização e análise dos dados primários e secundários coletados. Detalhes e procedimentos de cada etapa são trazidos a seguir.

Primeira etapa: Como alicerce teórico foi tomado as definições teóricas de tópicos referentes à geomorfologia de rochas magmáticas; relevos graníticos; *inselbergs* e suas características; feições de dissolução em corpos graníticos; caracterização dos *inselbergs* dentro da área do município de Quixadá (Twidale; Vidal Romani, 2005; Migon, 2006; Sgarbi, 2012; Neves, 2012; Lima, 2019; Maia *et al.*, 2015; Maia; Nascimento, 2018).

Segunda etapa: geoprocessamento e processamento digital de imagens de satélite ALOS-PALSAR, a partir do software QGIS 3.14.16 a fim de associar os dados georreferenciados à altimetria da área e a distribuição dos *inselbergs* presentes na área de estudo.

Para a terceira etapa, o imageamento detalhado do *inselberg* Pedra do Cruzeiro, foi realizado por voo em modo manual a 120 metros de altura com o drone modelo Phantom 4 pro com câmera de 21 mp, com imagem de dimensões 4000 x 3000 px e resolução de 72 dpi. A partir dessa imagem, foi mapeada por classificação estabelecida pelas descrições de Twidale e Vidal Romani (2005) e Migon (2006), todas as feições de dissolução do tipo *karren* e *gnamma* em escala detalhada com o intuito de mensurar a distribuição destas formas, assim como a direção de escoamento de água em feições de fluxo, a fim de gerar um material cartográfico.

A quarta etapa incluiu a ida a campo a fim de reconhecer os padrões e características de *inselbergs* em Quixadá, particularmente aqueles caracterizados por feições de dissolução. No *inselberg* em análise (Pedra do Cruzeiro), definiu-se um transecto (Figura 2), a partir do qual a identificação e caracterização das microformas e de aspectos petrográficas e estruturais foram realizadas. O procedimento incluiu a descrição básica do afloramento granítico e de enclaves máficos abundantes na área. Ao total foram coletados dados de 99 enclaves máficos, incluindo a descrição macroscópica do afloramento (textura e coloração), e dados estruturais (dimensão e orientação do maior eixo dos enclaves alongados).

A quinta etapa realizou-se em gabinete, com análise de dados estruturais dos enclaves e das feições de dissolução em *inselbergs*. A partir das informações georreferenciadas em vetor das feições de dissolução na superfície da Pedra do Cruzeiro e a partir da coleta dos dados de orientação dos enclaves máficos coletados em campo, foram geradas duas rosetas de orientação preferencial no software Stereonet 11.5.0. A primeira referente ao direcionamento das feições de dissolução na superfície do *inselberg* e a segunda evidenciando a direção preferencial do eixo maior dos enclaves máficos. A partir disso, associou-se o direcionamento preferencial dos enclaves com a presença de feições de escoamento.

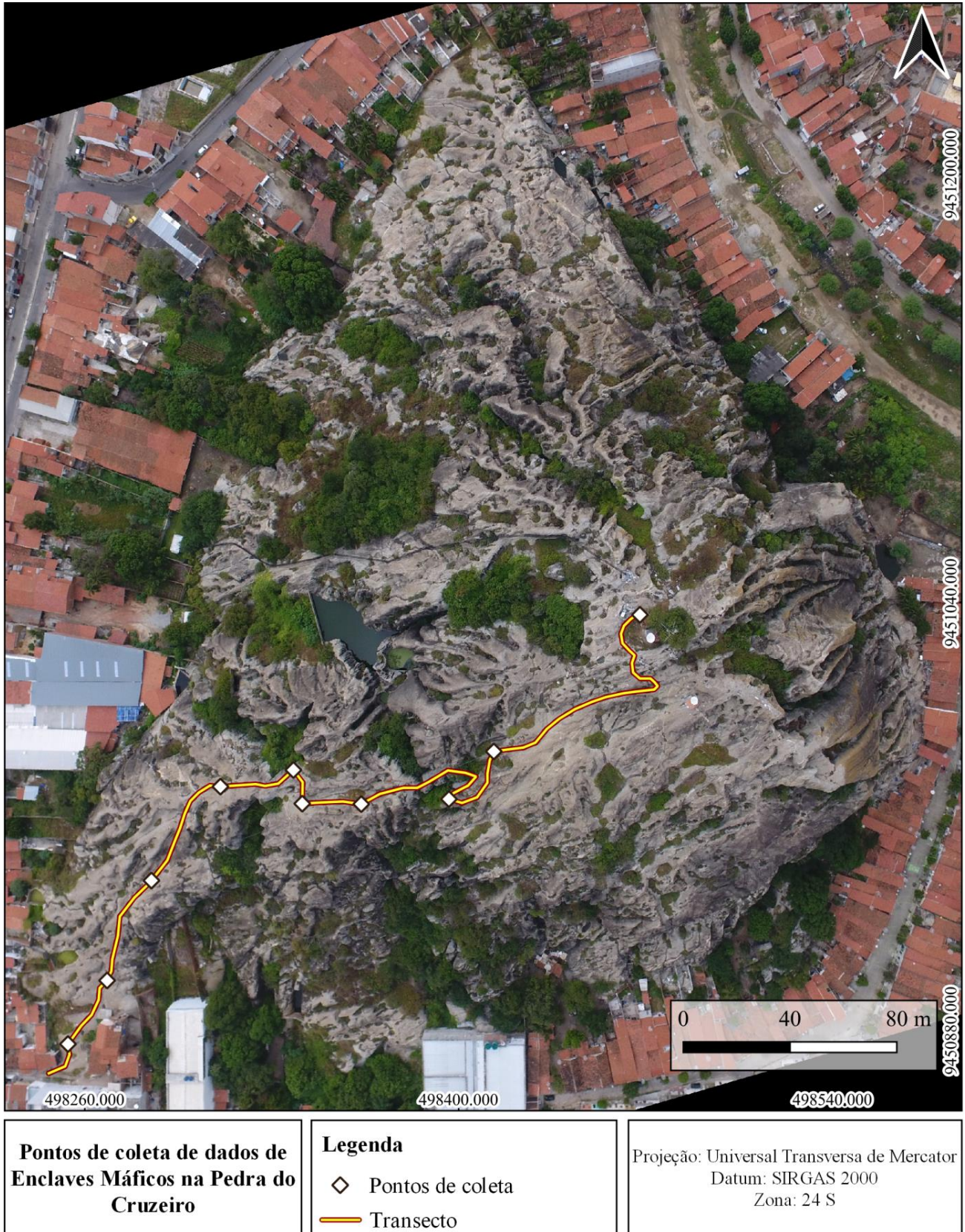


Figura 2. Ortofoto do *inselberg* Pedra do Cruzeiro com localização dos pontos de coletas de dados em enclaves máficos. Localização na figura 1B. Fonte: Elaborado pelo autor.

4. Resultados

4.1. Karrens e gnammas no inselberg Pedra do Cruzeiro

As escarpas do *inselberg* Pedra do Cruzeiro, assim como diversos *inselbergs* no Plúton Quixadá, são caracterizadas pela predominância de feições de dissolução (ver Figura 1C). Essas feições incluem principalmente *gnammas*, de tamanhos métricos a decamétricos, e formato circular com ou sem exutório, que ocorrem geralmente em superfície de baixa declividade e *karren*, sulcos contínuos nas escarpas, onde há fluxo de água em períodos chuvosos. Estas, incluem canais de até 5 metros de largura e até 3 metros de profundidade, e constituem o estágio de desenvolvimento máximo de feições de dissolução observadas. Além disso, ocorrem pequenas cavidades circulares nas escarpas (alvéolos). Todas essas feições de dissolução ocupam 37,5% da superfície do *inselberg* (2,6 ha) (Figura 3A).

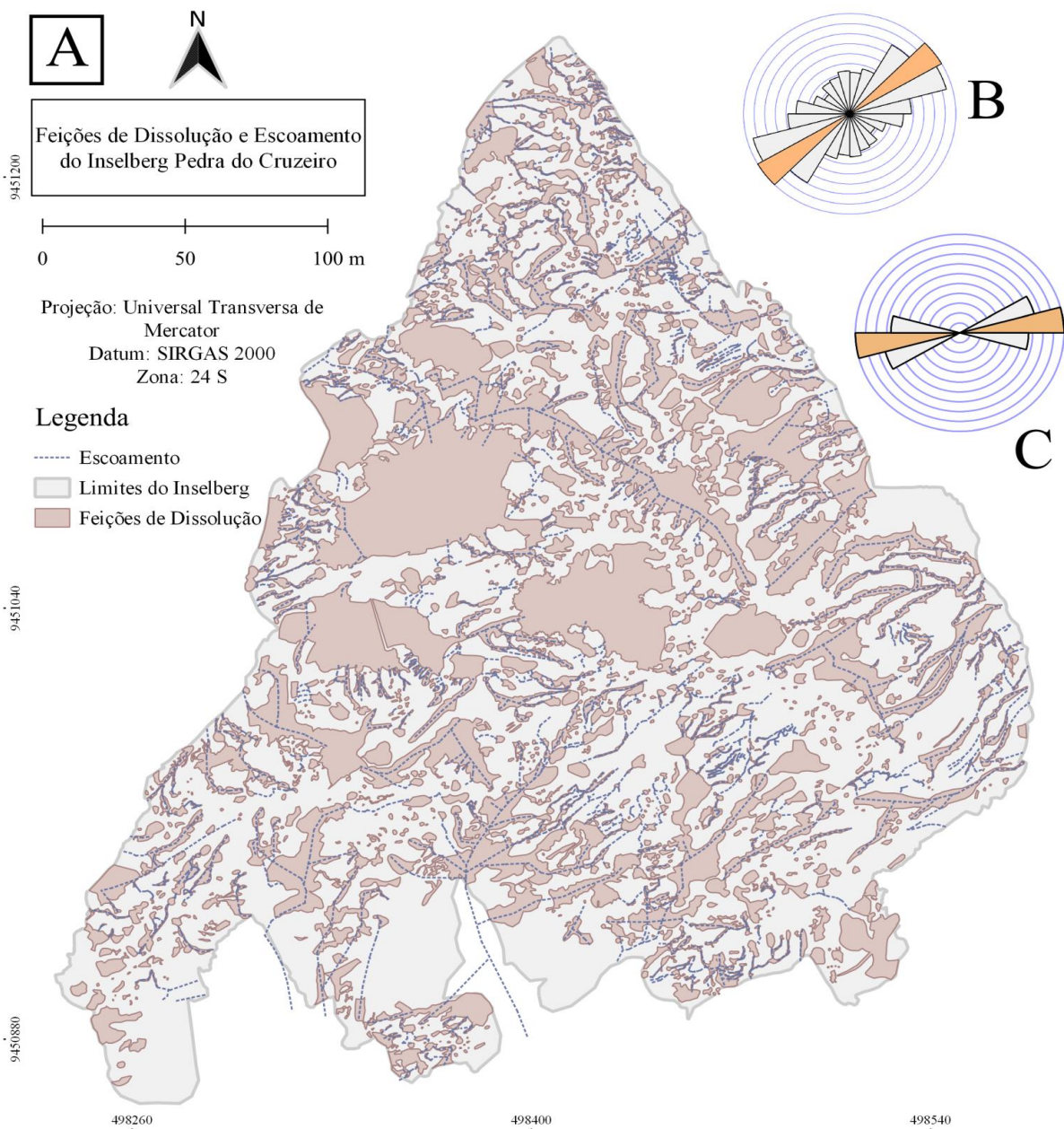


Figura 3. Feições de dissolução e escoamento no *Inselberg* Pedra do Cruzeiro. A: Mapa do *Inselberg* Pedra do Cruzeiro, destacando as feições de dissolução e escoamento superficial. B: Roseta de direção preferencial do escoamento do *Inselberg* Pedra do Cruzeiro. C: Roseta de direção preferencial do maior eixo de enclaves máficos. Localização na figura 1B. Fonte: Elaborado pelo autor.

Os *karrens* apresentam trends de orientação primária NE-SW e secundária E-W. Apesar disso, nota-se que a roseta apresenta escoamento para todas as direções, uma vez que o fluxo de água também segue a declividade das escarpas (Figura 3B).

A orientação primária de enclaves máficos (alongados) no *inselberg* é E-W (Figura 3C). Os azimutes coletados de enclaves máficos no *inselberg* Pedra do Cruzeiro variam entre 73° e 102°, sendo o ângulo médio 86°. O grau de foliação magmática da rocha encaixante é sutil e variável, por vezes acompanhando a orientação do enclave.

4.2. Enclaves máficos: ponto de partida para a dissolução

Enclaves máficos microgranulares ocorrem de modo ubíquo no Plúton Quixadá. A Pedra do Cruzeiro é um *inselberg* cujas rochas hospedam esses enclaves, que ocorrem tanto de modo isolado (Figura 4A e B), como em forma de enxames (agrupamentos em torno de 3 a 6 enclaves) (Figura 4C).

Em termos de suas características petrográficas em afloramento, os enclaves apresentam coloração máfica (índice de cor acima de 67%); e ora apresentam textura microgranular de matriz afanítica, em que não se identifica a olho nu a maioria dos cristais (figura 4A), ora textura híbrida, com ocorrência de cristais euédricos de feldspatos entre a matriz máfica (Figura 4B).

Os contatos com a rocha encaixante porfirítica são majoritariamente retos, evidenciando o contraste de textura (Figura 4A). Em alguns casos, as porções do contato podem ser gradacionais, com interação entre as duas fácies (Figura 4B).

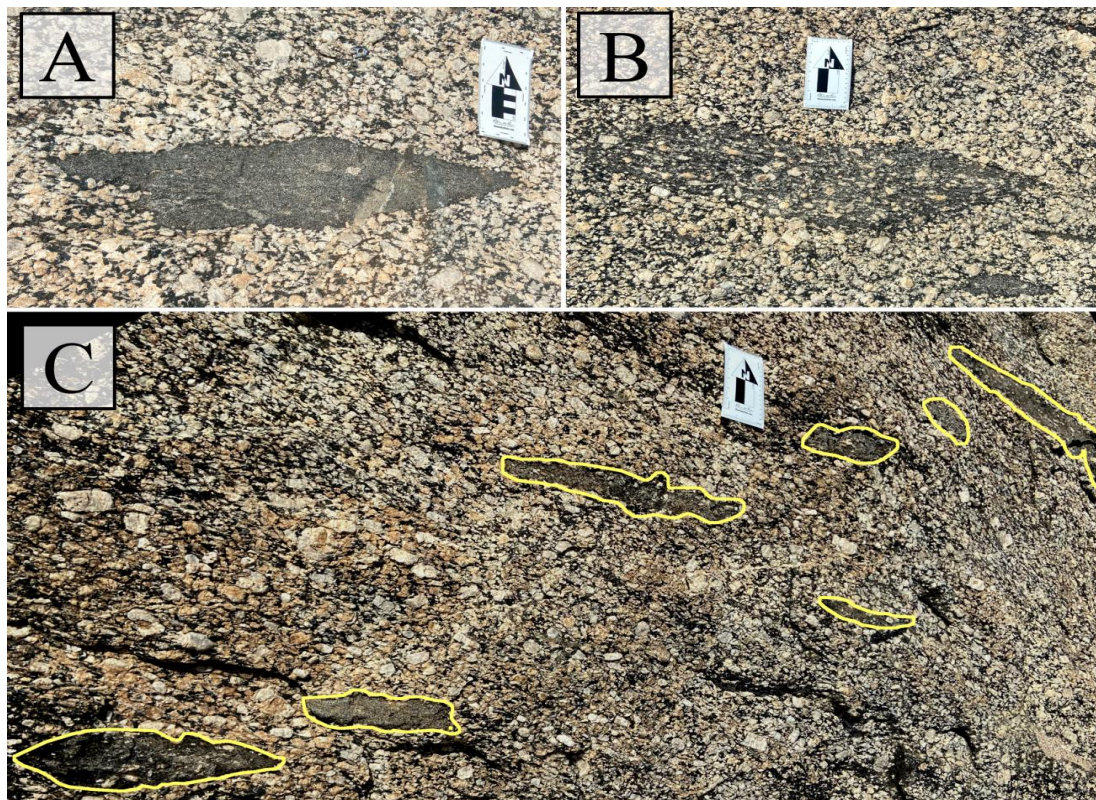


Figura 4. Enclaves máficos e enxames de enclaves na Pedra do Cruzeiro. A: Enclave máfico microgranular; B: Enclave máfico híbrido com incidência de fenocristais de feldspato. C: Enxame composto por sete enclaves máficos orientados em mesma direção, limites bordados pela linha amarela. Fonte: Elaborado pelo autor.

As dimensões dos enclaves variam de 10 x 5 cm até 175 x 30 cm e comumente apresentam formato elipsoidal, com alongamento de seu maior eixo a E-W. Não raro observam-se enclaves consumidos como resultado de intemperismo de seus minerais máficos e erosão. Nesse aspecto, foram identificados e definidos diferentes graus de remoção/erosão do enclave no *inselberg* Pedra do Cruzeiro: enclave não removido (Figura 4A), enclave parcialmente removido (Figura 5A e 5B) e enclave totalmente removido (Figura 5C), cuja identificação é possível devido à permanência de sua forma original ainda na superfície do afloramento.



Figura 5. Aparência de enclaves máficos de acordo com estado de remoção. A e B: Enclave parcialmente removido. C: Enclave totalmente removido. Fonte: Elaborado pelo autor.

A erosão dos enclaves máficos deixa na superfície uma feição de dissolução côncava do tipo *gnamma* em estágio inicial de desenvolvimento, cuja morfologia e dimensão elipsoidal é resultado mais direto da forma e tamanho do enclave-fonte (Figura 5C). Em estágios mais avançados da formação da *gnamma*, esta começa a se expandir, e um incipiente manto de intemperismo é formado no interior da cavidade, que progressivamente toma a forma côncava típica da feição (Figura 6). A partir dessas observações, nota-se que há uma influência do controle estrutural relativa à presença dos enclaves máficos que contribuem para a gênese destas formas em seus dos estágios iniciais.

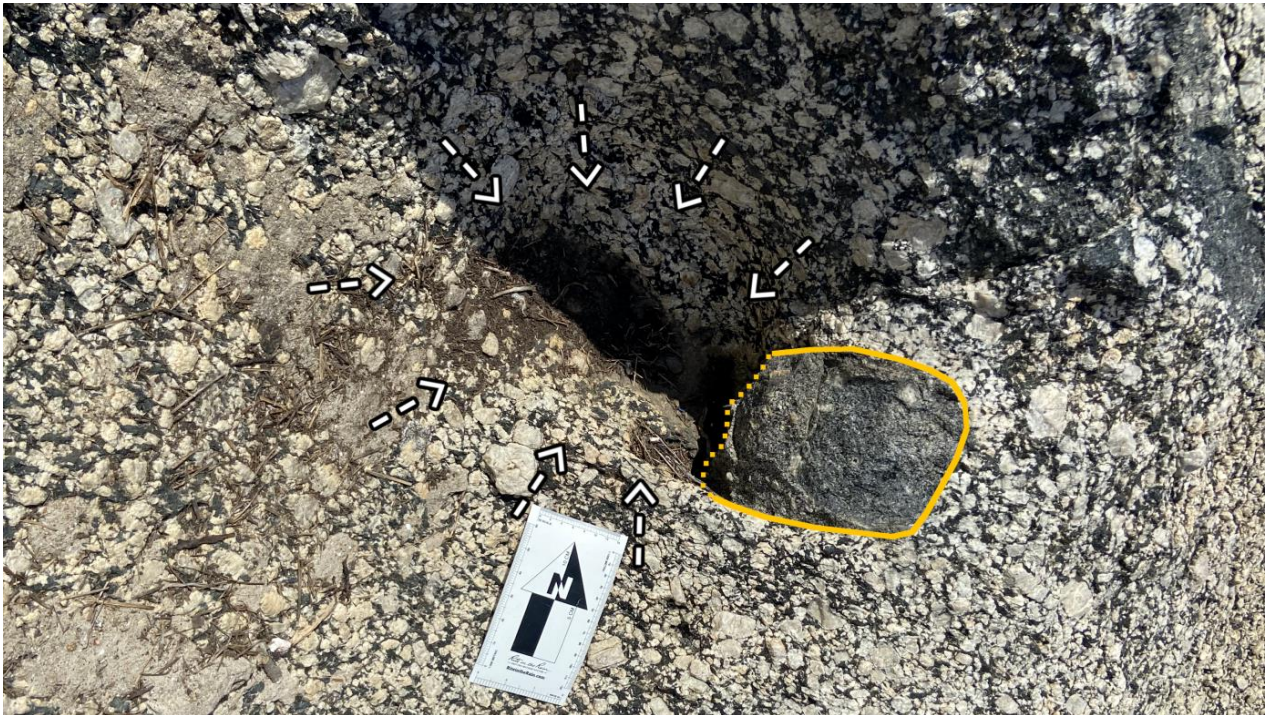


Figura 6. Enclave parcialmente removido formando uma feição de dissolução do tipo *gnamma*. Borda amarela indica os limites do enclave máfico, pontilhado indica os limites da fração removida. Setas brancas indicam concavidade da *gnamma*. Fonte: Elaborado pelo autor.

5. Discussões

Diversos são os fatores que podem controlar a gênese de feições de dissolução e, particularmente, formação de *gnammas* em rochas graníticas. Entretanto, muitas vezes o fator genético não está mais evidente no relevo devido ao intemperismo e erosão responsável pela formação da *gnamma* (Twidale; Bourne, 2018). Fatores alegados na origem de *gnammas* incluem o estacionamento de água em pequenas depressões nos afloramentos rochosos (Migon, 2006), considerando que processos de feedback positivo ocorrem com a concentração de umidade favorecendo seu alargamento. Entretanto, a origem dessas irregularidades em rochas graníticas, sabe-se que as diferenças mineralógicas na resposta ao intemperismo tendem a favorecer microintemperismo diferencial na superfície, gerando um aspecto irregular (Helgeson, 1971; Migon, 2006).

Na área de estudo, demonstrou-se que a ação do intemperismo seletivo em porções máficas da rocha é responsável pelo início do processo de formação de feições de dissolução, tal como exemplificado pelos graus de remoção/erosão de enclaves máficos no *inselberg* Pedra do Cruzeiro. A presença de enclaves máficos consumidos parcialmente ou totalmente – evidenciado pela morfologia alongada do enclave resguardada no relevo – atesta a ação preferencial do intemperismo em porções da rocha com minerais ferromagnesianos, os quais são mais suscetíveis à alteração em condições superficiais (Eggleton, 2021). Assim, concavidades formadas no granito (estágio inicial de formação de *gnammas*) resguardam a herança do seu fator formador, neste caso os enclaves máficos consumidos.

Observações e descrições de *gnammas* feitas por Maia e Nascimento (2018) corroboram os dados apresentados nesse estudo, uma vez que os autores apontam que *gnammas* se desenvolvem a partir do consumo de enclave máfico em quatro estágios: 1 - enclave parcialmente consumido; 2 - expansão de seu eixo, formando um *gnamma* elipsoidal; 3 - desenvolvimento de *gnamma* esférico-côncava fechada; 4 - abertura de um exutório, propiciando escoamento; nesse estágio, podendo propiciar o desenvolvimento de *karren*. Este padrão foi verificado na Pedra do Cruzeiro, havendo uma predominância das *gnammas* exutório, com escoamento superficial.

Karrens também são formas comuns nas escarpas de *inselbergs*, e ocorrem em outras litologias de forma similar à apresentada no granito. White (1988) e Goudie (2009) afirmam que assim como calcários e dolomitos, os arenitos e granitos podem apresentar uma série de formas de diferentes tamanhos.

Em relevos compostos por rochas carbonáticas, *megakarrens* se desenvolvem em áreas de clima tropical ou em glaciocarste, com desenvolvimento atrelado a carstificação e/ou alterações climáticas, resultando em distintas origens de uma mesma feição em litologias diferentes (Perica, 2004; Veress, 2019), sendo possível traçar um paralelo entre o desenvolvimento das formas e compreender os fatores de dissolução.

Matias e Alves (2002), ao estudarem a influência de fatores petrográficos e ambientais nos padrões de deterioração e durabilidade de granitos nos monumentos de Braga, em Portugal, destacam que em rochas ricas em biotita, de grão médio a fino, frequentemente porfiríticas e com presença de elementos heterogêneos (erosão diferencial de fenocristais e enclaves) o processo de deterioração se inicia. A foliação tectônica de pedras leucograníticas de grão fino afeta a distribuição de fissuras, lascas e colonização biológica, sendo possível inferir que o processo ocorra de maneira similar para a formação dos *karrens* na área de estudo, inclusive com a presença de ácido carbônico, ácidos orgânicos (húmicos e fúlvicos) e ácido nítrico combinados, por exemplo.

No sentido dos controles da erosão de diferencial na formação de feições de dissolução, a presença de fissuras foi reconhecida por Twidale e Bourne (2018). Ortega *et al.* (2014) afirmam que a formação de *potholes* ligadas à erosão fluvial, aponta que descontinuidades estruturais, particularmente fraturas, controlam a ocorrência dessas feições. Em vista disso, pode-se inferir que a descontinuidade gerada pelo alojamento do enclave, os quais possuem bordas retilíneas, favorecem um ponto de ação para o intemperismo diferencial (Twidale; Bourne, 2018), e consequentemente controlam a iniciação das feições de dissolução tipo *gnamma*, nas superfícies de *inselbergs* em Quixadá.

No tocante à evolução de formas em longo-termo, e considerando modelos de múltiplos estágios na formação de feições em subsuperfície (Thomas, 1965; Migon, 2022; Roqué *et al.*, 2013) como preconizado por Büdel (1982), Migon (2006) observa que *gnammas* na zona árida da Namíbia são muito maiores dentre as mesmas feições em zonas mais úmidas. Isso pode sugerir a preservação dessas formas em climas áridos, resguardando condições climáticas tropicais, onde as formas foram moldadas. O mesmo contexto interpretativo pode ser aplicado as feições de dissolução na área de estudo. O conceito de etchplanação de Büdel (1982), vem sendo aplicado para as áreas tropicais que apresentam sazonalidade e pode subsidiar a interpretação geomorfológica acerca dos *inselbergs* do ambiente tropical. Segundo o modelo da etchplanação, durante os períodos úmidos há o aprofundamento da alteração, ao passo que a erosão superficial ocorre com maior intensidade durante períodos de clima seco, promovendo a planação e, em alguns casos, expondo o front de alteração (Figura 7).

Tendo isso em vista, propõe-se que a formação de feições de dissolução em *inselberg* se dá nos seguintes estágios: A1 – Formação do manto de alteração sobre o embasamento com foliação ígnea e enclaves máficos elipsoidais; A2 – Dissolução dos enclaves máficos em condições epigênicas, formando o primeiro estágio de bacias de dissolução; A3 – Concentração do intemperismo e erosão sob influência dos fatores estruturais e mineralógicos, permitindo alargamento e formação de *gnammas*; A4 – Estágios avançados da evolução de formas de dissolução e ação do escoamento de água, promovendo a coalescência de *gnammas* e formação de *karren*. Em termos evolutivos, a remoção do manto de alteração pode se dar em qualquer um dos estágios, expondo as formas modeladas sob o regolito.

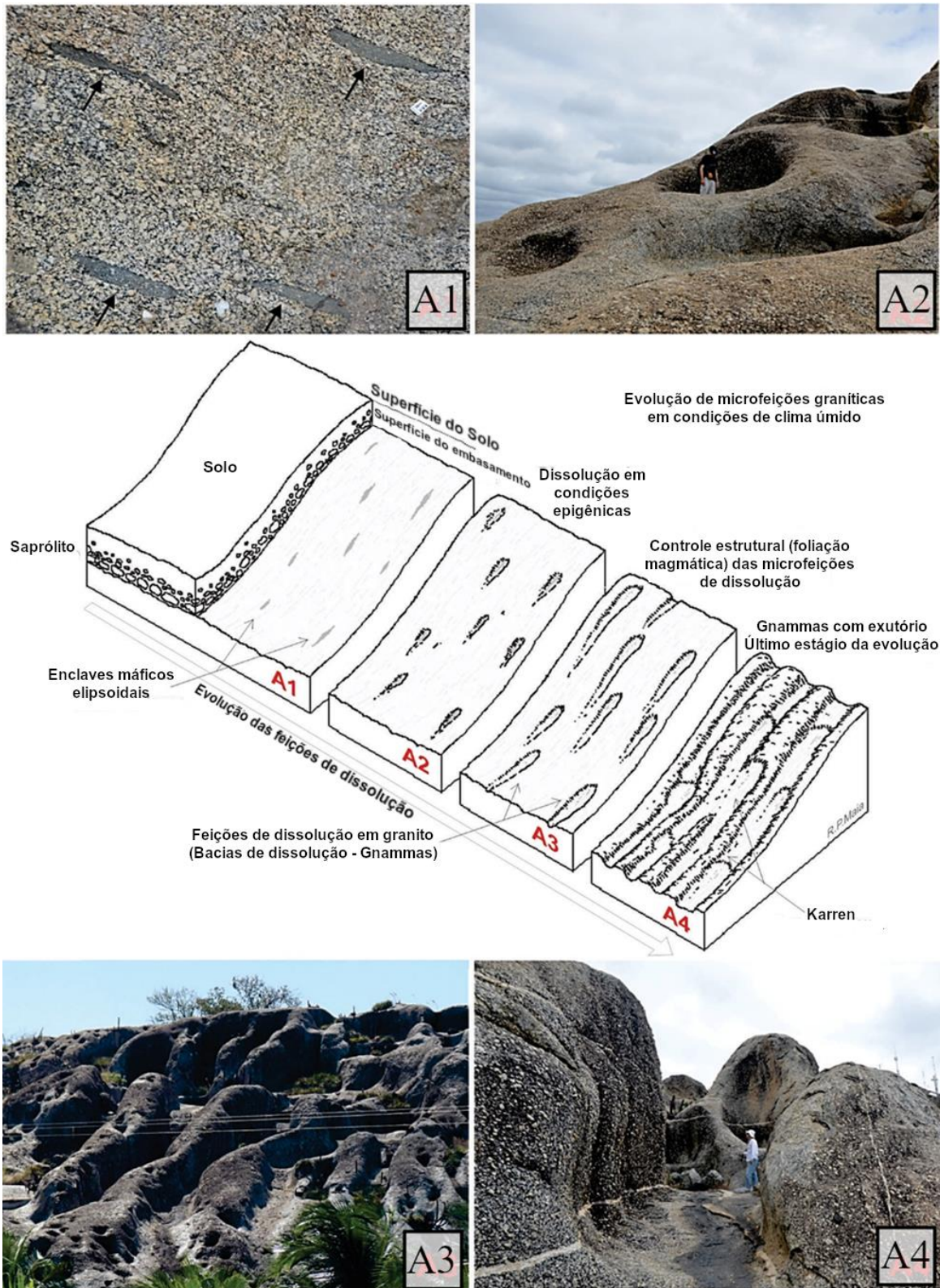


Figura 7. Modelo de evolução para feições de dissolução com base na teoria da etchplanação, neste caso, adaptada para microformas. A sequência de fotos A1, A2, A3 e A4 exemplificam os estágios de desenvolvimento das feições de dissolução. A1 – Processos de intemperismo diferencial sob manto de alteração em uma superfície com variações faciológicas. A2 – Formação de gnammas relativas à erosão de enclaves máficos. A3 – Desenvolvimento de bacias de dissolução seguindo controles estruturais de foliação ígnea. A4 – Coalescência de bacias de dissolução e formação de karren.

Entende-se, portanto, que a gênese das *gnammas* está associada à meteorização por meio de dissolução, hidratação e hidrólise, que desagrega parte da rocha, gerando fragmentos e resíduos que são transportados pela água, criando uma concavidade em forma de poltrona que possibilita acúmulo de água e desenvolvimento de uma *gnamma* (Twidale; Vidal Romani, 2005). Em campo, dado a ações intempéricas mais intensas em enclaves máficos, a erosão do enclave gera uma concavidade de maior dimensão, possibilitando um desenvolvimento maior da feição de dissolução. Considera-se, ainda, que o padrão de feições de dissolução (coalescência de *gnammas* e *karren*) e o padrão de escoamento superficial de água não evidenciam unicamente o controle estrutural na erosão diferencial, dada a complexidade de processos que estão em contínua atuação sobre as rochas graníticas.

6. Conclusões

Os resultados obtidos neste trabalho demonstram que a presença de enclaves dioríticos constitui o ponto de partida para formação das feições de dissolução em *inselbergs* graníticos. Os enclaves, de geometria elipsoidal, orientam a dissolução, que no primeiro estágio passa a expressar esse controle na forma de bacias de dissolução conectadas por exutórios. Assim, as fases iniciais dos processos de dissolução, exibem maior controle exercido pela forma e orientação do enclave, que por vezes segue pelo plano de foliação ígnea.

Para o *inselberg* Pedra do Cruzeiro, os eixos dos enclaves elipsoidais máficos, estão orientados na direção E-W. Essa anisotropia, favorece uma dissecação orientada que direciona o escoamento, formando sets de *karrens* e *gnammas* paralelos. Já em fases intermediárias e avançadas de formação dos *megakarrens*, há uma superimposição da drenagem que tende a se organizar na escala de *inselberg* com um padrão radial centrífugo difuso. Nessa fase, não se observa mais um nítido controle estrutural sobre as formas que caracterizam a morfologia do *inselberg*, como evidenciado pela variação nas orientações da drenagem, que apresenta um trend preferencial NE-SW e secundário E-W. Essas feições (canais de até 5 metros de largura e até 3 metros de profundidade) constituem o estágio de desenvolvimento máximo de feições de dissolução observadas.

Contribuições dos Autores: G.L.B.S: Concepção, metodologia, curadoria dos dados, redação – versão inicial, redação – revisão e edição; R.P.M: Concepção, metodologia, validação, aquisição de financiamento, redação – revisão e edição; L.E.P.T: validação, redação – versão inicial; A.S.V.S: Concepção, metodologia, redação – versão inicial. Todos os autores leram e concordaram com a versão final deste manuscrito

Financiamento: Esta pesquisa foi financiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo projeto *Inselbergs* de Quixadá: Origem e evolução geomorfológica.

Agradecimentos: Os autores agradecem aos comentários dos revisores anônimos na revisão do manuscrito.

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

Referências

- ALMEIDA, A. R. **Petrologia e aspectos tectônicos do Complexo Granítico Quixadá-Quixeramobim**. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1995. 279p.
- BÜDEL, J. **Climatic Geomorphology**. New Jersey. Princeton University Press, 1982. 444p.
- BÜDEL, J. Das system der klimatischen morphologie. **Deutscher Geographentag**, v 27,n 4, p. 65-100, 1948.
- COSTA, L. R. F.; MAIA, R. P.; BARRETO, L. L.; SALES, V. C. C. Geomorfologia do Nordeste setentrional brasileiro: uma proposta de classificação. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 1, p. 186-208, 2020. DOI: 10.20502/rbg.v21i1.1447
- EGGLETON, R. A. Mineralogy maketh mountains: Granitic landscapes shaped by dissolution. **Geomorphology**, v. 285, p. 363-373, 2017. DOI: 10.1016/j.geomorph.2017.01.016.
- FERNANDES, N. F; TUPINAMBÁ, M; MELLO, C.L.; PEIXOTO, M. N. O. Rio de Janeiro: A Metropolis Between Granite-Gneiss Massifs. In: MIGON, P. (Ed.). **Geomorphological landscapes of the world**. 1ª Ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 2010. p. 89-100.
- GINÉS, A. Karrenfield landscapes and karren landforms. In: GINÉS, A.; KNEZ, M.; SLABE, T.; DREYBRODT, W. (ed.). **Karst Rock Features, Karren Sculpturing**. 1ª ed. Ljubljana: Založba ZRC, 2009. p. 13-24.
- GOUDIE, A. S. Global deserts and their geomorphological diversity. In: **Geomorphology of desert environments**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009. p. 9-20.
- HELGESON, H.C. Kinetics of mass transfer among silicates and aqueous solutions. **Geochimica et Cosmochimica Acta**. v. 35, n. 5, p. 421-469, 1971. DOI: 10.1016/0016-7037(71)90043-3

10. INMET, Dados históricos/Clima, Instituto Nacional de Meteorologia, 2014. Disponível em: www.inmet.gov.br.
11. LIMA, G.M.P.; CORRÊA-GOMES, L.C. Itatim Geomorphological Site: Largest Concentration of Inselbergs in Brazil. In: VIEIRA, B.C.; SALGADO, A.A.R.; SANTOS, L.J.C. (Ed.). **Landscapes and landforms of Brazil**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2015. p. 371-380.
12. LIMA, D.L.S. Geomorfologia Granítica Do Maciço De Uruburetama, Ceará, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n. 2, p. 373-395, 2019. DOI: 10.20502/rbg.v20i2.1401.
13. MAIA, R.P. BEZERRA, F.H.R. NASCIMENTO, M.A.L. CASTRO, H.S., MEIRELES, A.J.A. ROTHIS, L.M. Geomorfologia Do Campo De Inselbergues De Quixadá, Nordeste Do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 16, n. 2, p. 239-235, 2015. DOI: 10.20502/rbg.v16i2.651.
14. MAIA, R.P. NASCIMENTO, M.A.L. Relevos Graníticos No Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, n. 2, p. 373-389, 2018. DOI: 10.20502/rbg.v19i2.1295.
15. MATIAS, J. M. S.; ALVES, C. A. S. The influence of petrographic, architectural and environmental factors in decay patterns and durability of granite stones in Braga monuments (NW Portugal). **Geological Society, London, Special Publications**, v. 205, n. 1, p. 273-281, 2002. DOI: 10.1144/gsl.sp.2002.205.01.20.
16. MIGÓN, P. **Geomorphological landscapes of the world: granite landscapes of the world**. New York: Oxford University Press Inc., 2006. 375 p.
17. MIGON, P. Long-term landform evolution. **Geological Society, London, Memoirs**, v. 58, n. 1, p. 87-98, 2022. DOI: 10.1144/M58-2021-25
18. MIGON, P. Spitzkoppe: The World of Granite Landforms. In: MIGON, Piotr (Ed.). **Geomorphological landscapes of the world**. 1ª Ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 2010. p. 155-162.
19. NEVES, S.P. **Granitos Orogênicos: da geração dos magmas à intrusão e deformação**. Rio de Janeiro: Synergia, 2012. 148p.
20. NOGUEIRA, J.F. **Estrutura, Geocronologia e Alojamento dos batólitos de Quixadá, Quixeramobim e Senador Pompeu – Ceará Central**. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2004. 140p.
21. PERICA, D., MARJANAC, T. ANIČIĆ, B. MRAK, I. JURAIĆIĆ, M. Small karst features (karren) of Dugi Otok island and Kornati archipelago coastal karst (Croatia). **Acta carsologica**, v. 33, n. 1, p. 118-130, 2004. DOI: 10.3986/ac.v33i1.319.
22. ROQUÉ, C.; ZARROCA, M.; LINARES, R. Subsurface initiation of tafoni in granite terrains—geophysical evidence from NE Spain: geomorphological implications. **Geomorphology**, v. 196, p. 94-105, 2013. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.06.015
23. SGARBI, G.N.C. **Petrografia Macroscópica das Rochas Ígneas, Sedimentares e Metamórficas**. 2ª ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2012. 559p.
24. SILVA, W. Pedra do Cruzeiro Quixadá Ceará Brasil, 7 ago. 2018. Facebook: @QuixadaAntiga. Disponível em: <https://www.facebook.com/QuixadaAntiga/photos/a.528689457291272/1006087226218157/?type=3>. Acesso em: 10 out. 2023
25. THOMAS, M.F. Some aspects of the geomorphology of domes and tors in Nigeria. **Zeitschrift für Geomorphologie**, Stuttgart, v.9, p. 63-81, 1965.
26. THOMAS, M.F. **Tropical geomorphology. A study of weathering on landform development in warm climate**. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1974. 313p.
27. TRAVASSOS, L. E. P. **Princípios de carstologia e geomorfologia cárstica**. 1ª ed. Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2019. 242p.
28. TWIDALE, C. R. **Granite landforms**. 1ªed. Amsterdam: Elsevier, 1982. 396p.
29. TWIDALE, C.R.; BOURNE, J.A. Rock basins (gnammas) revisited. **Géomorphologie: relief, processus, environnement**, v. 24, n. 2, p. 139-149, 2018. DOI: 10.4000/geomorphologie.11880.
30. TWIDALE, C. R.; VIDAL ROMANÍ, J. R. **Landforms and Geology of Granite Terrains**. Boca Ratón: CRC Press, 2005. 365p
31. VAUCHES, A., NEVES, S., CABY, R., CORSINI, M., EGYDIO-SILVA, M., ARTHAUD, M., AMARO, V. The Borborema shear zone system, NE Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 8, n. ¾, p. 247-266, 1995. DOI: 10.1016/0895-9811(95)00012-5.
32. VERESS, Márton. The KARREN and KARREN formation of bare slopes. **Earth-Science Reviews**, v. 188, p. 272-290, 2019. DOI: 10.1016/j.earscirev.2018.11.006.
33. White, W.B. **Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains**. 1ª ed. New York: Oxford University Press, 1988. 480p.



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.