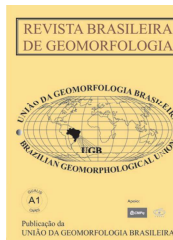


www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 20, nº 4 (2019)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v20i4.1521>



CONDICIONAMENTO MORFOESTRUTURAL DO INSELBERG PEDRA DA ANDORINHA, SERTÃO NORTE DO CEARÁ, BRASIL

MORPHOESTRUCTURAL CONDITIONING OF PEDRA DA ANDORINHA INSELBERG, NORTHERN SERTÃO OF CEARÁ, BRAZIL

Wesley Feitosa Rodrigues

*Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais.
Avenida Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, Minas Gerais. CEP 31270-901. Brasil
ORCID: 0000-0001-9319-5414
E-mail: wesley_fr@yahoo.com.br*

Rúbson Pinheiro Maia

*Departamento de Geografia, Universidade Federal do Ceará.
Campus do Pici, Bloco 911, Fortaleza, Ceará. CEP: 60455-760. Brasil
ORCID: 0000-0002-1688-5187
E-mail: rubsonpinheiro@yahoo.com.br*

Daniel Dantas Moreira Gomes

*Departamento de Geografia, Universidade de Pernambuco.
Campus de Garanhuns, Garanhuns, Pernambuco. CEP: 55294-902. Brasil
ORCID: 0000-0001-6868-040X
E-mail: daniel.gomes@upe.br*

Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):
19/06/2019

Aceito (Accepted):
17/10/2019

Palavras-chave:

Condicionalmento Morfoestrutural;
Inselberg; Aerofotogrametria;
Pedra da Andorinha.

Keywords:

Morphostructural Conditioning;
Inselberg; Aerophotogrametry;
Pedra da Andorinha.

Resumo:

O condicionamento morfoestrutural do Inselberg Pedra da Andorinha, foi investigado através de dados litoestruturais regionais e fofotointerpretação do arranjo de fraturas locais, a partir de produtos aerofotogramétricos (ortomosaico e MDE) levantados com drone (VANT). Foram constatados aspectos geomorfológicos de um *bornhardt* associado a diversas feições epigênicas, suportado por litologia sienogranítica isotrópica, de textura fanerítica granular. O mapeamento estrutural identificou 13.698 fraturas, com direção principal a N10W, dispostas em um arranjo associado às disparidades topográficas da área de estudo. Porções do relevo com altas concentrações de fraturas correspondem a áreas rebaixadas, enquanto que as baixas quantidades são verificadas nas porções alçadas. Dessa forma, constatou-se que a densidade de fraturas condicionou a evolução do inselberg, possibilitando que o intemperismo diferencial fosse intensificado nas porções mais deformadas do terreno. Os relevos residuais encontrados na área de estudo foram exumados por processos erosivos, configurando núcleos de maior resistência a meteorização. Consequentemente, a morfologia da Pedra da Andorinha e o concomitante aplainamento de áreas em seu entorno são subordinados a um controle estrutural, cujo grau de dissecação é controlado pela densidade de fraturas.

Abstract:

The Morphostructural conditioning of Pedra da Andorinha inselberg was investigated through regional lithostructural data and photointerpretation of local fracture arrangement from aerophotogrammetry products (orthomosaic and DEM) acquired with drone (UAV). Geomorphological aspects of a bornhardt, associated with several epigenic forms, supported by isotropic sienogranitic lithology, with granular phaneritic texture, were verified. The structural mapping identified 13.698 fractures, with main direction to N10W, willing in an arrangement associated with topographical disparities of the study area. Relief portions with fractures high concentrations correspond to lowered areas, while fractures low concentrations were verified in elevated areas. In this way, it was noted that fractures density conditioned Inselberg's evolution, allowing that differential weathering was intensified in more deformed portions of the terrain. Residual reliefs found in the study area were exhumed by erosive processes, forming cores of greater resistance to meteorization. Consequently, Pedra da Andorinha Inselberg morphology and concomitant planing of surroundings areas, were subordinated to a structural control, whose dissection degree is controlled by fractures density.

1. Introdução

Os inselbergs são formas de relevos característicos de litologias graníticas, correspondentes a massas rochosas escarpadas, com morfologias côncavo-convexas, isoladas ou agrupadas, que afloram em superfícies erosivas (MIGÓN, 2006). Outras características comuns aos inselbergs são a ocorrência em ambientes tropicais/subtropicais e semiáridos/áridos, cuja evolução está associada à alternância de fases de aplainamento (BÜDEL, 1957; MILLOT, 1977).

Em períodos de estabilidade tectônica, as formas residuais são modeladas por processos de meteorização na base do manto de alteração e posteriormente, são exumadas pelos processos erosivos, correspondendo a etchplanos (MIGÓN, 2006). A velocidade de aprofundamento do *front* intempérico responde a fatores condicionantes como a densidade de fraturamento, a fábrica mineral, a composição faciológica e as circunstâncias climáticas (THOMAS, 1994).

Nesse contexto, estudos relativos a condicionantes litoestruturais do intemperismo diferencial (MIGÓN, 1997; SIMON-COIÇON *et al.*, 1997; ERICSON *et al.*, 2005; TWIDALE, 2007; DAUTEUIL *et al.*, 2015), atributos morfométricos e de distribuição espacial (RÖMER, 2005, 2007, 2010; EBERT *et al.*, 2011); e taxas de denudação/erosão (DECKER *et al.* 2012; MATMON *et al.*, 2013; MATMON *et al.*, 2018) vêm sendo empregados para a compreensão evolutiva desses relevos.

No Nordeste brasileiro são verificados diversos registros dessas morfologias, principalmente ao norte do Planalto da Borborema. Algumas das principais manifestações ocorrem em maciços, como em Quixadá (CE), em Patos (PB) e em Itatim (BA), constantemente

modelados em intrusões graníticas (MAIA e NASCIMENTO, 2018).

Apesar desse cenário, os trabalhos de âmbito regional voltados aos aspectos genéticos desses relevos, são escassos ou não apresentam discussões litoestruturais aprofundadas. Dentre as pesquisas de maior destaque encontram-se os estudos de Maia *et al.* (2015), Lima e Corrêa-Gomes (2015) e Maia e Nascimento (2018), pautados em análises dos condicionamentos morfoestruturais nos inselbergs nordestinos.

Diante do exposto, o presente artigo propõe uma análise do condicionamento morfoestrutural na morfologia do inselberg Pedra da Andorinha, no Ceará. Para tanto, foram utilizados dados derivados de produtos aerofotogramétricos (ortomosaico e MDE), de levantamentos dos aspectos faciológicos locais, arcabouço morfotectônico regional e condições paleoclimáticas. Somado a isso, dados de processos intempéricos e estado de meteorização desses terrenos foram verificados em campo.

2. Localização e caracterização da área de estudo

O inselberg Pedra da Andorinha (PA) está situado na localidade de Taperuaba, pertencente ao município de Sobral, no Sertão Norte do Estado do Ceará, Nordeste do Brasil. Em escala regional, esse setor é subordinado aos domínios a NW da Província Borborema (PB), correspondendo geologicamente a litologias do embasamento cristalino neoproterozoico, com predominância das associações granítico-migmatíticas do Complexo Tamboril-Santa Quitéria (CTSQ) (Figura 1). A gênese do CTSQ é atribuída a uma subducção de sentido

NW-SE, envolvendo a consumação do antigo Oceano Goiás-Faruriano, no setor oeste do supercontinente Gondwana, culminando em uma colisão continental

entre o Embasamento Arqueano-Paleoproterozoico e o Bloco Parnaíba/Cráton-Oeste Africano durante o Ciclo Brasileiro-Panafricano (FETTER *et al.*, 2003).

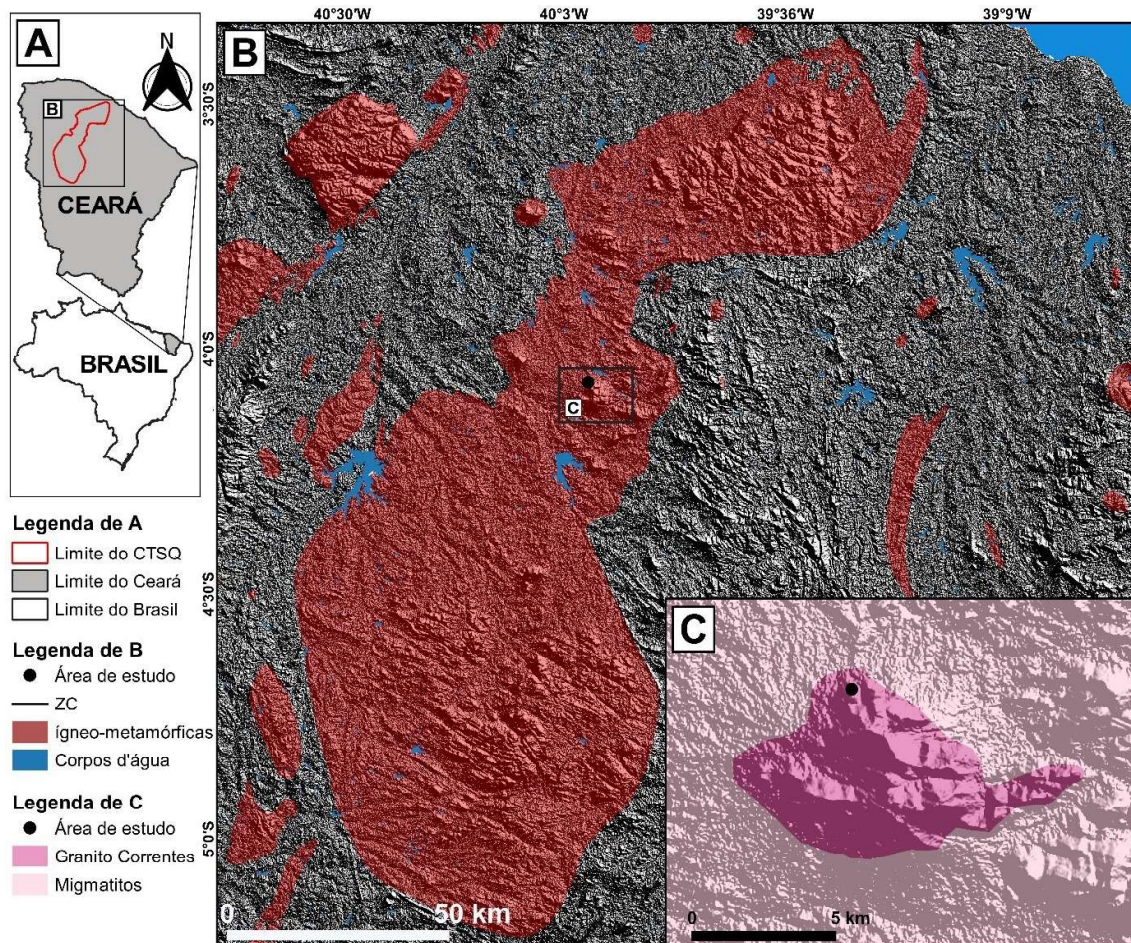


Figura 1 - Localização e geologia simplificada da área de estudo. A- Situação geográfica do Ceará em relação ao Brasil; B- Posição do CTSQ em nível de Ceará; C- Granito Correntes.

A principal fase magmática do CTSQ, sin a tardi-orogênica – 800 a 600 M.a. (ARAÚJO *et al.*, 2014) – resultou em uma associação de migmatitos metatextíticos e diatextíticos, além de granitos equigranulares a porfíricos (ZINCONI, 2011). Especificamente, a litologia que suporta a PA corresponde a um granito sin-empurrão, denominado de Granito Correntes (GOMES, 2006), homônimo do maciço que circunscribe a área de estudo.

O Granito Correntes (GC) não apresenta variação faciológica. Sua litologia exibe alto teor de sílica (>75%) e colorações em tons róseos a esbranquiçados (Figura 2), com mineralogia composta por quartzo (29%), k-feldspatos (39%), plagioclásios (18%), bio-

tita (10%), zircão e opacos (GOMES, 2006). O GC é classificado como sienogranito devido a um enriquecimento em sua relação de concentração entre feldspatos/plagioclásios, dispendo de granulação média a grossa, com uma trama mineral isotrópica e textura fanerítica granular (GOMES, *ibidem*).

Em um contexto regional, a trama estrutural denota falhas compressivas de direção aproximada NNE-SSE; zonas de cisalhamento (ZC) transcorrentes sinistrais NNW-SSE e WNW-ESSE; e uma gama de diques básicos que cortam a região em comportamento difuso (CASTRO, 2004; ZINCONI, 2011). Descontinuidades rúpteis de menor expressão, como fraturas, são recorrentes por toda a extensão dos terrenos adjacentes.



Figura 2 - Aspectos de campo do Granito Correntes. Grande concentração de *k*-feldspatos, textura fanerítica granular e fábrica isotrópica.

A situação geomorfológica regional apresenta um conjunto de maciços cristalinos, com disposição geral NW-SE a E-W, circundados pelas superfícies aplainadas adjacentes. A elevação atinge uma média de aproximadamente 800 m, com elevação máxima de 918 m em pontos específicos (CASTRO, 2004). Cristas e inselbergs, alinhados em direção geral NW-SE, despontam nas superfícies erosivas a cerca de 200 m de elevação em relação ao nível de base local. A superfície onde afloram os maciços denota uma declividade suave no sentido NW-SE (RODRIGUES e MAIA, 2019).

O inselberg em análise faz parte do sistema de vertentes setentrionais do Maciço Correntes, podendo ser classificado como *bornhardt* (Figura 3). Vidal Romani e Twidale (1998) descrevem essa categoria de feições residuais como relevos desnudos, em geral dômicos ou em forma de torre (Pães de açúcar). A morfologia de suas escarpas e sua extensão vertical são, em geral, condicionadas estruturalmente por sistemas ortogonais a romboidais de fraturas (TWIDALE, 2007). São verificados em isolamento em meio a planícies ou amplos planaltos, ou em topos convexos sobressalentes em maciços granitoides (VIDAL ROMANÍ e TWIDALE, 2005). Segundo Migoñ (2006) essas feições ocorrem em diversas áreas do globo, sem uma restrição climática específica, sendo melhor verificadas em litologias ígneo-metamórficas.

3. Materiais e Métodos

No presente trabalho, utilizou-se a análise de informações geológicas, geomorfológicas e aerofotogramétri-

cas, para a construção do modelo evolutivo em questão, com foco na inter-relação entre estruturas rúpteis e morfologia do inselberg e seu entorno. Entre os materiais de fontes secundárias, foi realizada a revisão cartográfica das informações dispostas nas Cartas Geológicas da CPRM, especificamente na Folha Quixadá – 1:250.000 (TORRES *et al.*, 2007) e na Folha Taperuaba – 1:100.000 (CASTRO *et al.*, 2014), e MDE-ALOS PALSAR RTC, com resolução espacial de 12,5 m, disponibilizado gratuitamente no *Alaska Satellite Facility* (ASF) (disponível em: <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>).

Os dados primários foram elaborados em ambiente SIG, a partir de produtos matriciais levantados por drone. Esses por sua vez, foram integrados em um banco de dados georreferenciado na Projeção UTM, Zona 24 S, no Sistema de Referência SIRGAS 2000. Os softwares empregados nessa pesquisa foram o *Pix4D Capture*, o *ArcGIS*, 10.4, o *Agisoft Photoscan* e o *SPRING 5.5.3*. Além desses, informações secundárias referentes a petrografia macroscópica objetivaram o reconhecimento de condicionantes litológicos ao intemperismo e a caracterização de micro e macroformas graníticas.

O equipamento utilizado para a aquisição das imagens foi um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) de modelo Phantom 4, fabricado pela empresa chinesa DJI (*Jiāng Innovations Science and Technology Co., Ltd.*). Caracterizado como um multirrotor leve, de pequenas dimensões e peso aproximado de 1,5 kg, esse drone conta com uma câmera de 12 megapixels em conjunto com um mecanismo de estabilização inercial (*gimbal*) que melhora a captação de imagens.

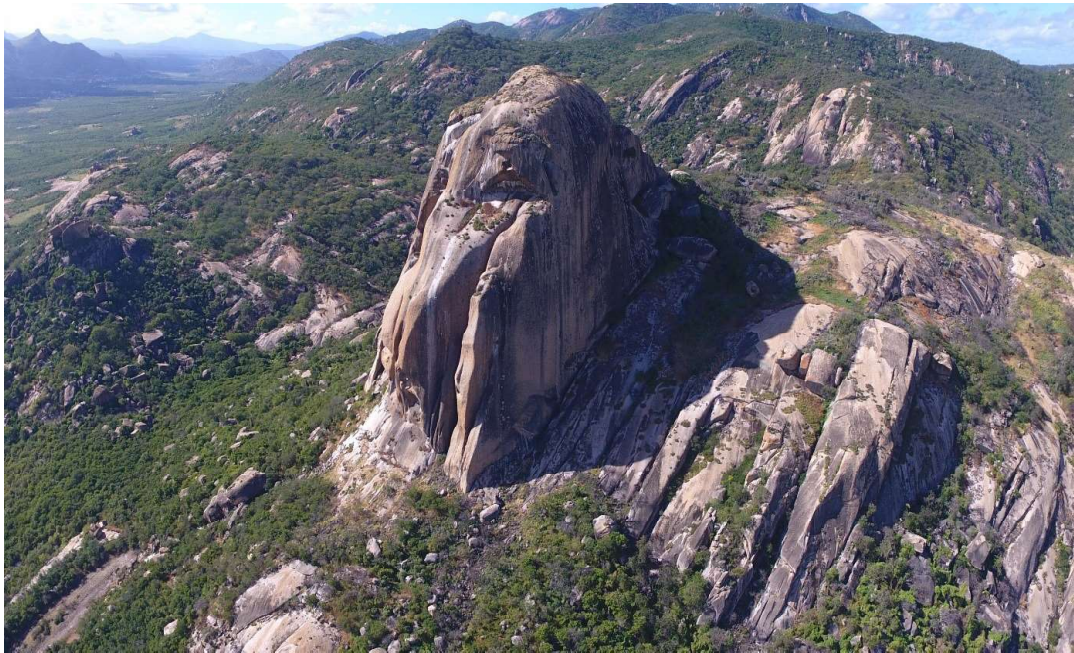


Figura 3 - Vista frontal das vertentes setentrionais do Maciço Correntes, com destaque para o inselberg Pedra da Andorinha.

O planejamento dos voos foi realizado no software *Pix4D Capture*, onde os parâmetros foram baseados nos aspectos do sensor acoplado e na resolução final pretendida. Adotou-se nesses trabalhos uma resolução espacial de 5 cm, com altura de imageamento variado, e taxas de sobreposições longitudinais e laterais na ordem de 80%. Os voos foram realizados no dia 23 de maio de 2017, em dias ensolarados e com escassa presença de nuvens. Contudo, o equipamento apresentou algumas perdas de sinal em função da altitude do relevo imageado. Dessa forma, as áreas no produto final que dispunham de alta interferência foram descartadas na etapa de interpretação visual.

O processamento dos dados adquiridos foi realizado no software fotogramétrico *Agisoft Photoscan* com o propósito de gerar nuvens de pontos regulares e densas, ortomosaico georreferenciado (Figura 4) e modelo digital de elevação (MDE). O fluxo consistiu de triangulação e medição automática de imagens, ajuste dos centros fotográficos em função de pontos de controle, construção do MDE, e produção do mosaico para o levantamento de estruturas rúpteis. Os pontos de controle foram coletados a partir de um GPS de navegação em campo e a partir de fotointerpretação de alvos em imagens do Google Earth.

De posse dos derivados fotogramétricos, o levantamento de estruturas foi realizado no software *ArcGIS 10.4*, com limiar de identificação na escala de 1:300.

Devido ao elevado percentual de coberturas fitopedológicas em alguns desses setores, a interpretação foi disposta em relação a padrões de maior pronunciamento de estruturas em escala inferior a citada, em torno de 1:8000. Dessa forma, onde o discernimento das estruturas foi dificultado, optou-se por buscar a tendência vetorial dos lineamentos de maior prolongamento, a fim de averiguar possíveis descontinuidades rúpteis mascaradas pelas coberturas.

Segundo Singhal e Ghupta (2010), a direção média de um grupo de lineamentos ou fraturas alinhadas ou semialinhadas deverá ser representada no mapeamento por meio de uma soma vetorial. Essa condição diminui o erro estatístico do levantamento de modas direcionais e, conseqüentemente, atribui maior eficácia ao entendimento do quadro cinemático de esforços.

No software *SPRING 5.5.3*, os dados vetoriais referentes às descontinuidades passaram por uma análise estatística relacionada a *trends* preferenciais e comprimento médio dessas fraturas. O produto final dessa etapa foi um diagrama de roseta, dividido em 18 modas direcionais em função da população desses dados.

Ao final do levantamento, foi gerado um raster referente a densidade de estruturas com o intuito de especificar áreas de alto e baixo fraturamento. O cálculo de densidade foi gerado a partir da razão entre o comprimento das fraturas por raios de 500 m² (m/500 m²). Esse raster foi classificado em cinco categorias de

densidade segundo a seguinte distinção: (i) densidade muito baixa, com fraturas de até 4 m dentro do valor estipulado para o raio de análise; (ii) densidade baixa, com fraturas entre 4 e 9 m; (iii) densidade moderada, com fraturas entre 9 e 14 m; (iv) densidade alta, com comprimentos entre 14 e 19 m; e (v) densidade muito alta, com fraturas medindo mais de 19 m.

O MDE também foi pós-processado no software ArcGIS, onde foi estabelecida uma reclassificação em função dos principais compartimentos geomorfológicos da área. Além disso, o mesmo produto passou por um sombreamento, com elevação de fonte luminosa a 30° e azimute de iluminação a 90°, que foi sobreposta ao dado reclassificado para melhor distinção das feições em análise.

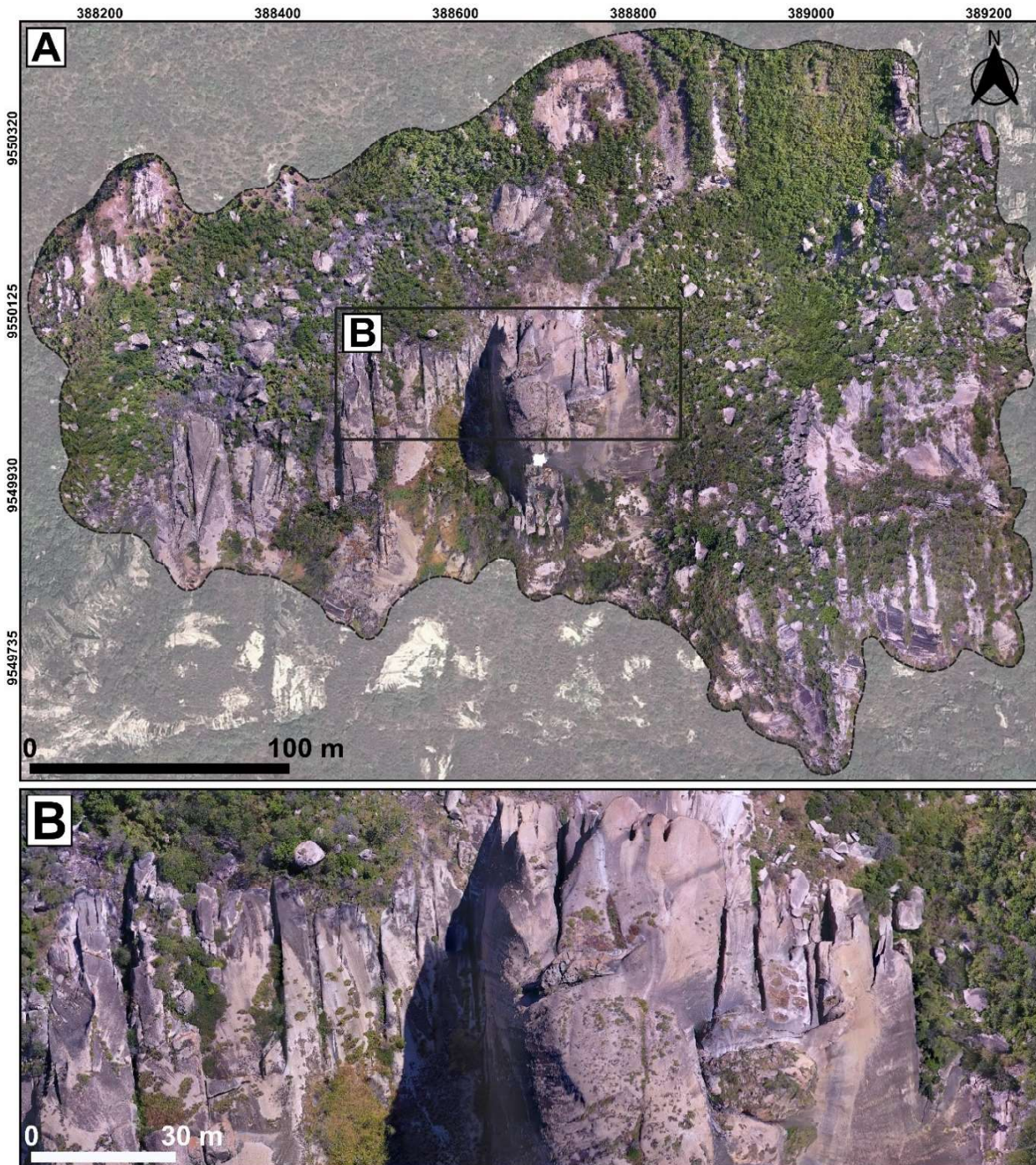


Figura 4 - Ortomosaico gerado para o levantamento de discontinuidades. A- Poligonal com a área de imageamento. B- Padrão de estruturas que transpassam o inselberg.

4. Resultados

A PA corresponde a um *bornhardt* alongado em forma de torre, desnudo, que possui uma altura de aproximadamente 200 m, com seu eixo inferior elevado a cerca

de 150 m acima do nível de base local. O topo exibe a maior altitude a 520 m de elevação. As escarpas laterais são íngremes, com declividades em torno de 80°, coincidindo com as direções fraturamento preferenciais (Figura 5).

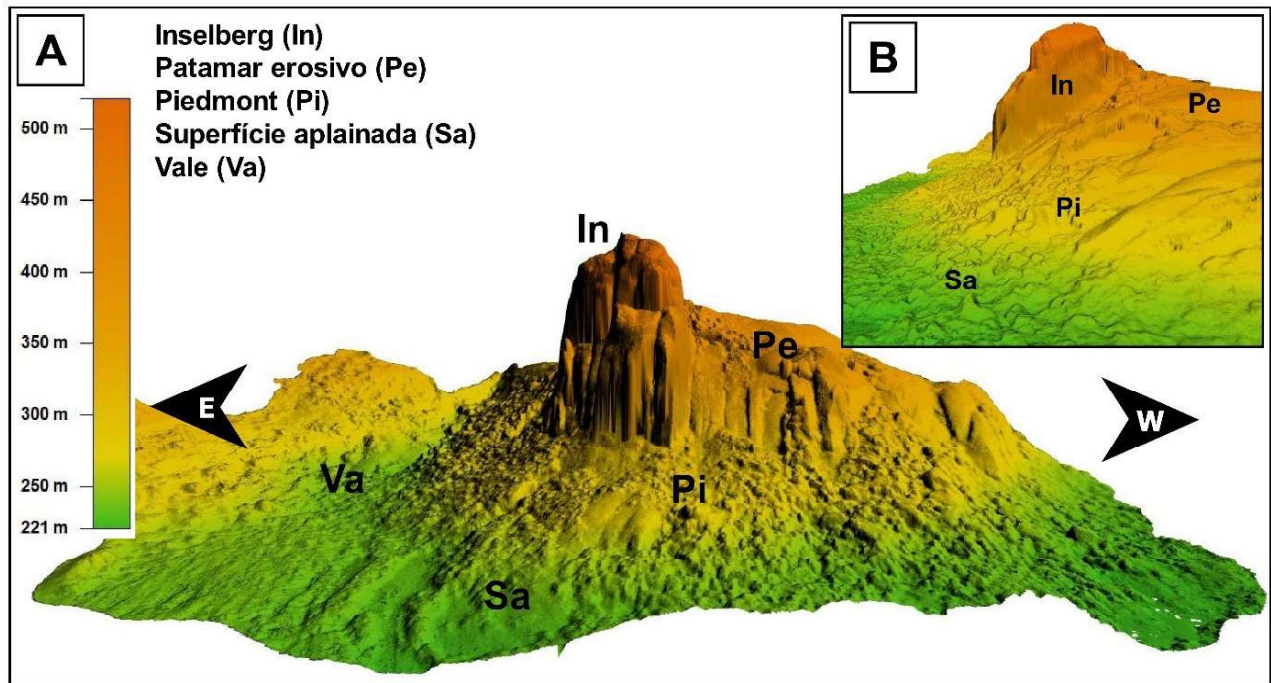


Figura 5 - Elevação e compartimentos geomorfológicos associados à PA. A- Visão frontal do inselberg. B- Visão de oeste para leste da PA. Produto gerado a partir de dados MDE do levantamento aerofotogramétrico.

Na escarpa setentrional, observa-se um conjunto de feições características de processos de meteorização química, como caneluras, bacias de dissolução e *tafonis* (Figura 5 A). As caneluras frontais formam-se a partir de um grupamento de fraturas. Enquanto no topo ocorre a desagregação de placas por esfoliação, em sua escarpa meridional, um conjunto de blocos empilhados configuram feições do tipo *tor* em função de seu arranjo em sistemas de fraturas ortogonais, de baixo espaçamento.

Esse relevo aflora em um patamar erosivo semi-côncavo, composto por bordas frontais denudadas em um arranjo similar a um teclado de piano, em virtude de um rígido *set* de fraturas que os seccionam (Figura 6 A). Seu limite a leste é disposto pelo Vale da Andorinha, que transpassa as vertentes setentrionais do Maciço Correntes, enquanto que um *piedmont*, de declividade entre 20° - 25°, margeia o restante de sua extensão. Essa rampa denota decaimento acidentado e por vezes desnudado, estendendo-se até a superfície de aplainamento, repleto

de feições aguçadas como *boulders* e *tors*. Alguns dessas feições de menor porte chegam a apresentar 5 m de diâmetro e arredondamento acentuado.

Outro patamar erosivo, superior ao nível de base local, é verificado imediatamente a leste do Vale da Andorinha. Seu topo, semi-côncavo, expõe uma diferença altimétrica de aproximadamente 50 m para a base da PA. Além disso, seu *piedmont* possui declividades mais baixas (>20°) e uma maior concentração de feições saprolíticas *in situ* (Figura 6 B).

O vale da Andorinha, que divide esses patamares, condiciona o principal fluxo de escoamento da área (Figura 6 C). Em porções de maior profundidade, esse compartimento geomorfológico denota um aglomerado de *boulders* em arranjos parcialmente ortogonais acima das coberturas superficiais. Abaixo desses, cavidades são bem marcadas entre seus interstícios, configurando feições de intemperismo diferencial características de condições epigênicas.

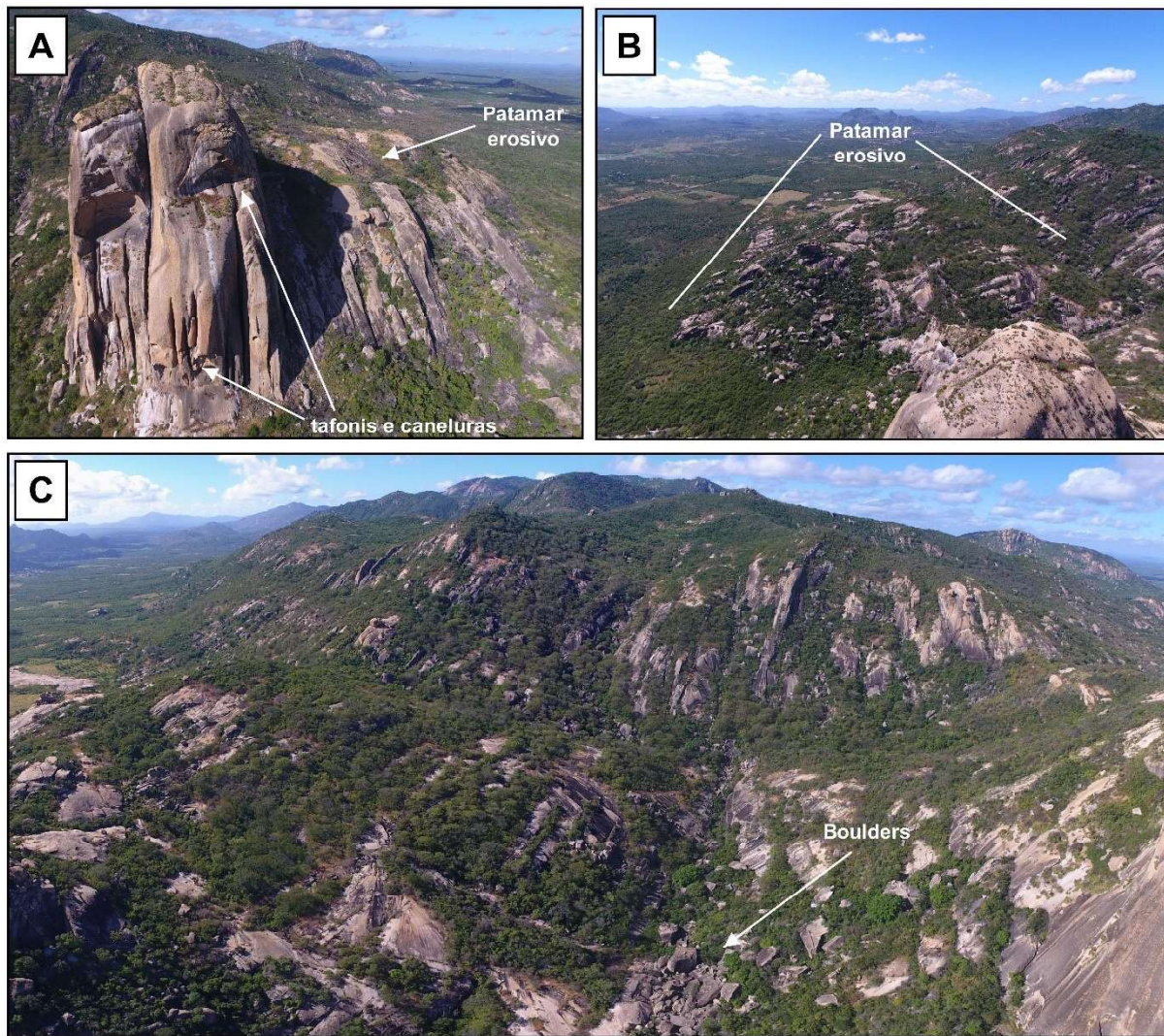


Figura 6 - Feições geomorfológicas da PA. A- Destaque para as microformas como caneluras e tafonis na escarpa frontal da PA; B- Patamar erosivo a leste do vale, C- Vale da Andorinha e o acúmulo de boulders produzidos *in situ*.

O levantamento de estruturas rúpteis revelou um total de 13.698 fraturas (Figura 7 A), distribuídas de forma multidirecional. O padrão preferencial dessas estruturas é dominado por uma moda N10W, com um total de 1287, enquanto modas secundárias como N50-60W e N60-70E, apresentam quantidades de 856 e 824, respectivamente. As estruturas a N10W correspondem principalmente a fraturas longas e bem pronunciadas (com média de comprimento de 17,9 m) em superfícies denudadas, que transpassam os patamares erosivos e adentram as áreas aplainadas. As demais estruturas são referentes a fraturas de menor extensão, muitas vezes ortogonais, que condicionam a morfologia de diversos *boulders* e *tors* no decorrer desses terrenos, principalmente nas vertentes.

Quanto à geometria dessas fraturas e suas condi-

ções genéticas, nota-se que as descontinuidades da moda N10W apresentam paralelismo rígido e baixa sinuosidade, característico de padrões de desenvolvimento primário em fase de resfriamento magmático (MIGOÑ, 2006). Em contrapartida, com raras exceções nas modas N50-60W e N60-70W, as demais estruturas apresentam características de desenvolvimento secundário como curvaturas mais acentuadas e baixa precisão ortogonal.

Avaliando a distribuição e o adensamento dessas estruturas (Figura 7 B), observa-se uma nítida distinção na concentração de fraturas nos compartimentos do relevo. As maiores taxas de densidade de fraturas são verificadas no Vale da Andorinha, com prolongadas estruturas que condicionam o escoamento superficial da área.

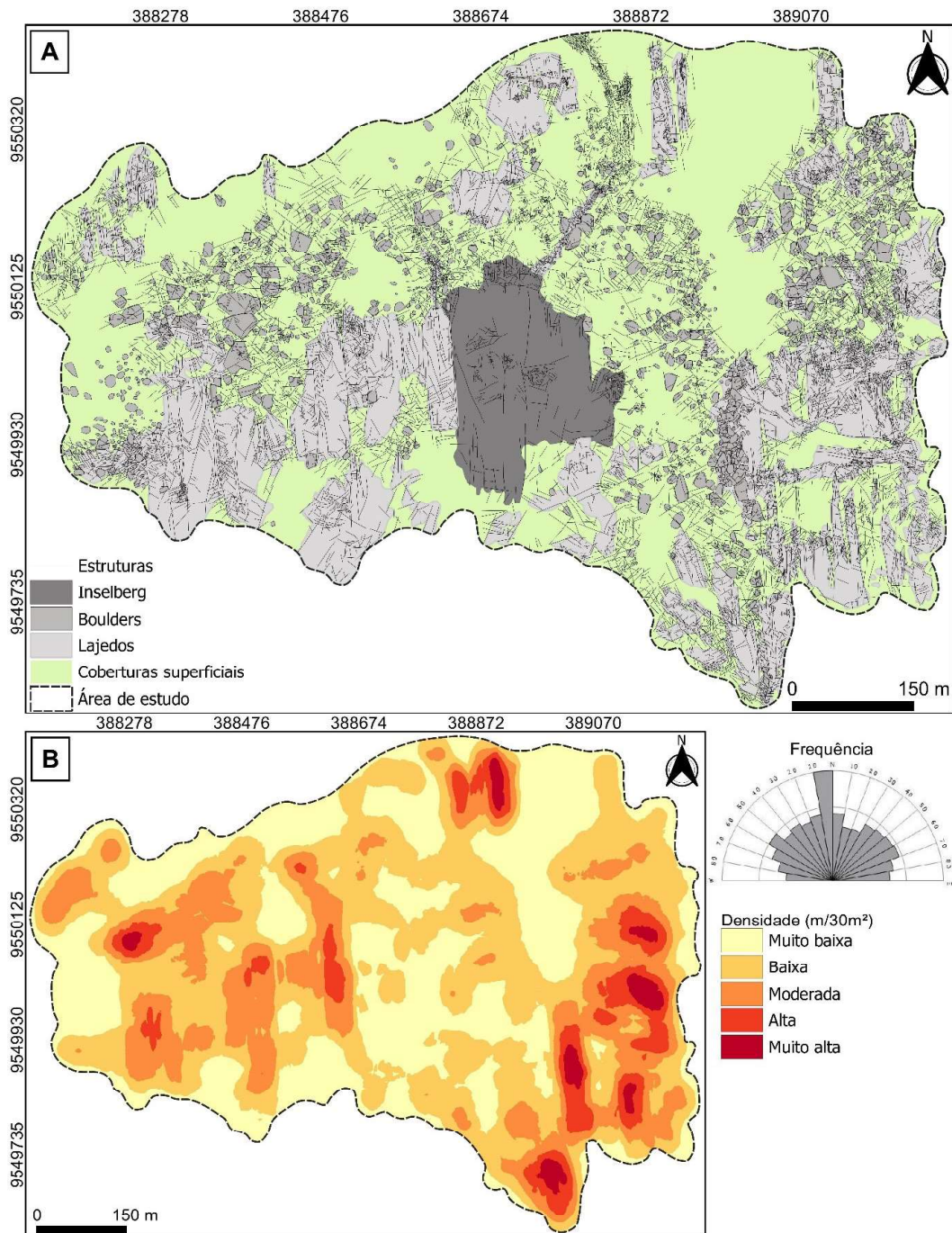


Figura 7 - Levantamento estrutural da Pedra da Andorinha. A- Mapa de fraturas e principais feições graníticas da área de estudo. B- Densidade de fraturas a partir da relação de comprimento por área (m/500m²).

Os patamares erosivos dispõem de densidades contrastantes, tendo em vista que a superfície a leste do Vale da Andorinha denota maiores concentrações de fraturas em relação ao patamar a oeste. Seus *pedmonts* também condizem com esse arranjo, com densidades moderadas a muito altas mais expressivas nas rampas a leste do vale. Vale ser ressaltado que as áreas de *ped-*

monts com densidades baixas no mapa, são oriundas da dificuldade, relatada anteriormente, para a identificação de fraturas nas imagens em função da cobertura vegetal. Contudo, a própria presença de horizontes intemperizados e coberturas vegetais mais densas, são indícios de altas densidades de fraturas (VIDAL ROMANÍ e TWIDALE, 2005).

O espaçamento entre as fraturas se dá de forma inversamente proporcional ao contexto topográfico analisado. Nas porções mais rebaixadas, o intervalo entre as fraturas é menor em comparação ao das áreas alçadas. Outro fator que impulsiona a diminuição na intercalação de fraturas é a geometria de propagação das mesmas, ao passo que fraturas curvilíneas denotam menor intercalação em oposição às fraturas retilíneas.

Em relação à abertura das fraturas, verifica-se que as estruturas de maior alargamento são encontradas nos patamares erosivos, preenchidas por material intemperizado. Seus interstícios possuem extensões com média de 5 a 7 m de abertura. Não foram encontrados em campo indícios de cinemática extensiva nessas fraturas, o que sugere um alargamento influenciado por intemperismo diferencial e erosão (Figura 8).

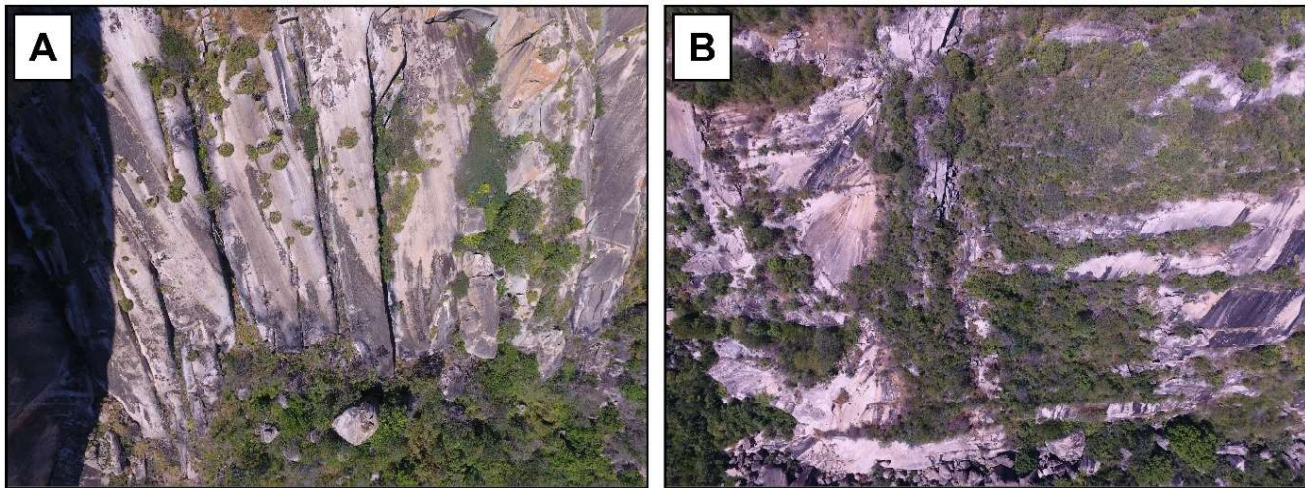


Figura 8 - Alargamento de fraturas nas imediações da PA. A- Fraturas que denotam aberturas de aproximadamente 2 m no patamar a oeste do Vale, B- Interstícios com 9 m de largura no patamar a leste do Vale (zonas preenchidas com vegetação).

O inselberg dispõe de uma densidade estrutural, em geral, muito baixa quando comparada com a área do entorno. As principais estruturas são vinculadas a caneluras na porção frontal da PA, todas com direcionamento N10W, além de uma junta de maior prolongamento que secciona o bloco principal. Como apontado anteriormente, juntas relacionadas a processos de esfoliação são verificadas em seu topo em menor expressão e extensão em relação ao contexto exposto.

5. Discussão

Elevadas concentrações de minerais félsicos atribuem aos granitóides maior resistência ao intemperismo (MIGÓN, 2006). Dessa forma, a composição mineral sienogranítica, com altos teores de k-feldspatos e quartzo (quase 70% da mineralogia), atribuiu maior resistência ao Granito Correntes frente aos processos intempéricos. Contudo, esse controle litológico, por si só, não explica o gradiente altimétrico diferenciado entre os patamares no entorno da PA, nem mesmo a posição anômala do inselberg em relação as vertentes

do Maciço Correntes.

Romer (2005) aponta que a composição e a textura mineral subordinam o estado de resistência dos relevos graníticos, porém, fatores como a densidade de fraturas facilmente sobrepõem-se como condicionantes morfogenéticos. Migoñ (2006) ressalta que a influência petrológica na diferenciação de feições em granitos é comprovadamente menor em relação às propriedades mecânicas relativas ao comportamento rúptil. Em outras palavras, a correlação da composição mineral e os processos exógenos auxiliam na compreensão evolutiva dos inselbergs, entretanto, a distribuição de fraturas denota maior impacto sobre sua morfologia.

Nesse âmbito, os dados indicam que o inselberg foi subordinado ao controle estrutural ocasionado pela variação na densidade de fraturamento. A fábrica e a textura mineral são responsáveis pelo comportamento litológico frente ao intemperismo; contudo, a disposição das estruturas conforma linhas de fraqueza que facilitam o progresso da meteorização e conseqüentemente, influenciam os processos de aplainamento.

Twidale (1982) aponta que os inselbergs advêm de compartimentos de baixa densidade de fraturas em relação às superfícies adjacentes. O acesso de água torna-se limitado nas porções menos fraturadas. O caso oposto ocorre nas parcelas com alta concentração de fraturas, onde o intemperismo é aprofundado (TWIDALE, 2002). Dessa forma, a diferenciação dessas feições será conformada pela distribuição das descontinuidades, que ocasionaram aumento do nível freático em parcelas específicas do granitoide em confinamento.

A gênese de estruturas rúpteis em rochas graníticas é amplamente relacionada a: (i) perturbações termais no alojamento/resfriamento magmático; (ii) arcabouço tectônico regional; (iii) termoclastia; (iv) alívio de pressão litostática (VIDAL ROMANÍ e TWIDALE, 2005). Os dois primeiros mecanismos (i e ii) são atribuídos a fraturas de origem primária, enquanto os dois últimos (iii e iv) são relativos a descontinuidades secundárias (MIGON, 2006). A geometria, a extensão e a precisão no espaçamento das estruturas denotam pontos de distinção entre as fraturas primárias e secundárias.

Segundo Weinberger *et al.* (2010), o padrão sistemático paralelo a subparalelo em estruturas rúpteis, com prolongamentos a cima de 10 m transpassando litologias sem relativo controle topográfico, indica uma formação primária. Pluijin e Marshak (2004) apontam que a distinção das mesmas é verificada em arranjos de espaçamento rígido e de prolongamento contínuo, ou seja, que configuram um padrão nitidamente ordenado. Em contrapartida, estruturas irregulares, com geometria curvilínea, curtos comprimentos, alta interconectividade e baixo espaçamento, são elencadas como fraturas de origem secundária (VIDAL ROMANÍ e TWIDALE, 2005). Essa última categoria ocorre em maior distribuição na borda de corpos graníticos, com feições em linhas radiais (SINGHAL e GHUPTA, 2010).

Dentro dessa proposta de classificação, o padrão predominante de estruturas (N10W) sugere uma ascensão primária, enquanto os demais arranjos condizem com conjuntos secundários (com predominância da esfoliação comandando a formação das rupturas auxiliares). O contexto morfotectônico regional fornece indícios para a interpretação do fraturamento primário, em função do contexto de gênese do Granito Correntes.

Twidale (1982) afirma que as massas graníticas que sofreram esforços compressivos ou extensivos em circunstâncias supracrustais, geram uma gama de juntas

ortogonais a romboedrais como resposta a perturbações tectônicas. Gerla (1988) aponta que esses campos de tensões tectônicas modificam as condições de temperatura e pressão dos magmas, originando juntas por contração durante o resfriamento. Além disso, Weinberger *et al.* (2010) sugerem que os esforços permanecem residuais, ou seja, com a mudança de um regime dúctil para um regime rúptil em exumação, juntas também serão propagadas por liberação de estresses confinados.

Vidal Romaní e Twidale (2005), relatam que a composição litológica dos granitos facilita a manutenção das tensões devido à baixa plasticidade de minerais como quartzo e feldspato, em geral, abundantes nessas litologias. Segundo Rodrigues e Maia (2019) os lineamentos morfoestruturais da região de Taperuba apresentam direções condicionadas pelos eixos de compressão envolvidos no alojamento dos granitóides sin à tarde-orogênicas do CTSQ. Assim, as propriedades mineralógicas do Granito Correntes, associadas ao sistema compressivo regional, contribuíram para a ampla distribuição de estruturas rúpteis primárias no entorno da PA.

Em adição, a proximidade com estruturas regionais pós-orogênicas também afeta o grau de deformação rúptil (TWIDALE, 2007). Em proximidade com Zonas de Cisalhamento transcorrentes, juntas são reaproveitadas por estresses tectônicos, gerando novas descontinuidades (GUDMUNDSSON, 2011). Tratando-se do contexto regional da Província Borborema, essas componentes cisalhantes propagaram estresses no decorrer do arco magmático CTSQ, influenciando as condições de adensamento estrutural expressas nessas litologias (CASTRO, 2004). Isso sugere que a deformação do Granito Correntes foi intensificada pela proximidade com as ZC, principalmente a Rio Groaíras, em suas imediações.

Condicionamento do Relevo

A densidade de fraturas, o gradiente de alteração e o conjunto de formas oriundas dos processos de intemperismo diferencial (Figura 9), sugerem que a PA evoluiu por meio de um duplo estágio de aplainamento. Segundo Migon (2006) caneluras, *tafonis*, *boulders*, bacias de dissolução e *tors* são formas frequentemente desenvolvidas em litologias granitóides, amplamente associadas a processos de intemperismo diferencial em subsuperfície e posterior exposição subaérea por processos erosivos.

Em pesquisas na região Nordeste, Maia e Nascimento (2018) identificaram diversos exemplares exumados dessas feições, modeladas em litologias granitóides a partir meteorização química epigênica ao longo de superfícies de descontinuidade (fraturas).

Contudo, o clima atual, tropical quente semiárido, não condiz com as formas provenientes de alteração química verificadas na PA e na região nordeste como um todo, sugerindo que a evolução desses terrenos recorre a contextos climáticos divergentes.



Figura 9 – Formas associadas ao intemperismo diferencial verificadas na área de estudo. A- boulders formados *in situ* no Vale da andorinha. B- Bacias de dissolução dispostas nos tafonis da escarpa frontal da PA.

Estudos paleoclimáticos do Cenozoico, no Nordeste, corroboram com a existência de climas mais úmidos que favoreceram os processos isovolumétricos. Lima (2008), a partir de datações $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ em óxidos de manganês ricos em K e U-Th/He em goethitas, traça um perfil flutuações climáticas do Oligoceno ao Plioceno na PB Setentrional, indicando diversos picos quentes e úmidos nesse intervalo de 33 a 3,6 M.a. Pesquisas palinológicas com foco em épocas mais recentes (a partir do Pleistoceno) propõem alterações climáticas bruscas, com fortes precipitações e maior concentração de umidade na região (OLIVEIRA *et al.*, 1999; BEHLING *et al.*, 2000). Assim, um quadro de flutuações climáticas durante o Cenozoico, justificaria a progressão do modelo de duplo estágio de aplainamento e, conseqüentemente, o gradiente de dissecação imposto na área.

Dessa forma, a densidade de fraturas primárias beneficiou a atuação do intemperismo químico, ao passo que esses compartimentos deformados denotaram mais planos de percolação, aumentando a permeabilidade do granitoide. Com a coesão litológica diminuída, os processos de decomposição mineral expressaram maior eficácia, aprofundando o front de alteração. O granitoide passou por intensas fases pedogenéticas,

manifestadas por condições climáticas úmidas associadas a momentos de estabilidade tectônica. Após esse estágio isovolumétrico, a exumação dos relevos basais foi impulsionada nas etapas de lavagem. As condições secas, intensificaram a ação do escoamento, alçando as feições saprolíticas e conseqüentemente e rebaixando o nível de base local (Figura 10).

Na fase isovolumétrica do aplainamento, o bloco que corresponde à PA sofreu menos efeitos do intemperismo epigênico pela baixa concentração de juntas. Dessa forma, o inselberg foi exumado como um núcleo de resistência aos processos químicos e mecânicos diferenciais. A denudação e o rebaixamento do nível de base influenciaram a preservação de sua morfologia em exposição a atmosfera.

Segundo Bremer (1993), rochas desnudas dificultam os processos intempéricos por impossibilitarem o acúmulo de umidade. Esse fato se relaciona a morfologia e o aspecto seco dessas rochas, propiciando o escoamento de água para porções adjacentes (BOURNE e TWIDALE, 1975). Assim, a PA foi alçada em detrimento ao seu entorno que denotava alta densidade de fraturas e maior constância do intemperismo químico devido ao escoamento de água nos seus escarpamentos íngremes.

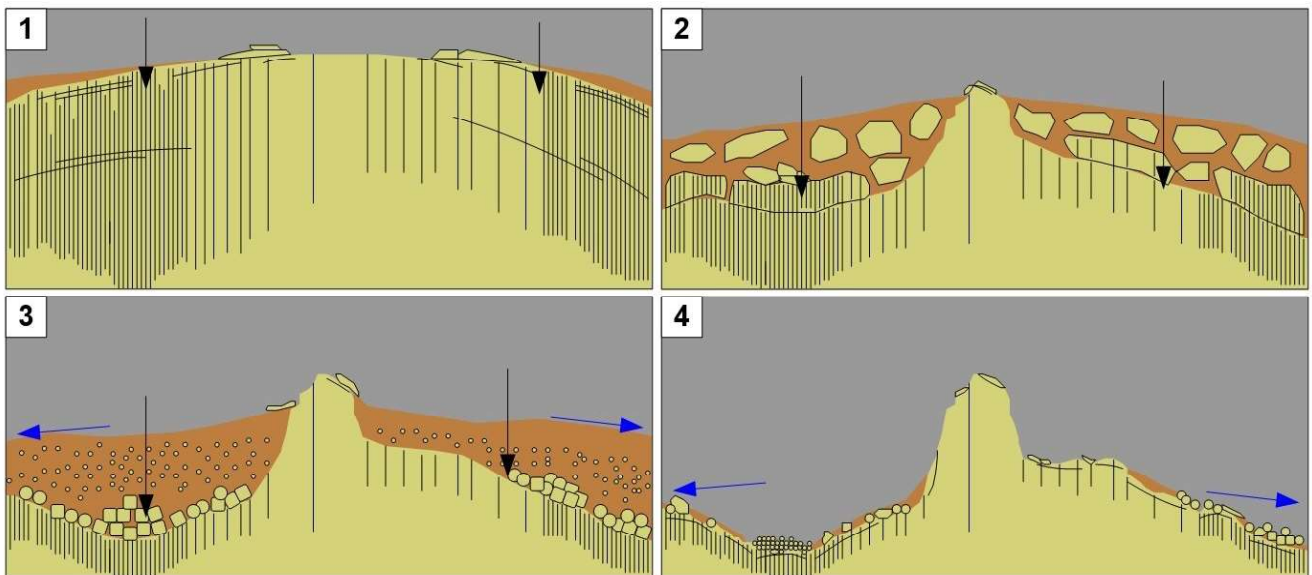


Figura 10 - Etapas evolutivas da PA. Em 1 e 2 processos de aprofundamento intempérico (setas pretas indicando a eluviação de água). Em 3 e 4 a erosão diferencial (setas azuis indicando erosão linear).

Comparando os patamares erosivos, percebe-se que o intemperismo diferencial atuou com maior intensidade no que se encontra a leste do vale, em função da maior quantidade de estruturas verificadas em sua superfície. A diferença altimétrica, as condições de denudação e a profundidade do manto intempérico em cada uma dessas superfícies torna, evidente o condicionamento imposto, ao passo que esse compartimento exibe maior concentração de feições saprolíticas em relação ao patamar a oeste do vale.

Apesar da manutenção do relevo principal, algumas das microformas frontais da PA são relacionadas a processos intempéricos em condições subaéreas. As caneluras marcadas na porção frontal do inselberg parecem ter sido promovidas pela ação intempérica nas juntas em condições subsuperficiais. Em contrapartida, a formação dos *tafonis* e marmitas está provavelmente subordinada ao mecanismo de esfoliação, decorrente da exumação desse relevo. Nessa lógica, as fraturas secundárias acima das cavidades foram percoladas por água.

A eluviação nessas discontinuidades propiciou condições favoráveis ao intemperismo diferencial. A desintegração granular promoveu o destacamento de blocos com faces alteradas, sendo colapsados por ação gravitacional devido à condição altimétrica do inselberg. Os novos desníveis implantados com o desenvolvimento dos *tafonis* permitiram acúmulo de umidade, concedendo meio favorável para a formação de feições côncavas

relacionadas ao ataque químico nos minerais, as marmitas. A morfologia dos *piedmonts* também dispõe de influência sobre maneira destas avenidas de fragilidade. A ampla concentração de *boulders* e a baixa declividade dessas rampas corroboram com as circunstâncias de extrema intemperização e elevada erosão promovidas.

A abertura do vale evoca um condicionamento promovido pela alta concentração de juntas nesse setor. Por consequência, a pressão hidrostática desenvolvida na base do nível freático dispunha de altas concentrações de planos de fraqueza, que beneficiaram o alargamento das fissuras e o aprofundamento de entalhe desse vale em função do desgaste da rocha fresca. Na seguinte fase de aplainamento, com a alteração nível de base pela ação erosiva, a aglomeração de *boulders*, encontrados nesse vale, foi exposta na superfície, resguardando a organização de sua trama estrutural, com blocos arranjados em sistemas ortogonais.

6. Conclusões

O conjunto de informações sugerem que o inselberg teve sua evolução através de uma associação de processos de aplainamento condicionados pelas características litoestruturais e pelas variações climáticas. A partir da situação de meteorização e a distribuição espacial da morfologia local, percebeu-se que a trama estrutural subordinou a intensificação do intemperismo diferencial em situações de maior umidade. Dessa ma-

neira, o fraturamento predispos avenidas de percolação, enquanto a fábrica composicional permitiu a alteração mineral em função da presença de constituintes de baixa resistência ao intemperismo diferencial como os plagioclásios e a biotita. Portanto, a gênese da Pedra da Andorinha foi controlada pela baixa concentração de juntas, diferente de suas áreas circunvizinhas.

A moda N10W predominante, correspondente a um *set* de juntas primárias, foi o principal conduto de alteração, sendo explorado pelo intemperismo químico e pela erosão diferencial. Além disso, o contexto sin-orogênico do granitoide Correntes sugere que esforços tectônicos ocasionaram o adensamento estrutural em virtude da baixa capacidade de distribuição de estresses. Por estar inserido em contexto de deformação antigo (neoproterozóico), o fraturamento foi acentuado, acelerando o processo de meteorização epigênica. Em adição a esse quadro estrutural, a exumação de feições saprolíticas de menor amplitude foi favorecida pelo arranjo de fraturas, com *boulders* e *tors* em maior constância nas porções mais rebaixadas do terreno.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), pelo financiamento a pesquisa e a Autarquia Municipal de Meio Ambiente de Sobral (AMMA), especificamente ao gestor da Unidade de Conservação Refúgio da Vida Silvestre Pedra da Andorinha, Francisco Ávila Mendes, e ao zelador da mesma, “Réi Zé”, pelo acolhimento e suporte em campo na localidade de Taperuaba.

Referências Bibliográficas

ARAÚJO, C. E. G. de; WEINBERG, R. F.; CORDANI, U. G. Extruding the Borborema Province (NE-Brazil): a two-stage Neoproterozoic collision process. **Terra Nova**, v. 26, n. 2, p. 157-168, 2014. DOI: 10.1111/ter.12084

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

BOURNE, J. A.; TWIDALE, C. R. Episodic exposure of inselbergs. **Geological Society of America Bulletin**, v. 86, n. 1,

p. 473-1481, 1975. DOI: 10.1130/0016-7606(1975)86<1473:EEOI>2.0.CO;2

BREMER, H. Etchplanation, review and comments of Budel's model. **Zeitschrift für Geomorphologie**, v. 92, n. 2, p. 189-200, 1993.

BÜDEL, J. Die “Doppelten Einebnungsflächen” in den feuchten Tropen. **Geomorphology**, v. 1, n. 1, p. 201-228, 1957.

CASTRO, N.A. **Evolução geológica proterozóica da região entre Madalena e Taperuaba, domínio tectônico Ceará Central (Província Borborema)**. Tese (Doutorado em Geociências), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2004. 221 p.

CASTRO, N. A.; OSAKO, L. S.; SIMÕES, L. Folha SB.24-V-B-II Taperuaba. Fortaleza: CPRM, 2014. Mapa color., 69cm x 98cm. Mapa geológico. Escala 1:100.000. **Programa Geologia do Brasil – PGB**.

DAUTEUIL, O.; BESSIN, P.; GUILLOCHEAU, F. Topographic growth around the Orange River valley, southern Africa: A Cenozoic record of crustal deformation and climatic change. **Geomorphology**, v. 233, n. 1, p. 5-19, 2015. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.11.017

DECKER, J. E.; NIEDERMANN, S.; WIT, M. J. De. Climatically influenced denudation rates of the southern African plateau: Clues to solving a geomorphic paradox. **Geomorphology**, v. 190, n. 1, p. 48-60, 2013. DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.02.007

EBERT, K.; HÄTTESTRAND, C.; HALL, A. M.; ALM, G. DEM identification of macroscale stepped relief in arctic northern Sweden. **Geomorphology**, v. 132, n. 3, p. 339-350, 2011. DOI: doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.05.021

ERICSON, K.; MIGOÑ, P.; OLVMO, M. Fractures and drainage in the granite mountainous area: A study from Sierra Nevada, USA. **Geomorphology**, v. 64, n. 1, 2005, p. 97-116, 2005. DOI: doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.06.003

FETTER, A. H., SANTOS, T. J. S., VAN SCHUMUS, W. R., HACKSPACHER, P. C., BRITO NEVES, B. B., ARTHAUD, M. H., NOGUEIRA NETO, J. A., WERNICK, E. Evidence for Neoproterozoic continental arc magmatism in the Santa Quitéria Batholith of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the assembly of west Gondwana. **Gondwana Research**, v. 2n. 6, p. 265-273, 2003. DOI: 10.1016/S1342-937X(05)70975-8

GERLA, P. J. Stress and fracture evolution in a cooling pluton: An example from the Diamond Joe stock, western Arizona, U.S.A. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v.

- 34, n. 3, p. 267-282, 1988. DOI: 10.1016/0377-0273(88)90038-8
- GOMES, I. P. **Caracterização petrográfica e petroquímica dos granitos tardi e póstectônicos da região de Santa Quitéria-Ceará, Brasil.** Dissertação (Mestrado em Geologia). Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2006. 219 p.
- GUDMUNDSSON, A. **Rock Fractures in Geological Processes.** First ed., Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 356p.
- LIMA, M. D. G. **A História do Intemperismo na Província Borborema Oriental, Nordeste do Brasil: Implicações Paleoclimáticas e Tectônicas.** Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica). Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2008. 594 f.
- LIMA G.M.P., CORRÊA-GOMES L.C. (2015). Itatim Geomorphological Site: Largest Concentration of Inselbergs in Brazil. In: VIEIRA, B. C.; SALGADO A. A. R.; SANTOS L. J. C.; PAISANI, J. C. (eds.) **Landscapes and Landforms of Brazil. World Geomorphological Landscapes.** Springer, Dordrecht: p. 371-380.
- MAIA, R. P.; NASCIMENTO, M.A.L.; BEZERRA, F. H. R.; CASTRO, H.S.; MEIRELES, A.J.A.; ROTHIS, L.M. Geomorfologia do campo de inselbergues de Quixadá – NE do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 16, 2015. DOI: 10.20502/rbg.v16i2.651
- MAIA, R. P.; NASCIMENTO, M. A. L. Relevos Graníticos do Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 19, 2018. DOI: 10.20502/rbg.v19i2.1295
- MATMON, A.; MUSHKIN, Y.; ENZEL, T.; GRODEK, A.; ASTER, T. Erosion of a granite inselberg, Gross Spitzkoppe, Namib Desert. **Geomorphology**, v. 201, n. 1, p. 52-59, 2013. DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.06.005
- MATMON, A.; ENZEL, Y.; VAINER, S.; GRODEK, T.; MUSHKIN, A. The near steady state landscape of western Namibia. **Geomorphology**, v. 313, n. 2, p. 72-87, 2018. DOI: 10.1016/j.geomorph.2018.04.008
- MIGÓN, P. The geological control, origin and significance of inselbergs in the Sudetes, NE Bohemian Massif, central Europe. **Zeitschrift für Geomorphologie**, v. 41, n. 2, p. 45 –66, 1997.
- MIGÓN, P. **Granite Landscapes of the World.** First ed. England: Oxford University Press, 2006. 416 p.
- MILLOT, G. Géochimie de la surface et formes du relief. **Société Géologie Bulletin**, Paris, v. 30, n. 4, p. D229-D233, 1977.
- OLIVEIRA, P. E. D.; BARRETO, A. M. F.; SUGUIO, K. Late Pleistocene/Holocene climatic and vegetational history of the Brazilian caatinga: the fossil dunes of the middle São Francisco River. **Palaeogeography, Palaeoclimatology e Palaeoecology**, v. 152, n. 3, p. 319-337, 1999. DOI: 10.1016/S0031-0182(99)00061-9
- PLUIJM, V. D. B. A.; MARSHAK, S. **Earth Structure.** Second ed. London: Norton Publ. House, 2004. 432 p.
- RODRIGUES, W. F.; MAIA, R. P. Condicionamento morfoestrutural dos relevos no entorno do Distrito de Tapera, Sertão Central do Ceará, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, n. 20, v. 1, 2019. DOI: 10.20502/rbg.v20i1.1335
- RÖMER, W. The distribution of inselbergs and their relationship to geomorphological, structural and lithological controls in Southern Zimbabwe. **Geomorphology**, v. 72, n. 1, p. 156 -176, 2005. DOI: 10.1016/j.geomorph.2005.05.008
- RÖMER, W. Differential weathering and erosion in an inselberg landscape in Southern Zimbabwe: A morphometric study and some notes on factors influencing the long-term development of inselbergs. **Geomorphology**, v. 86, n. 3, p. 349-368, 2007. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.09.008
- RÖMER, W. Multiple planation surfaces in basement regions: Implications for the reconstruction of periods of denudation and uplift in southern Zimbabwe, **Geomorphology**, v. 114, n. 3, p.199-212, 2010. DOI: 10.1016/j.geomorph.2009.07.001
- SIMON-COINÇON, R.; THIRY, M.; SCHMITT, J. M. Variety and relationships of weathering features along the early Tertiary palaeosurface in the southwestern French Massif Central and the nearby Aquitaine Basin. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 129, n. 1, p. 51–79, 1997. DOI: 10.1016/S0031-0182(96)00122-8
- SINGHAL, B.; GUPTA, R. **Applied Hydrogeology of Fractured Rocks.** First ed. Holanda: Springer, 2010. 432p.
- THOMAS, M. **Geomorphology in the tropics. A Study of Weathering and Denudation in Low Latitudes.** Chichester: John Wiley and Sons Ltd., 1994. 460 pp.
- TORRES, P. F. M.; CAVALCANTE J. C.; PALHETA E. S. M.; VASCONCELOS A. M.; OLIVEIRA F.V. Mapa Geológico da Folha Quixadá, 1:250.000. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos.** CPRM. 2007.
- TWIDALE, C. R. **Granite Landforms.** First ed. Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 1982. 396 p.
- TWIDALE, C. R. The two-stage concept landform and landscape development involving etching: origin, development and

implications of an idea. **Earth Science**, v. 57, n. 1, p. 25-42, 2002. DOI: 10.1016/S0012-8252(01)00059-9

TWIDALE, C. R., Bornhardts and associated Fracture Patterns. **Revista de la Asociacion Geologica Argentina**, v. 62, n. 1, p. 139-153, 2007. ISSN: 0004-4822

VIDAL ROMANÍ J. R., TWIDALE C. R. **Formas y paisajes graníticos**. First ed. Coruña: Universidade de Coruña. 1998. 283p.

VIDAL ROMANÍ, J. R.; TWIDALE, C. R. **Landforms and geology of granite terrains**. London: Taylor and Francis. 2005. 351p.

WEINBERGER, R. F.; EYAL, Y.; MORTIMER, N. Formation of systematic joints in metamorphic rocks due to release of residual elastic strain energy, Otago Schist, New Zealand, **Journal of Structural Geology**, v. 32, n. 3, p. 288-305, 2010. DOI: 10.1016/j.jsg.2009.12.003

ZINCONI, S. **Petrogênese do Batólito Santa Quitéria: implicações ao magmatismo brasileiro na porção norte da Província Borborema, NE do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Geociências). Instituto de Geociências, Unicamp, Campinas. 2011. 192 p.