



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA TERRA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

FELIPE RODRIGUES WALDHERR

**OS TANQUES NATURAIS DE ITAPIPOCA - UMA CONTRIBUIÇÃO AOS
ESTUDOS SOBRE AS FORMAS MENORES DO RELEVO GRANÍTICO NO
SEMIÁRIDO CEARENSE**

Rio de Janeiro

2023

FELIPE RODRIGUES WALDHERR

**OS TANQUES NATURAIS DE ITAPIPOCA - UMA CONTRIBUIÇÃO AOS
ESTUDOS SOBRE AS FORMAS MENORES DO RELEVO GRANÍTICO NO
SEMIÁRIDO CEARENSE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia do Departamento de Geografia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro como requisito para a obtenção do título de doutor em Geografia

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Telma Mendes da Silva.

Coorientador: Prof. Dr. Celso Lira Ximenes.

Rio de Janeiro

2023

CIP - Catalogação na Publicação

W163t Waldherr, Felipe Rodrigues
Os tanques naturais de Itapipoca - uma
contribuição aos estudos sobre as formas menores do
relevo granítico no semiárido cearense / Felipe
Rodrigues Waldherr. -- Rio de Janeiro, 2023.
413 f.

Orientadora: Telma Mendes da Silva.
Coorientador: Celso Lira Ximenes.
Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio
de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de
Pós-Graduação em Geografia, 2023.

1. Tanques naturais. 2. Relevo granítico. 3.
Semiárido nordestino. 4. Dinâmica da paisagem. 5.
Cenozoico. I. Silva, Telma Mendes da, orient. II.
Ximenes, Celso Lira, coorient. III. Título.

FELIPE RODRIGUES WALDHERR

OS TANQUES NATURAIS DE ITAPIPOCA - UMA CONTRIBUIÇÃO AOS ESTUDOS SOBRE AS FORMAS MENORES DO RELEVO GRANÍTICO NO SEMIÁRIDO CEARENSE

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia do Departamento de Geografia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro como requisito para a obtenção do título de doutor em Geografia.

Aprovada em: 10/03/2023.

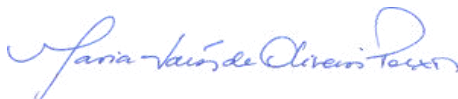
BANCA EXAMINADORA



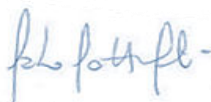
Prof.^a Dr.^a Telma Mendes da Silva (Orientadora)
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)



Prof. Dr. Celso Lira Ximenes (Coorientador)
Museu de Pré-história de Itaipoca (MUPHI)



Prof.^a Dr.^a Maria Naíse Oliveira Peixoto
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)



Prof. Dr. Marcelo Motta de Freitas
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)



Prof. Dr. Antônio Carlos de Barros Corrêa
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)



Prof. Dr. Hermínio Ismael de Araújo-Júnior
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

Aos meus pais, Maria de Nazaré Silva Rodrigues e Helmut Waldherr.

Ao meu irmão, André Rodrigues Waldherr.

À minha companheira, Lidiane de Asevedo Silva.

À toda minha família e amigos.

Em memória de Maria do Carmo e Francisco de Arruda Júnior. Muita luz e amor.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGG-UFRJ) pelo apoio financeiro que permitiu a realização de trabalhos de campo durante a fase inicial do doutorado (2019 - 2020) no município de Itapipoca, estado do Ceará; e à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pela Bolsa Doutorado Nota 10 que viabilizou a continuidade das campanhas de campo e condições estáveis para o desenvolvimento da pesquisa.

À Prof.^a Dr.^a Telma Mendes da Silva, minha orientadora, pelo afincamento no que se refere a dedicação prestada durante a elaboração da tese de doutorado, sempre disponível ao diálogo e esclarecimento de questões pertinentes ao encaminhamento da pesquisa, e ao meu coorientador, o Prof. Dr. Celso Lira Ximenes, pelo debate de ideias em campo e por ampliar o horizonte de estudo ao expor a importância geocientífica dos tanques naturais do Vale da Megafauna Pré-histórica de Itapipoca.

À equipe da Secretaria de Cultura da Prefeitura Municipal de Itapipoca e ao Museu de Pré-história de Itapipoca pelo apoio logístico e na divulgação científica de resultados da presente tese, em especial aos secretários - Sr. Ângelo Marcio Leal Martins, Sr. Jose Viana Lavor Júnior e ao Sr. Fábio Pires da Costa. À diretora do Museu de Pré-história de Itapipoca, Prof.^a Eveline Sonielle Sampaio Avelino, por todo o apoio na Cidade dos Três Climas.

À Prof.^{ta} Dr.^a Maria Naíse de Oliveira Peixoto e ao Prof. Dr. Antônio Carlos de Barros Corrêa pelas críticas e comentários no Exame de Qualificação os quais permitiram o aprimoramento da presente tese do doutorado. À Prof.^{ta} Dr.^a Monica dos Santos Marçal pelo apoio incondicional durante o doutorado e o aceite em assumir a suplência da banca.

Ao Prof. Dr. Hermínio Ismael de Araújo-Júnior, por me apresentar à Paleontologia do Quaternário e aos tanques naturais do semiárido brasileiro. Ao Prof. Dr. Sérgio Wilians de Oliveira Rodrigues, por todo o auxílio na confecção dos mapas temáticos e na interpretação de dados gerados em ambiente GIS. Ao Prof. Dr. Miguel Tupinambá, pelos comentários e observações em relação ao desenvolvimento de tanques naturais em terrenos granítico-gnáissicos. Ao Prof. Dr. Renato Rodriguez Cabral Ramos, pela cuidadosa revisão de dados de campo e apontamentos em relação ao contexto de sedimentação do depósito de tanque no Sítio Paleontológico Jirau. Ao Prof. Dr. Marcelo Motta de Freitas, por auxiliar na elaboração dos esquemas em nanquim (bloco-diagrama) e no diálogo sobre a dinâmica das paisagens no semiárido. Ao Prof. Dr. Juan Ramón Vidal-Romaní, pela análise crítica nos trabalhos referentes ao desenvolvimento das formas do relevo granítico durante o doutorado.

Ao Sr. Raimundo de Andrade e a Dona Maria Meires de Andrade; ao Sr. Marcelo Freitas e Dona Maria Aparecida de Souza; e, por fim, ao Sr. Fernando Diógenes e familiares - Agradeço a todos pela gentil receptividade e apoio nas investigações científicas em Itapipoca. Aos amigos geógrafos, Ricardo Matos Machado e Henrique Sampaio de Castro, pelo companheirismo e apoio logístico em campo. A todos os amigos e colegas de turma de doutorado, em especial a Hélen Barcellos, Larissa Lima, André Pelech, Vandrê Viegas, Amaral Raimundo, Thiago Leal, Juliana Cabral Sessa e Felipe Pacheco pelo tempo de convívio e as prolíferas discussões durante o programa de doutorado.

Gostaria de agradecer à equipe da Biblioteca Maurício de Almeida Abreu do Programa de Pós-graduação em Geografia e da Biblioteca Central do CCMN da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ); e à equipe da Biblioteca do Centro de Tecnologia e Ciência (CTC/C) e do Núcleo de Memória, Informação e Documentação (MID) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) pelo auxílio na pesquisa documental e disponibilização das obras utilizadas.

"We decipher the Earth's diary that has been left us as a legacy. We read with trained senses and interpret with the tool of disciplined thinking. We translate the earth's language into our own, and enrich the already bright and colorful surface of the present with the knowledge of the inexhaustible abundance of the past."

"The Earth is large and old enough to teach us modesty."

Hans Cloos, 1953

RESUMO

Waldherr, Felipe Rodrigues. **Os tanques naturais de Itapipoca - uma contribuição aos estudos sobre as formas menores do relevo granítico no semiárido cearense**. Rio de Janeiro, 2023. Tese (Doutorado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2023.

Os tanques naturais integram um importante conjunto de formas menores do relevo granítico que ocorrem em afloramentos rochosos no município de Itapipoca, estado do Ceará. Na paisagem interiorana de Itapipoca, os tanques encontram-se amplamente distribuídos no chamado Vale da Megafauna Pré-histórica, uma área topograficamente inferior localizada entre os tabuleiros da Formação Barreiras, ao norte, e o Maciço de Uruburetama, ao sul. Os tanques apresentam uma ampla diversidade de formas e tamanhos, sendo observados principalmente sobre lajedos e em domos graníticos. Nos últimos anos, os tanques naturais de maiores dimensões têm atraído a atenção de pesquisadores em razão da sua morfologia e, sobretudo, no que se refere ao aporte sedimentar no interior das depressões. Ocasionalmente, o depósito de tanque é conformado por camadas fossilíferas. Nesse contexto, os estudos relacionados a origem e desenvolvimento dos tanques naturais de Itapipoca se tornam de ampla relevância, uma vez que os aspectos morfológicos do interior da depressão e as formas de relevo que abrangem o entorno do tanque fornecem indícios de uma complexa sequência evolutiva. Na presente pesquisa, foram selecionados o total de três tanques naturais fossilíferos de referência para investigação, a saber: Jirau 01, Criminoso e João Cativo 02, em diferentes sítios paleontológicos. O levantamento sistemático de dados em campo, junto a análise de imagens *raster* de alta resolução obtidas por sobrevoo de drone, permitiram visualizar o amplo controle litológico e estrutural no desenvolvimento das depressões naturais. Do mesmo modo que o conjunto de evidências morfológicas de condições mais úmidas, notabilizadas na distribuição de formas de dissolução nos sítios paleontológicos, viabilizou a aplicação do conceito de duplo estágio de aplainamento ou teoria de *etchplanação* para a formação dos tanques de maiores dimensões. É possível sugerir que ao longo do tempo geológico, o aprofundamento da frente de intemperismo sobre as zonas de debilidade do embasamento granítico, junto ao reafeiçoamento das formas de relevo em subsuperfície, corresponda a fatores importantes na gênese dos tanques naturais. Ao contrário da necessidade de a superfície estar exposta para iniciar a formação da cavidade, o tanque natural pode ter sua origem e desenvolvimento associado ao ambiente subedáfico, sob a influência da dinâmica dos paleomantos regolíticos. O levantamento em detalhe de aspectos morfológicos, morfométricos e o tipo de fundo das depressões naturais possibilitou igualmente a elaboração de um quadro de classificação dos tanques naturais no município de Itapipoca, no semiárido cearense.

Palavras-chave: Tanques naturais; Formas menores; Relevo granítico; Semiárido nordestino; Cenozoico.

ABSTRACT

Waldherr, Felipe Rodrigues. **The natural tanks of Itapipoca - a contribution to studies on the minor forms of granite landscape in the semi-arid region of Ceará.** Rio de Janeiro, 2023. Thesis (Doctorate in Geography) - Doctorate program in Geography, Federal University of Rio de Janeiro, 2023.

The natural tanks are part of an important set of smaller forms of granite relief that occur in rocky outcrops in the municipality of Itapipoca, state of Ceará. In the interior landscape of Itapipoca, the tanks are distributed in the so-called Valley of the Prehistorical Megafauna, consisting of a topographically inferior zone between the Barreiras Formation plateaus, to the north, and the Uruburetama Massif, to the south. The tanks have a wide variety of shapes and sizes, being observed mainly in granite slabs or plateaus (lajedos) and domes. In recent years, larger natural tanks have attracted the attention of researchers because of their morphology and, above all, with regard to the sedimentary input that, sometimes, are formed by fossiliferous layers inside the depressions. In this context, studies related to the origin and development of the Itapipoca natural tanks become of wide relevance, since the morphological aspects of the interior of the depression and the landforms that encompass the surroundings of the pond provide evidence of a complex evolutionary sequence. In the present research, a total of three natural fossiliferous reference tanks for investigation were selected, namely: Jirau 01, Criminoso and João Cativo 02, in different paleontological sites. The systematic survey of data in the field, together with the analysis of high-resolution raster images obtained by drone overflight, allowed the visualization of the broad lithological and structural control in the development of natural depressions. In the same way that the set of morphological evidences of more humid conditions, noted in the distribution of forms of dissolution in the paleontological sites, made possible the application of the concept of double stage of flattening or theory of ecthplanation for the formation of larger tanks. It is possible to suggest that over geological time, the deepening of the weathering front on the weak zones of the granite basement, together with the re-enhancing of subsurface relief forms, corresponds to important factors in the genesis of natural tanks. Unlike the need for the surface to be exposed to initiate the formation of the cavity, the natural tank may have its origin and development associated with the subedaphic environment, under the influence of the dynamics of the regolith paleomantles. The detailed survey of morphological and morphometric aspects and the type of bottom of the natural depressions also made it possible to draw up a classification for natural tanks in the municipality of Itapipoca, in the semi-arid region of Ceará

Keywords: Natural tanks; Minor forms; Granite relief; northeastern semi-arid; Cenozoic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Registro de tanque natural em lajedo granítico no semiárido brasileiro, município de Itapipoca (CE).....	27
Figura 2 - A distribuição geográfica dos tanques naturais junto aos depósitos de tanque no semiárido brasileiro	29
Figura 3 - Tanques naturais no Sítio Paleontológico Lajinhas, município de Itapipoca (CE)	31
Figura 4 - Sítios paleontológicos com ocorrência de tanques naturais fossilíferos no município de Itapipoca (CE).....	33
Figura 5 - Tanques naturais fossilíferos de grandes dimensões no Sítio Paleontológico João Cativo, município de Itapipoca (CE)	34
Figura 6 - Mapa de localização das principais vias de acesso aos três sítios paleontológicos de referência (Jirau, Lajinhas e João Cativo) no município de Itapipoca, estado do Ceará.....	41
Figura 7 - Mapa tectônico regional simplificado com as subdivisões da Província Borborema	43
Figura 8 - A Província Borborema Setentrional.....	45
Figura 9 - Mapeamento geológico e a distribuição dos sítios paleontológicos com ocorrência de tanques naturais fossilíferos.....	50
Figura 10 - Localização, limites e arcabouço estrutural da Bacia do Ceará e Sub-bacia do Mundaú.....	52
Figura 11 - Seção esquemática da Sub-bacia do Mundaú, na Bacia do Ceará.....	52
Figura 12 - Carta cronoestratigráfica da Sub-bacia do Mundaú, na Bacia do Ceará. A Formação Tibau corresponde a um importante período durante o Eoceno a partir da denudação em áreas continentais.....	54
Figura 13 - Diagrama de isolinhas de foliação Sn preservada (a) e atitudes de lineação (Lx) para o domínio a leste da Zona de Cisalhamento Forquilha	56
Figura 14 - Representação esquemática da evolução tectônica na Folha Itapipoca.....	58
Figura 15 - Proposta de classificação geomorfológica para o Nordeste Setentrional ...	60
Figura 16 - Representações de mapas paleogeográficos	63
Figura 17 - Representações de mapas paleogeográficos	64
Figura 18 - Representações de mapas paleogeográficos	64

Figura 19 - Intrusões de magma granítico na rocha metamórfica encaixante e a atuação da erosão diferencial.....	65
Figura 20 - Esquete bloco-diagrama do Nordeste brasileiro.....	67
Figura 21 - Primeira página do relatório remetido por João Batista de Montaury a Martinho de Mello e Castro em 25 de outubro de 1784.....	78
Figura 22 - Ilustração realizada a partir do nível de cimeira do Morro do Caldeirão-Assú com a ocorrência de uma enorme cavidade natural.....	81
Figura 23 - Ilustração expondo a distribuição e disposição geral dos caldeirões nas superfícies rochosas em Quixadá, no estado do Ceará.....	83
Figura 24 - Mapa de localização dos tanques fossilíferos na área de Lágua Formosa II, no estado do Rio Grande do Norte.	85
Figura 25 - Os principais representantes da megafauna pré-histórica do Nordeste do Brasil durante o Quaternário.....	92
Figura 26 - Trabalho de coleta de fósseis em depósitos de tanque no Sítio Paleontológico Jirau - município de Itapipoca (CE).	93
Figura 27 - Atividade de escavação e coleta de fósseis em depósito de tanque no Sítio Paleontológico Jirau, município de Itapipoca (CE).....	94
Figura 28 - Esboço elaborado pelo médico e naturalista Francisco Freire Alemão da "Pedra do Frade", localizada no Maciço de Uruburetama, durante o trabalho da Comissão Científica de Exploração no Nordeste do Brasil no ano de 1860.....	99
Figura 29 - Diagrama das relações entre regolito, frente de intemperismo e formas etch ou de corrosão química.....	102
Figura 30 - Etapas de desenvolvimento do relevo saprolítico.....	103
Figura 31 - Etapa evolutiva da Pedra da Andorinha, no distrito de Taparuaba.....	110
Figura 32 - Pedra da Andorinha, distrito de Taparuaba, no município de Sobral.....	111
Figura 33 - Vertente dissecada úmida do Maciço de Uruburetama e a superfície aplainada que compreende a Superfície Sertaneja 1.....	112
Figura 34 - Diagrama de fraturas de Hans Cloos em um batólito.....	113
Figura 35 - Evolução esquemática da relação entre erosão diferencial e exumação de batólitos.	114
Figura 36 - Registro da superfície picoteada no interior de um tanque natural localizado no Sítio Paleontológico João Cativo.....	116

Figura 37 - Registro do interior do Tanque Natural Criminoso, localizado no Sítio Paleontológico Lajinhas	117
Figura 38 - Evolução do flared slope por intemperismo na base da escarpa e erosão subsequente.....	122
Figura 39 - Processo de migração e concentração de cargas. É possível visualizar o desenvolvimento do regolito entre os diferentes planos de descontinuidade.....	124
Figura 40 - Esquete da zona deformada internamente sob a concentração de tensões.	125
Figura 41 - Evolução esquemática do tanque natural e tafone.....	126
Figura 42 - Relação entre as descontinuidades, alteração e as formas menores do relevo granítico.....	126
Figura 43 - Esquema de processo de concentração de cargas em pontos definidos a partir do contato entre as lascas de descamação ou sheet structure (A), formação de espaços lacunares (B) e a definição dos tafoni ou tanques naturais.	127
Figura 44 - Disposição de feições erosivas fluviais sobre o leito rochoso no Rio Paraíba do Sul, no Rio de Janeiro.....	133
Figura 45 - Ocorrência de marmitas sobre o leito rochoso no Rio Ingá, no município de Ingá - PB.....	134
Figura 46 - A sazonalidade climática propicia oscilações do nível de água no interior dos tanques naturais durante o ano.....	137
Figura 47 - Coleta de amostras em depósitos de tanque realizada a partir da utilização do Testemunhador Rotativo Portátil (TRB) no Sítio Paleontológico João Cativo.....	140
Figura 48 - Análise estratigráfica e coleta de amostras em depósito de tanque no Sítio Paleontológico Jirau	140
Figura 49 - Visualização geral dos polígonos na área do Sítio Paleontológico do Jirau. Os polígonos foram gerados no Programa Google Earth Pro e utilizados no trajeto de sobrevoo do drone.	142
Figura 50 - Visualização geral dos polígonos na área do Sítio Paleontológico de Lajinhas (Lajinhas 01, 02 e 03).....	142
Figura 51 - Visualização geral dos polígonos na área do Sítio Paleontológico de João Cativo (João Cativo 01 e 02).....	143
Figura 52 - Uma série de sobrevoos foram realizados através de RPA sobre os tanques naturais fossilíferos no município de Itapipoca (CE).....	144

Figura 53 - Visualização das seções Jirau 01, 02, 03 e 04 na área do Sítio Paleontológico Jirau	145
Figura 54 - Visualização da fotografia em alta resolução e do MDE sobre as seções Jirau 01 e 02 no Sítio Paleontológico Jirau.	146
Figura 55 - Visualização da fotografia em alta resolução sobre as seções Jirau 03 e 04 no Sítio Paleontológico Jirau.....	147
Figura 56 - Visualização da fotografia em alta resolução sobre as seções Lajinhas 01, 02 e 03 no Sítio Paleontológico Lajinhas.	148
Figura 57 - Visualização do MDE gerado sobre as seções Lajinhas 01, 02 e 03 no Sítio Paleontológico Lajinhas.	149
Figura 58 - Visualização da fotografia em alta resolução sobre a seção João Cativo 01 no Sítio Paleontológico João Cativo.....	150
Figura 59 - Visualização do MDE sobre a seção João Cativo 01 no Sítio Paleontológico João Cativo.	150
Figura 60 - Visualização da fotografia em alta resolução sobre a seção João Cativo 02 no Sítio Paleontológico João Cativo.....	151
Figura 61 - Visualização do MDE sobre a seção João Cativo 02 no Sítio Paleontológico João Cativo.	151
Figura 62 - Proposta de classificação para as formas menores do relevo granítico do Sistema Central Espanhol.....	154
Figura 63 - Parâmetros fundamentais para mensuração de cavidades que podem ser aplicados aos tanques naturais brasileiros	155
Figura 64 - Exemplo de tanque natural com tipo de fundo côncavo.....	157
Figura 65 - Exemplo de tanque natural com tipo de fundo plano.	158
Figura 66 - Conjunto de tanques naturais com tipo de fundo plano.....	158
Figura 67 - Exemplo de tanque natural com fundo em forma de "poltrona"	159
Figura 68 - Exemplo de tanques naturais com fundo em forma de cunha..	160
Figura 69 - Registro fotográfico do tanque natural Jirau 01 realizado durante a Expedição João Cativo em janeiro de 1961..	161
Figura 70 - Registro fotográfico da primeira escavação científica realizada no tanque natural fossilífero Jirau 01.....	162
Figura 71 - Registro fotográfico da primeira escavação científica realizada no tanque natural fossilífero Jirau 01.....	163

Figura 72 - Restos fósseis (fêmur e tíbia) de uma preguiça-gigante (<i>Eremotherium laurillardi</i>) coletados a partir da escavação do depósito de tanque no Jirau 01.....	163
Figura 73 - Distribuição geográfica dos sete tanques naturais, sendo três fossilíferos, no Sítio Paleontológico Jirau.....	164
Figura 74 - Tanques naturais sobre domo granítico no setor norte do Sítio Paleontológico Jirau.	165
Figura 75 - Mapa geológico da Folha Itapipoca.....	167
Figura 76 - Setor norte do Sítio Paleontológico Jirau compreende os tanques naturais (Jirau 02 - 07).	168
Figura 77 - Tanque Jirau 01 correspondente a maior depressão natural situada no setor sul do Sítio Paleontológico Jirau.	168
Figura 78 - Matação (boulder) seccionado sobre lajedo granítico de topo nivelado...	169
Figura 79 - Ocorrência de matação no entorno do tanque Jirau 02.....	170
Figura 80 - Ocorrência de castle koppies em afloramentos graníticos no entorno do tanque natural Jirau 01, no Sítio Paleontológico Jirau. Foto: Felipe Waldherr, Dez./2022.	170
Figura 81 - Imagem de sobrevoo de drone sobre o tanque natural fossilífero Jirau 01. Visada na direção leste.	171
Figura 82 - Imagens obtidas do tanque natural fossilífero Jirau 01 através do sobrevoo com RPA	172
Figura 83 - Imagens obtidas do tanque natural fossilífero Jirau 01 através do sobrevoo com RPA.	172
Figura 84 - Seções do tanque natural Jirau 01.....	174
Figura 85 - Aspectos morfológicos do tanque natural fossilífero Jirau 01.....	175
Figura 86 - A primeira seção do tanque natural fossilífero Jirau 01.	176
Figura 87 - Segunda seção do tanque natural Jirau 01.	177
Figura 88 - Ocorrência de estruturas menores semelhantes a tafoni e favos de mel na lateral das ombreiras graníticas.	178
Figura 89 - Disposição dos lineamentos estruturais sobre a área do tanque natural fossilífero Jirau 01 e entorno.	180
Figura 90 - Disposição de lineamentos estruturais de direção NW-SE tendem a seguir a orientação geral (fabric) do afloramento granítico e, eventualmente, seccionam os tanques naturais de maiores dimensões.	181

Figura 91 - Registro fotográfico realizado da porção mais elevada do tanque natural Jirau 01 em direção à jusante..	182
Figura 92 - Registro sedimentar da cacimba (poço) com abertura e exposição do perfil estratigráfico.	184
Figura 93 . Exposição do registro sedimentar no interior do tanque natural Jirau 01..	185
Figura 94 - Conglomerados suportados por clastos reconhecidos na base do depósito de tanque.	187
Figura 95 - Registro fotográfico de seixo de quartzo leitoso arredondado que foi coletado na camada basal do depósito de tanque no Jirau 01..	187
Figura 96 - Contato entre a camada intermediária siltico-argilosa a esquerda e a rocha alterada a direita.....	188
Figura 97 - Camada fossilífera na porção superior do depósito de tanque no Jirau 01. A escala está posicionada no contato entre o conjunto de material fóssil e a parede lateral saprolitizada em posição vertical.....	189
Figura 98 - Presença de lascas de descamação verticalizadas em estado saprolítico, posicionadas de modo paralelo, que delimita o registro sedimentar no interior do tanque natural.....	190
Figura 99 - Perfil sedimentográfico do depósito de tanque no Jirau 01.....	192
Figura 100 - Momento 01: representação do manto regolítico que recobria a atual área do Sítio Paleontológico Jirau e da atuação incipiente da frente de intemperismo sobre o sistema de fraturas conjugadas.	195
Figura 101 - Momento 02: Exposição episódica de núcleos rochosos e atuação incisiva da frente de intemperismo	197
Figura 102 - Momento 03: Exposição do tanque e a remoção de depósito sedimentar autóctone (material intemperizado in situ) a partir do escoamento superficial.....	198
Figura 103 - Momento 04: A linha em laranja na parede do tanque indica a espessura que alcançava o depósito autóctone que foi removido do interior do tanque.	199
Figura 104 - Momento 05: fluxos d'água convergindo para o tanque e contribuindo para revolver os sedimentos de fundo, além de manter em suspensão os materiais mais finos. A remoção dos sedimentos mais finos seria através do transbordamento, representado pelas manchas na cor marrom claro saindo do interior do tanque.....	200

Figura 105 - Momento 06: Apresenta o fundo de tanque preenchido com o material intemperizado que não foi removido pelos sucessivos eventos de transbordamentos e o alargamento das paredes do tanque.	201
Figura 106 - Momento 07: Etapa de preenchimento do tanque natural a partir de escoamentos superficiais, principalmente do tipo enxurradas, que transportavam e depositavam no interior do tanque o material intemperizado do entorno do sítio paleontológico.	202
Figura 107 - Momento 08: Presença da megafauna pré-histórica de Itaipoca	203
Figura 108 - Momento 09: Tanque natural fossilífero totalmente preenchido, convertendo-se em uma ampla zona de sedimentação (alóctone).	204
Figura 109 - Mapa geológico da Folha Itaipoca e Irauçuba.	206
Figura 110 - Imagem obtida por sobrevoo de RPA na porção central e sul do Sítio Paleontológico Lajinhas.	208
Figura 111 - Imagem obtida por sobrevoo de RPA na porção central do Sítio Paleontológico Lajinhas.	209
Figura 112 - Imagem obtida por sobrevoo de RPA na porção central do Sítio Paleontológico Lajinhas.	209
Figura 113 - Ocorrência de tanques naturais do tipo Itaigara sobre os lajedos graníticos na porção central do Sítio Paleontológico Lajinhas.	210
Figura 114 - Imagem obtida por sobrevoo de RPA no Sítio Paleontológico João Cativo	211
Figura 115 - Orientação dos lineamentos na área do Sítio Paleontológico João Cativo	211
Figura 116 - Tanque natural fossilífero Criminoso, no Sítio Paleontológico Lajinhas.. ..	213
Figura 117 - Disposição dos lineamentos estruturais sobre a área do tanque natural Criminoso e entorno.	214
Figura 118 - Tanque natural fossilífero Criminoso, no Sítio Paleontológico Lajinhas.. ..	217
Figura 119 - Ocorrência de flared slope nas paredes laterais das ombreiras graníticas no interior do tanque natural fossilífero Criminoso	218
Figura 120 - Lineamento estrutural que se prolonga pela parede do tanque em direção à montante do tanque natural Criminoso.	218

Figura 121 - Ocorrência de textura do tipo pitting sobre as paredes laterais do tanque natural Criminoso.....	219
Figura 122 - A norte, no sentido contrário ao tanque Criminoso, é possível observar conjuntos de fraturas conjugadas de direção NNW-SSE sobre o lajedo.....	219
Figura 123 - O prolongamento do lineamento o qual conforma o tanque natural fossilífero Criminoso segue na direção norte e constitui outros tanques naturais sobre o lajedo granítico.....	220
Figura 124 - Desenho esquemático elaborado para o tanque natural Criminoso, expondo os principais aspectos morfológicos do interior da depressão.....	222
Figura 125 - Desenho esquemático representando os principais lineamentos estruturais do tanque natural Criminoso..	223
Figura 126 - Imagem obtida por sobrevoo de RPA no Sítio Paleontológico João Cativo, evidenciando a distribuição dos tanques naturais.....	225
Figura 127 - Disposição dos lineamentos estruturais sobre a área do tanque natural fossilífero João Cativo 02 e entorno	228
Figura 128. Tanque natural fossilífero João Cativo 02 no centro da imagem.....	229
Figura 129 - Tanque natural João Cativo 02 no período de "pós inverno" no sertão de Itapipoca..	231
Figura 130 - Morfologia de fundo do tanque natural João Cativo 02.	232
Figura 131 - Disposição de fraturas oblíquas de direção NW-SE que atravessam o eixo principal do tanque natural João Cativo 02..	233
Figura 132 - Morfologia de fundo do tanque natural João Cativo 02.	234
Figura 133 - Ocorrência de cavidades entre os planos de fraturas oblíquas subverticais que constituem estruturas menores do relevo.....	235
Figura 134 - Desenho esquemático elaborado do tanque natural João Cativo 02, expondo os principais aspectos morfológicos do interior da depressão.....	237
Figura 135 - Desenho esquemático representando os principais lineamentos estruturais do tanque natural João Cativo 02..	238

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Os tipos genéticos de gnammas (sensu Mayor Rodríguez, 2011), os quais podem ser aplicados aos tanques naturais do semiárido brasileiro. Modificado de: MAYOR RODRÍGUEZ (2011).	118
Quadro 2 - Tipologia proposta para os tanques naturais (rasos e escarpados) localizados nos sítios paleontológicos do município de Itapipoca (CE).	247

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CTSQ	Complexo Tamboril - Santa Quitéria
DCC	Domínio Ceará Central
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
FAPERJ	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICPT	International Committee for Phytolith Taxonomy
MDE	Modelo Digital de Elevação
MUPHI	Museu de Pré-história de Itapipoca
PPGG-UFRJ	Programa de Pós-graduação de Geografia
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
RPA	Remotely Piloted Aircraft
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
ZCF	Zona de Cisalhamento Forquilha

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	22
1.1 Objetivo	34
1.2 Justificativa	35
1.3 Publicações pertinentes ao desenvolvimento da Tese	35
2 ÁREA DE ESTUDO	40
2.1 Localização	40
2.2 Contexto Geológico Regional	42
2.2.1 Geologia do Nordeste Setentrional	42
2.2.1.1 Província Borborema.....	42
2.3 Geologia da Folha Itapipoca	46
2.3.1 Complexo Canindé do Ceará.....	46
2.3.2 Complexo Tamboril - Santa Quitéria	47
Granitoide Santa Quitéria (<i>NP3ytsq</i>).....	47
2.3.3 Suíte Magmática Tardi a Pós-Orogênica.....	48
Leucogranito Penedos (<i>NP3ytp</i>)	48
Granulito Macaco (<i>NP3ymc</i>).....	49
2.3.4 Coberturas Cenozoicas.....	49
2.3.5 Bacia do Ceará e a Sub-bacia do Mundaú.....	51
2.4 Geologia estrutural e tectônica - Folha Itapipoca	55
2.4.1 Zona de Cisalhamento Forquilha (ZCF)	55
2.4.2 Evolução tectônica - Folha Itapipoca	56
2.5 Denudação pós-cenomaniana e o registro deposicional	69
2.5.1 Controle eustático e erosão durante o período Cenozoico	70
2.5.2 Estimativas de taxas de erosão para o Nordeste Setentrional.....	71
2.6 Compartimentação geomorfológica e morfoestrutural do estado do Ceará	72
2.6.1 Geomorfologia de Itapipoca.....	73
3 OS TANQUES NATURAIS	77
3.1 Histórico dos estudos sobre tanques naturais no semiárido brasileiro	77
3.1.1 Tanques naturais fossilíferos.....	90
3.1.2 Processos de intemperismo e modelo de etchplanação no mecanismo evolutivo de tanques naturais	98
3.1.3 Controle litológico e estrutural.....	113
3.2 Hipóteses sobre a origem de tanques naturais (monofásico e polifásico) e caldeirões e/ou marmitas	118

3.2.1 Os tanques naturais monofásicos	119
3.2.2 Os tanques naturais polifásicos	120
3.2.3 Formas fluviais: caldeirões e marmitas	129
4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	135
4.1 Estrutura geral do trabalho	135
4.2 Materiais	141
4.3 Procedimentos	152
4.3.1 Análise de parâmetros morfométricos.....	152
4.3.2 Classificação morfológica de fundo	156
5 RESULTADOS.....	161
5.1 Sítio Paleontológico Jirau e o tanque natural fossilífero Jirau 01	161
5.1.1 Importância geocientífica do Sítio Paleontológico Jirau.....	161
5.1.2 Tanque natural Jirau 01: aspectos morfológicos	171
5.1.3 Distribuição dos lineamentos estruturais no Sítio Paleontológico Jirau	178
5.1.4 Depósito de tanque no Jirau 01	183
5.1.5 Modelo hipotético da sequência evolutiva do tanque natural Jirau 01.....	193
5.1.5.1 Quadros explicativos do bloco-diagrama do tanque natural Jirau 01.....	194
5.2 Os sítios paleontológicos Lajinhas e João Cativo	205
5.2.1 Contexto geológico-geomorfológico dos sítios paleontológicos	205
5.3 Sítio Paleontológico Lajinhas	212
5.3.1 Os tanques naturais de Lajinhas e o tanque natural fossilífero Criminoso.....	212
5.3.2 Distribuição dos lineamentos estruturais na porção sul do Sítio Paleontológico Lajinhas	213
5.3.3 Tanque natural Criminoso: aspectos morfológicos	215
5.3.4 Controle estrutural no desenvolvimento do tanque natural Criminoso	221
5.4 Sítio Paleontológico João Cativo	224
5.4.1 Os tanques naturais de João Cativo e o tanque natural fossilífero João Cativo 02	224
5.4.2 Distribuição dos lineamentos no Sítio Paleontológico João Cativo.....	226
5.4.3 Tanque natural João Cativo 02: aspectos morfológicos	229
6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	239
7 CONCLUSÕES	250
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	253
ANEXO A - La importancia de los tanques naturales (mega gnammas) en lapreservación de fósiles de la Megafauna cuaternaria en el Noreste de Brasil.....	278
ANEXO B - O registro histórico de cavidades do tipo tafone em terrenos graníticos no Nordeste do Brasil	302

ANEXO C - Uso de drone para imageamento, prospecção e caracterização de tanques naturais na área paleontológica quaternária de Itapipoca, estado do Ceará: Resultados preliminares.	335
ANEXO D - 20 Anos de Experiências em Popularização da Geologia no Brasil e na Alemanha: Considerações a partir dos Projetos "Caminhos Geológicos" e "Cem Obras-primas".	337
ANEXO E - Considerações iniciais sobre a geomorfologia do tanque natural fossilífero Jirau 01, Sítio Paleontológico Jirau - município de Itapipoca (CE).....	350
ANEXO F - Geomorphological aspects of the Jirau 01 fossiliferous natural tank, municipality of Itapipoca, Ceará state, Brazil.	352
ANEXO G - Breves considerações sobre tafoni em inselbergs: aspectos genéticos e morfoestruturais.	370
ANEXO H - Paleobiogeography of meso-megamammals from South America and the potential historically stable intertropical areas during the Late Quaternary.....	391
ANEXO I - Considerações sobre a dinâmica paleoambiental a partir da análise de depósitos de tanque no Sítio Paleontológico Jirau, município de Itapipoca (CE).	393
ANEXO J - Tanques naturais fossilíferos de João Cativo - Patrimônio natural, geocientífico e histórico de Itapipoca (CE).	399
ANEXO K - Os tipos de fundo de tanque no município de Itapipoca, estado do Ceará.	405
ANEXO L - Proposta de sequência evolutiva do tanque natural fossilífero Jirau 01 em bloco-diagrama. Elaborado por: Felipe Waldherr (2023).	409

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Migoñ (2006) os terrenos constituídos por rochas graníticas apresentam uma ampla diversidade de paisagens, tanto na escala local como no conjunto regional de formas de relevo. Do ponto de vista fisiográfico, as formas de relevo nesses terrenos podem ser classificadas em dois grandes grupos, a saber: "Formas Maiores" ou "Megaformas" e "Formas Menores" ou "Microformas". A distinção entre esses grupos de formas de relevo baseou-se no levantamento realizado a partir de diferentes autores a respeito de terrenos graníticos em distintas partes do mundo (AMARAL, 1973, 1974, 1977; GODARD, 1977; THOMAS, 1978; VIDAL-ROMANÍ, 1989; VIDAL-ROMANÍ; TWIDALE, 1998; VIDAL-ROMANÍ *et al.*, 2014a; PEDRAZA, 1996; PEDRAZA *et al.*, 1989; CAMPBELL, 1997; TWIDALE, 1982, 1989, 1993; VIEIRA, 2003; TWIDALE; VIDAL-ROMANÍ, 2005; MAYOR RODRIGUEZ, 2011; MAIA; NASCIMENTO, 2018; MAIA *et al.*, 2015, 2018; LIMA, 2018; LIMA *et al.*, 2019; CORDEIRO *et al.*, 2019a, 2019b; BASTOS *et al.*, 2022).

As "Megaformas" ou "Formas Maiores" correspondem às formas do relevo granítico que dispõem de dimensões em torno da centena de metros, ainda que o habitual seja que apresentem dimensões médias na ordem de quilômetros (VIDAL-ROMANÍ, 1989; PEDRAZA, 1996; PEDRAZA *et al.*, 1989; TWIDALE; VIDAL-ROMANÍ, 2005). Trata-se de características visíveis em macroescala na paisagem (VIDAL ROMANÍ, 1989) e que em razão da semelhança entre algumas feições geomorfológicas em diferentes partes do mundo, a identificação de formas do relevo granítico se torna, por vezes, da fácil assimilação (TWIDALE, 1989). Entre as principais "Formas Maiores" do relevo granítico, distingue-se o conjunto de domos graníticos, constituídos por *inselbergs*, *bornhardts* e maciços, e as superfícies indiferenciadas, representadas por mosaicos de lajedos (GODARD, 1977; THOMAS, 1978; TWIDALE, 1982; VIDAL-ROMANÍ, 1989; PEDRAZA, 1996; TWIDALE; VIDAL-ROMANÍ, 2005).

As "Microformas" ou "Formas Menores" apresentam feições morfológicas nas quais o limite dimensional, em geral, não ultrapassa a dezena de metros, trata-se de formas de dimensões métricas ou inferiores (VIDAL-ROMANÍ, 1989; TWIDALE; VIDAL-ROMANÍ, 2005). Entre as "Formas Menores" do relevo granítico destacam-se as depressões naturais, formas análogas aos "tanques naturais" e que ocorrem no semiárido

brasileiro¹, sendo amplamente discutidas em relação à origem, desenvolvimento, descrição e distribuição geográfica em numerosos trabalhos acadêmicos, principalmente no meio internacional. De acordo com Vidal-Romaní (1989), é comum que as Formas Menores ocorram em conjunto e/ou vinculado as Formas Maiores do relevo granítico, atribuindo ao relevo uma série de características diferenciadas e complexas à paisagem.

Na literatura acadêmica internacional, as depressões naturais são identificadas por diversos nomes. Na língua inglesa, são denominados *weathering pits*, *rock basins*, *water eyes*, *cauldrons* e *pot-holes* (TWIDALE; VIDAL-ROMANÍ, 2005). Na Espanha são chamados de *pílas*, *hoyos*, *caçolas* e *pilancones*, no entanto, na região da Galícia são *pías* e na Catalunha de *cadolles* ou *cassoletes* (VILLAR, 2007; MAYOR RODRÍGUEZ, 2011). Em Portugal, o termo utilizado é *oriçanga* (AMARAL, 1973, 1974). Na literatura francesa são nomeados de *vasques rocheuses* (TRICART *et al.*, 1972; GODARD, 1977), enquanto na língua alemã são tratados de *verwitterungsnäpfe*, *opferkessel*, *baumverfallspingen*, *fellschüssel* e *dellen* (GEBAUER, 1937; GODARD, 1977; VIDAL-ROMANÍ; TWIDALE, 1998). A nomenclatura *gnamma*, oriunda da cultura aborígine australiana, é igualmente empregada na literatura acadêmica nacional ao referir-se as depressões naturais que ocorrem sobre o embasamento pré-cambriano (BIGARELLA *et al.*, 1994; MAIA; NASCIMENTO, 2018; MAIA *et al.*, 2018; BASTOS *et al.*, 2022). De acordo com Goudie; Viles (2010), os geomorfólogos, especialmente durante o século XIX, passaram muito tempo identificando, medindo, nomeando e explicando essas formas de relevo. Assim, era comum que palavras locais fossem reutilizadas para nomear formas análogas de relevo em diferentes países.

Na obra *Pays et Paysages du Granite*, Godard (1977) comenta que as depressões naturais representam as microformas mais recorrentes sobre superfícies horizontais e/ou pouco inclinadas de rochas graníticas. Por vezes, essas formas são descritas como simples cavidades de dimensões centimétricas, no entanto, as depressões naturais podem alcançar o tamanho real ou superior aos 10 metros de comprimento. Em geral essas feições apresentam-se como microbacias de ordem métrica, com fundo chato e bordas íngremes do qual a configuração é, aproximadamente circular ou elíptica. Ainda segundo o autor,

¹ O semiárido brasileiro é uma região delimitada através da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), considerando as condições climáticas dominantes de semiaridez, em especial a precipitação pluviométrica. Como reflexo das condições climáticas, a hidrografia é frágil, em seus amplos aspectos, sendo insuficiente para sustentar rios caudalosos que se mantenham perenes nos longos períodos de ausência de precipitações (IBGE, 2018).

formas análogas aos tanques naturais foram descritas em terrenos graníticos em quase todas as latitudes, ao sul da Malásia, Guiana e Brasil, ao norte da Noruega e Antártica. Ocorrem desde as proximidades de áreas costeiras até domínios montanhosos, por exemplo, no Granito de Portillon, situado na Cordilheira dos Pirineus Centrais, entre 2.600 e 3.000 metros de altitude (GODARD, 1977).

Na literatura acadêmica nacional, o trabalho de Bastos *et al.* (2022) constitui uma importante contribuição no que se refere a proposta taxonômica para os relevos graníticos do Nordeste brasileiro. Baseando-se na organização taxonômica para classificação do relevo, metodologia de mapeamento geomorfológico empregada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2009), os autores sugerem que as formas de relevo graníticas sejam posicionadas na 5ª ordem de grandeza, correspondendo as formas de relevo simbolizadas. Os autores também utilizam os termos "Macroformas" e "Microformas" para estabelecer uma divisão de classes entre as formas de relevo graníticas. Segundo a classificação elaborada por Bastos *et al.* (2022), as *gnammas*, nomenclatura internacional empregada para referir-se as formas semelhantes aos tanques naturais, encontram-se vinculadas a uma subclasse das microformas, denominada de "formas de dissolução", contendo feições do tipo *tafoni*, *alvéolos*, *karren* e *flared slopes*.

É importante destacar que tanto na literatura acadêmica nacional quanto na linguagem informal, os tanques naturais da região do semiárido brasileiro são denominados por uma ampla variedade de nomenclaturas. Entre os termos mais utilizados no meio popular, destacam-se: tanques, marmitas, caldeirões, buracos e/ou panelas; já no meio acadêmico têm sido utilizado terminologias acompanhadas de uma conotação genética, por exemplo, bacias e/ou marmitas de dissolução e depressões de intemperismo (OLIVEIRA, 1989; BIGARELLA *et al.*, 1994; BARRETO *et al.*, 2004; SILVA, 2007; SILVA; CORRÊA, 2009; XIMENES, 2003, 2009; XIMENES; SANTOS, 2011; SILVA; BARROS, 2009; SILVA *et al.*, 2017; WALDHERR *et al.*, 2017a; MAIA; NASCIMENTO, 2018; BASTOS *et al.*, 2022).

O emprego de diversas terminologias tem fomentado uma série de questionamentos em relação a gênese e a própria identificação destas formas menores do relevo granítico em distintos quadros paisagísticos. Para alguns autores, o termo cacimba, é empregado de maneira equivocada pois este corresponderia a feições artificiais, resultante da escavação humana sobre depósitos de tanque; ou ainda em planícies fluviais (CUNHA,

1905; NEIVA; PENNA, 1916; LEITE, 1954; SOUZA-CUNHA, 1966; OLIVEIRA, 1989).

Em 1966, o paleontólogo Fausto Luiz de Souza Cunha (1926 - 2000) indicou que as cacimbas estavam associadas as escavações geradas a partir do trabalho humano e que devido a abertura de cacimbas em distintos tipos de terrenos geológicos, coincidindo com a recorrente descoberta de vertebrados fósseis, ocasionou no emprego de modo generalizado do termo cacimbas entre os pesquisadores. É interessante destacar que ao longo do século XX, a nomenclatura cacimba foi uma terminologia das mais utilizadas no meio acadêmico, sobretudo em relação aos tanques naturais, ensejando inclusive a designação do termo "Formação das Cacimbas" ou "Formação Cacimbas" na geologia regional ² (MORAES REGO, 1945; OLIVEIRA; LEONARDOS, 1943).

Na presente tese é utilizado o termo "tanque natural" (*stricto sensu*) em função de estudos prévios realizados por diversos pesquisadores no município de Itapipoca (CE), assim como em outras localidades do semiárido brasileiro. Por vezes, o termo tanque natural é abreviado para "tanque" (*lato sensu*) (OLIVEIRA, 1971; BIGARELLA *et al.*, 1975; PAULA COUTO, 1962, 1979; BERGQVIST *et al.*, 1997; XIMENES, 1993, 1996, 2003, 2006a, 2006b, 2009; XIMENES; SANTOS, 2011; XIMENES *et al.*, 2020; ARAÚJO-JÚNIOR, 2012, 2015a, 2015b; ARAÚJO-JÚNIOR; MOURA, 2014; ARAÚJO-JÚNIOR *et al.*, 2013a; MACHADO, 2019; WALDHERR *et al.*, 2017a, 2017b, 2019, 2022; ROTTI *et al.*, 2021; DANTAS *et al.*, 2021), o qual também tem sido empregado de maneira sistemática em relação ao conjunto de formas menores do relevo granítico e sem, necessariamente, ter uma conotação genética.

No Brasil, o desenvolvimento de trabalhos sobre tanques naturais em afloramentos rochosos graníticos tem se dado de maneira descontínua no meio acadêmico. Acredita-se que tal fato esteja relacionado a representação espacial dos tanques, os quais integram um conjunto específico de microformas na geomorfologia nacional. Na maior parte das vezes, essas feições possuem pequenas dimensões e/ou encontram-se em locais de difícil acesso; mesmo se tratando de formas recorrentes na paisagem, em especial do semiárido brasileiro. Nos últimos anos, os tanques naturais de maiores dimensões (Figura 1) têm

² De acordo com o agrônomo Jerônimo Vingt-Un Rosado Maia (1920-2005), o emprego da "Formação das Cacimbas", como unidade litoestratigráfica, teve início na década de 1930, conduzido pelo geólogo Luiz Flores de Moraes Rêgo (VINGT-UN ROSADO, 1982). No entanto, Macedo *et al.* (1982) esclarecem que o emprego da "Formação Cacimbas" como unidade litoestratigráfica formal é incorreto, uma vez que não atende as exigências normativas do código estratigráfico (MACEDO *et al.* 1982; OLIVEIRA, 1989).

atraído gradativamente a atenção de pesquisadores em razão de sua morfologia e, sobretudo, no que se refere ao aporte sedimentar presente em seu interior, resguardando informações relevantes sobre a dinâmica dos processos de evolução da paisagem durante o Quaternário. Tais atribuições têm conferido, assim, uma maior importância na atualidade aos estudos dessas "Formas Menores" do relevo granítico brasileiro.

No semiárido brasileiro, esses tanques, junto a seus depósitos sedimentares, constituem feições geomorfológicas de alto valor científico. De modo eventual, áreas caracterizadas pela ocorrência de tanques naturais e depósitos de tanque são convertidas em importantes sítios paleontológicos e/ou arqueológicos (PAULA COUTO, 1962; BERGQVIST *et al.*, 1997; XIMENES, 2003, 2006a, 2006b, 2009; XIMENES; SANTOS, 2011; BARRETO *et al.*, 2004; SILVA, 2007; SILVA; CORRÊA, 2009; SILVA *et al.*, 2017; SANTOS JÚNIOR, 2005; SANTOS JÚNIOR *et al.*, 2008, 2015; ARAÚJO-JÚNIOR, 2015b; ARAÚJO-JÚNIOR *et al.*, 2015). E, tais feições correspondem a depressões naturais que ocorrem, na maior parte das vezes, sobre embasamento cristalino constituído por rochas ígneas, preferencialmente graníticas, ou metamórficas e, ocasionalmente, sobre rochas sedimentares (PAULA COUTO, 1980; OLIVEIRA; HACKSPACHER, 1989; MABESOONE *et al.*, 1990; SANTOS *et al.*, 2002; XIMENES, 2003, 2009; LIMA; SILVA, 2016; WALDHERR *et al.*, 2017a, 2019, 2022; FARIA *et al.*, 2020a, 2020b).

Figura 1 - Registro de tanque natural e depósito de tanque em lajedo granítico no semiárido brasileiro, município de Itapipoca (CE). Na parede lateral é possível visualizar uma estrutura menor denominada *ventana* (em português, janela). As dimensões do tanque são: 6,70 m de comprimento, 3,60 m de largura; e 1,80 m de profundidade. Foto: Felipe Waldherr, Dez./2021



Na literatura acadêmica nacional, a distribuição geográfica destas "Formas Menores" ou "Microformas" no semiárido brasileiro é comumente direcionada a áreas constituídas, predominantemente, por lajedos e/ou no entorno de domos rochosos e *inselbergs*³ graníticos sob amplo controle estrutural, tendo em vista a presença de sistemas (ou *sets*) de fraturamento e interseções de fraturas que ocorrem sobre o embasamento cristalino (OLIVEIRA; HACKSPACHER, 1989; MABESOONE *et al.*, 1990; XIMENES, 2003, 2009; SILVA; BARROS, 2009; MAIA; NASCIMENTO, 2018; MAIA *et al.*, 2018; BASTOS *et al.*, 2022). No entanto, uma parcela dos tanques naturais, particularmente os rasos (centimétricos) e subcirculares, não se encaixa nesse esquema estrutural. Na maior parte das vezes, a gênese deste tipo de tanque tem sido atribuída a

³ Segundo Vidal-Romaní (1989), os *inselbergs* são definidos na literatura acadêmica como elevações montanhosas (dorsais ou alinhadas) os quais se sobressaem de maneira abrupta em relação aos terrenos aplainados que os rodeiam, recordando formas semelhantes as ilhas oceânicas. O autor espanhol ainda comenta que, em geral, as características que chamam atenção são as vertentes inclinadas em relação a base (*knick*). De acordo com a classificação de Bastos *et al.* (2022), os relevos residuais cristalinos que apresentam dimensão < 10 km² passam a ser denominados como *inselbergs*.

decomposição de megaxenólitos no substrato rochoso (OLIVEIRA *et al.*, 1989; MABESOONE *et al.*, 1990; MAIA; NASCIMENTO, 2018).

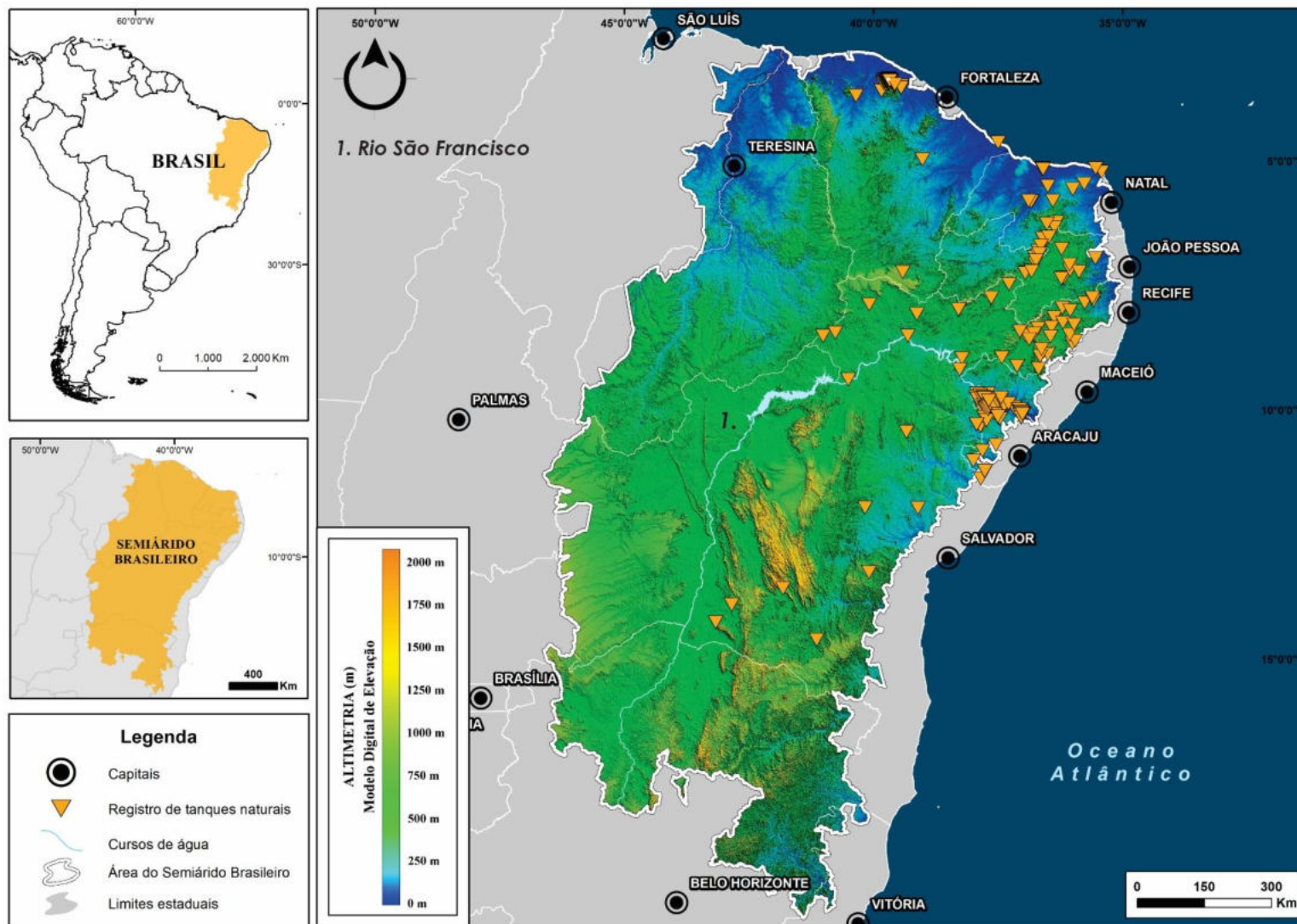
Desde o início do século XX, os tanques naturais têm sido descritos a partir de diferentes meios de comunicação, sobretudo em publicações acadêmicas (artigos científicos e pesquisas de pós-graduação) como formas de relevo que variam de tamanho e profundidade, centimétrico a métrico, apresentando um conjunto de formatos diversificados. As descrições têm exposto o caráter elipsoidal, ovalar, circular, lobulado, alongado e/ou mesmo irregular das cavidades observadas em trabalhos de campo no semiárido brasileiro (MORAES, 1924, 1928; DOMINGUES, 1952; OLIVEIRA *et al.*, 1989; MABESOONE *et al.*, 1990; BERGQVIST *et al.*, 1997; XIMENES, 2003, 2006a, 2006b, 2009; SILVA *et al.*, 2017; MAIA; NASCIMENTO, 2018; WALDHERR *et al.*, 2017a, 2019, 2022). Essas feições morfológicas, uma vez expostas em superfície, tem sido associada a áreas preferenciais de coalescência de fluxos de sedimentos carreados a partir do escoamento superficial. Em meio ao material carreado para o interior das depressões pode ser, eventualmente, notada a presença de uma ampla quantidade de fragmentos ósseos, convertendo as depressões naturais, ainda que em escala restrita, em autênticas tanatocenoses⁴ (WALDHERR *et al.*, 2019). E, quando preenchidos com material fóssilífero, têm sido denominados no meio acadêmico nacional como "tanques naturais fóssilíferos" ou, simplesmente, "tanques fóssilíferos" (PAULA COUTO, 1961, 1980; OLIVEIRA, 1989; OLIVEIRA; HACKSPACHER, 1989; MABESOONE *et al.*, 1990; XIMENES, 2003, 2006b, 2009; SANTOS, 2006).

O registro de tanques fóssilíferos no semiárido brasileiro têm se dado, principalmente, nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia. Na Figura 2⁵ é possível visualizar a distribuição geográfica de tanques naturais fóssilíferos a partir da consulta de comunicados oficiais desde o século XVIII até trabalhos acadêmicos publicados recentemente, em especial nas áreas da Paleontologia, Geologia e Geomorfologia.

⁴ A tanatocenose corresponde ao conjunto de fósseis, cuja associação ocorre somente após a morte dos organismos constituintes (IBGE, 1999).

⁵ A localização dos tanques naturais fóssilíferos na Figura 02 foi feita a partir da compilação de publicações científicas (trabalhos acadêmicos) e comunicação pessoal (OLIVEIRA, 1989; BARRETO *et al.*, 2004; SILVA, 2007; SILVA; CORRÊA, 2009; XIMENES, 2003, 2009; SILVA; BARROS, 2009; WALDHERR *et al.*, 2017a; ARAÚJO-JÚNIOR, 2012, 2015a, 2015b, 2016; ARAÚJO-JÚNIOR; MOURA, 2014; ARAÚJO-JÚNIOR *et al.*, 2013a; SILVA, 2013; DANTAS *et al.*, 2013, 2020, 2021; FARIA *et al.*, 2020a, 2020b; RIBEIRO *et al.*, 2021).

Figura 2 - Distribuição geográfica dos tanques naturais junto aos depósitos de tanque no semiárido brasileiro. O conjunto de pontos foi elaborado a partir da compilação de trabalhos e publicações que mencionam a ocorrência, em especial, de tanques fossilíferos.



Um outro fator importante relacionado aos tanques, além de resguardar um importante conjunto de patrimônio paleontológico, encontra-se na capacidade dessa feição geomorfológica ser convertida, também, em uma fonte de água acessível à população em períodos de estiagem⁶ (KOSTER, 1816; SPIX; MARTIUS, 1824, 1828; 1968; NEIVA; PENNA, 1916; ALVIM, 1939; SOBRINHO, 1941; LEITE, 1954). As águas pluviais tendem a se acumular na porção não preenchida pelos depósitos e, assim, manter um espelho d'água até meados da próxima estação chuvosa no semiárido, período compreendido entre dezembro e março. De acordo com Ximenes (2003), animais silvestres utilizavam-se dessa fonte d'água desde tempos pré-históricos, como comprovam os fósseis encontrados em alguns tanques naturais. Ainda segundo o autor, as depressões são convertidas, temporariamente, em reservatórios de menor escala, resultante da acumulação de água através de precipitações e do escoamento superficial. Os tanques têm sido convertidos ao longo do tempo histórico em cisternas naturais, uma espécie de fonte de água com maior acessibilidade, sendo utilizado de modo recorrente pela população que reside na porção interiorana.

Ximenes (2003) complementa ainda sobre a importância local dessas feições ao discorrer que proprietários da zona rural do semiárido brasileiro realizaram o desentulhamento total das depressões naturais, durante a estação seca do ano, com a finalidade de aumentar a capacidade de acumulação e o armazenamento de água na estação chuvosa. De acordo com as notas elaboradas por Kratif (1858) e Capanema (1866, 1947), o registro deste tipo de atividade remonta ao século XIX; e que, infelizmente, ao promover a remoção destes depósitos de tanque perde-se, além do material fossilífero, a possibilidade de reconstituição de parte dos cenários paleopaisagísticos, tanto no contexto estratigráfico quanto paleontológico.

Dentre os municípios que integram o semiárido brasileiro, e que possuem abundante presença de tanques naturais e depósitos de tanque, destaca-se o município de Itapipoca, localizado na porção norte do estado do Ceará. Nesse município, as depressões naturais são recorrentes, em especial, nos terrenos graníticos situados no entorno do

⁶ Em publicação do periódico "Memórias do Instituto Oswaldo Cruz" datado de 1916, por exemplo, há um comunicado o qual os pesquisadores, Dr. Arthur Neiva e Dr. Belisário Penna, em trabalho para a Inspetoria de Obras contra as Secas, relatam que ao escavar cacimbas em depósitos de tanque para armazenar água os moradores das regiões interioranas do semiárido brasileiro acabavam por se deparar com uma quantidade expressiva de fósseis pertencentes a megafauna. Neiva; Penna (1916) citam o reaproveitamento de alguns desses fragmentos ósseos, provavelmente de omoplatas, que devido ao seu formato achatado e liso eram utilizados para secagem do vestuário.

Maciço de Uruburetama⁷ (PAULA COUTO, 1962; XIMENES, 2003, 2006b, 2009), constituindo estreitas depressões de variados comprimentos e formatos onde, ocasionalmente, são encontrados restos preservados de fósseis da megafauna pré-histórica do Quaternário (Figura 3).

Figura 3 - Tanques naturais no Sítio Paleontológico Lajinhas, município de Itapipoca (CE). As formas menores de relevo granítico seguem direção NNW-SSE. Imagem obtida através da utilização de RPA (*Remotely Piloted Aircraft*). Foto: Henrique Sampaio, Dez./2021.



O município de Itapipoca usufrui de um importante histórico de atividades de produção acadêmica em relação as pesquisas sobre os tanques naturais fossilíferos. O vasto material científico coletado e descrito em Itapipoca, desde a metade do século XIX até o presente momento, confere ao município cearense a atribuição de um relevante polo acadêmico no que se refere as pesquisas em Geociências. Além disso, a continuidade de

⁷ Segundo a proposta de Bastos *et al.* (2021), os relevos cristalinos residuais que apresentam dimensão superior a 50 km² passam a ser classificados como maciços. O Maciço de Uruburetama estende-se por quatro municípios (Itapipoca, Uruburetama, Tururu e Itapajé), ocupando uma área aproximada de 930 km².

investigações sobre tais depressões naturais têm incluído uma série de iniciativas no âmbito da geodiversidade (MACHADO, 2019), junto ao desenvolvimento de uma consciência de geoconservação, e ressignificação do patrimônio natural de Itapipoca, sendo tal papel desempenhado pela equipe do Museu de Pré-história de Itapipoca⁸.

Embora os tanques naturais da região de Itapipoca tenham sido amplamente investigados, principalmente na área de paleontologia (PAULA COUTO, 1962, 1980; XIMENES, 2003, 2006a, 2006b, 2009; XIMENES; SANTOS, 2011; ARAÚJO-JÚNIOR, 2012, 2015; ARAÚJO-JÚNIOR; MOURA, 2014; ARAÚJO-JÚNIOR *et al.*, 2013a; ROTTI *et al.*, 2021), não há ainda um consenso na comunidade científica sobre a origem dos tanques naturais, sendo, portanto, desconhecidos os processos e os condicionantes responsáveis pela formação e distribuição dessas depressões em Itapipoca.

Assim, a presente tese de doutorado busca investigar os múltiplos condicionantes geoambientais que possibilitaram a gênese dos tanques naturais e, posteriormente, a formação dos depósitos de tanque distribuídos no município de Itapipoca, integrando uma extensa área que atualmente é denominada como *Vale da Megafauna Pré-histórica* (Figuras 4 e 5). Entre os condicionantes examinados, destaca-se: o controle tectono-estrutural vinculado a evolução geotectônica da área; a análise das características litológicas do conjunto de afloramentos que constituem o embasamento cristalino; os apontamentos sobre o papel do sistema de fraturamentos e lineamentos estruturais; os indicativos de amplos pulsos erosivos e deposicionais ao longo do tempo geológico, aferindo uma complexa sequência evolutiva à paisagem regional, estendendo-se igualmente ao desenvolvimento dos tanques naturais; e a influência de distintos domínios morfoclimáticos que atuaram na região até o estabelecimento de um ambiente com características de semiaridez.

A presente tese também preza pelo emprego de hipóteses abordadas recentemente no meio acadêmico e que buscam compreender a configuração das formas do relevo em terrenos graníticos a partir do controle estrutural na porção setentrional do Nordeste do Brasil, em especial na região do semiárido brasileiro.

⁸ A equipe do Museu de Pré-história de Itapipoca (MUPHI) tem contribuído na produção e divulgação de conteúdo científico e didático, gerando uma série de discussões sobre a importância do patrimônio natural para a população local. Além de resguardar o conteúdo fóssilífero coletado em atividades de campo, o MUPHI tem desempenhado igualmente a comunicação sobre a relevância geocientífica dos tanques naturais e, conseqüentemente, fomentado a preservação dos sítios geomorfológicos/paleontológicos.

Figura 4 - Sítios paleontológicos com ocorrência de tanques naturais fossilíferos no município de Itapipoca (CE): **1** - Sítio Paleontológico Jirau; **2** - Sítio Paleontológico Coelho; **3** - Sítio Paleontológico Lajinhas; **4** - Sítio Paleontológico João Cativo; e **5** - Sítio Paleontológico Pedra D'água. O ícone que indica os sítios paleontológicos corresponde ao proboscídeo *Notiomastodon platensis* (AMEGHINO, 1888), um dos exemplares de megamamíferos extintos que habitaram o Vale da Megafauna Pré-histórica.

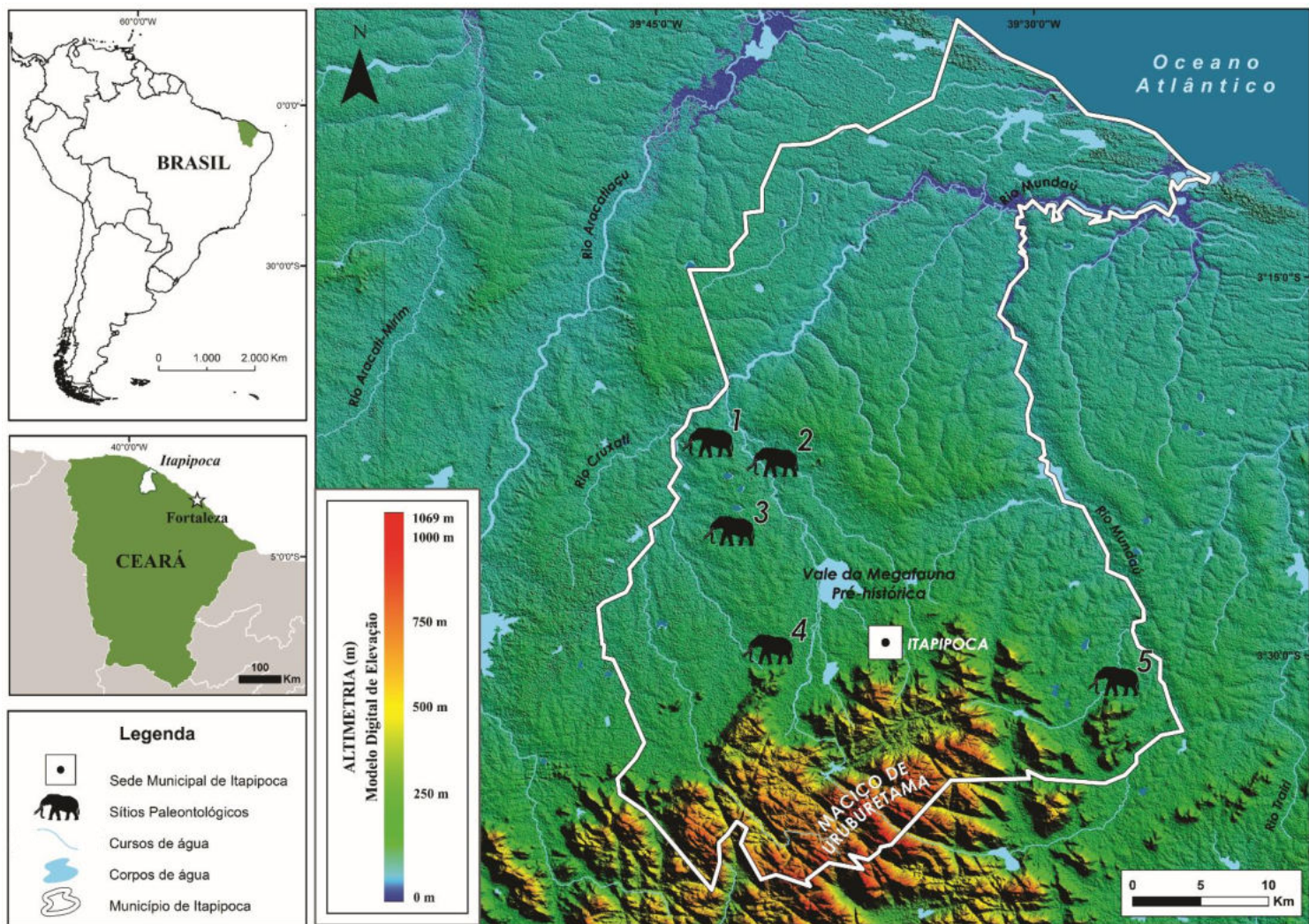


Figura 5 - Tanques naturais fossilíferos de grandes dimensões no Sítio Paleontológico João Cativo, município de Itapipoca (CE). Imagem obtida através da utilização de RPA. Escala: automóvel. Foto: Henrique Sampaio, Dez./2021.



1.1 Objetivo

A presente tese de doutorado tem como objetivo avaliar os condicionantes geoambientais associados ao desenvolvimento de tanques naturais fossilíferos em sítios paleontológicos no município de Itapipoca, estado do Ceará. A articulação entre condicionantes geológico-geomorfológicos, geotectônicos e hidrológicos investigados possibilitaram interpretações e subsidiaram o reconhecimento dos processos vinculados à gênese de três tanques naturais de maiores dimensões em distintos sítios paleontológicos. Ressalta-se que as investigações de campo foram fundamentais para refinamento da interpretação e compreensão de aspectos ligados a origem e desenvolvimento dos tanques naturais, bem como de seus depósitos ocorridos ao longo do Quaternário no semiárido brasileiro. De modo subsequente, é proposto uma classificação prévia para os tanques naturais (raso e escarpado) nos sítios paleontológicos selecionados, baseando-se nos aspectos morfológicos, morfométricos e no tipo de gênese.

1.2 Justificativa

No meio acadêmico nacional, estudos científicos que abordam a origem e a morfologia dos tanques naturais fossilíferos na região semiárida do Brasil, desde a segunda metade do século XIX, tem se baseado em modelos pré-estabelecidos para o desenvolvimento das cavidades, sendo o mais comum o emprego da hipótese vinculada ao processo de evorsão/cavitação⁹ e/ou ao intemperismo físico-químico atuando sobre intersecções de fraturas no substrato rochoso em ambiente subaéreo. Na presente pesquisa, a dinâmica dos mantos intempéricos, sob a influência do *front* de intemperismo na modelagem e reafeiçoamento das formas de relevo em subsuperfície, assim como o controle estrutural no embasamento granítico, são considerados fatores importantes para a gênese dos tanques naturais de maiores dimensões. Ao contrário da necessidade de a superfície estar exposta para iniciar a formação da cavidade, o tanque pode ter sua origem e desenvolvimento associado ao ambiente subedáfico¹⁰. Acredita-se, portanto, que há possibilidade de trazer, por meio de análises em detalhe e levantamentos de campo, argumentos para propor uma outra interpretação para origem e elaborar uma sequência evolutiva aos tanques naturais no município de Itapipoca (CE). Cabe ressaltar que a origem subaérea não está descartada, sobretudo quando uma pequena depressão exposta à superfície se desenvolve pelo intemperismo a partir da retenção da umidade dos sedimentos acumulados em seu depocentro. Este processo contínuo requer

1.3 Publicações pertinentes ao desenvolvimento da Tese

Em anexo estão os artigos, trabalhos completos e resumos publicados, em ordem cronológica, durante o período letivo (2019.1 - 2022.2) no Curso de Doutorado do Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGG-UFRJ), referentes as metodologias e revisão bibliográfica afins ao tema da tese.

O **Anexo A** corresponde ao artigo intitulado "*La Importancia de los tanques naturales (mega gnammas) en la preservación de fósiles de la megafauna cuaternaria en*

⁹ O processo de evorsão/cavitação é um tipo específico de abrasão (corrosão) resultante do movimento turbilhonar sobre o embasamento cristalino em um ambiente fluvial.

¹⁰ Cabe ressaltar que a origem subaérea não está descartada, sobretudo quando o objeto de análise corresponde a uma depressão de menor dimensão (centimétrica). A depressão exposta à superfície se desenvolve pelo intemperismo a partir da retenção da umidade e sedimentos acumulados em seu depocentro. Este processo aparentemente requer a retenção/esvaziamento de sedimentos e umidade, e no caso da ocorrência de juntas de alívio paralelas à superfície, resulta na formação de bordas suspensas, em função do maior acúmulo de umidade nas zonas sombreadas sob as bordas.

el Nordeste de Brasil", que foi publicado em 2019, no volume 41, do periódico Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe - Revista de Xeoloxía Galega e do Hercínico Peninsular.

Esse artigo esclarece a relevância dos estudos, em especial os paleontológicos, realizados a partir de sedimentos acumulados no interior dos tanques naturais no Nordeste do Brasil. O levantamento sistemático de acumulações fossilíferas em depósitos de tanque tem sido uma das principais ferramentas para a compreensão parcial de condições paleoambientais e paleoecológicas durante o Quaternário na Região Intertropical Brasileira.

O **Anexo B** refere-se ao artigo intitulado "O registro histórico de cavidades do tipo tafone em terrenos graníticos no Nordeste do Brasil", que foi publicado em 2020, no volume 1, do periódico Humboldt - Revista Brasileira de Geografia Física (UERJ).

Esse artigo consiste em evidenciar o registro histórico e a distribuição geográfica de formas menores do relevo granítico no Nordeste do Brasil. A investigação através de documentos históricos, datados do século XVIII e XIX, possibilitou a constatação das mais variadas interpretações sobre as feições geomorfológicas no semiárido brasileiro. Os tafoni e os tanques naturais, por exemplo, consistiam em locais de demarcação a partir de supostos sinais para a revelação de tesouros ocultados. Os sinais eram então frequentemente confundidos com pinturas rupestres ou pelo próprio conjunto de estruturas rúpteis (como fraturas ortogonais ou *sets* de fraturas) nos afloramentos.

O **Anexo C** refere-se ao resumo intitulado "Uso de drone para imageamento, prospecção e caracterização de tanques naturais na área paleontológica quaternária de Itapipoca, estado do Ceará: Resultados preliminares", que foi publicado em 2020, no Livro de Resumos do Simpósio Virtual de Paleontologia do Quaternário.

Esse resumo corresponde ao emprego de *Remotely-Piloted Aircraft* (RPA) na identificação de áreas de tanques naturais com alto potencial paleontológico no município de Itapipoca, estado do Ceará. O resumo é o resultado preliminar de uma série de varreduras, através do sobrevoo, sobre os sítios paleontológicos conhecidos - auxiliando na demarcação das depressões - e a descoberta de tanques naturais em distintas localidades ainda não escavados.

O **Anexo D** refere-se ao artigo intitulado "20 anos de experiências em popularização da geologia no Brasil e na Alemanha: Considerações a partir dos Projetos Caminhos Geológicos e Cem Obras-primas", que foi publicado em 2021, no volume 44 do periódico Anuário de Geociências - UFRJ.

Esse artigo consiste em demonstrar a importância da experiência geológica e comunicação científica como via bem sucedida para a ampla conscientização social, contribuindo desse modo na formação de uma sociedade participativa em relação ao debate sobre Geodiversidade e as iniciativas de Geoconservação e Geoturismo. Um subitem da presente pesquisa é destinado a discussão de possíveis ações associadas a Geoconservação dos tanques naturais fossilíferos de Itapipoca (CE).

O **Anexo E** refere-se ao resumo intitulado "Considerações iniciais sobre a geomorfologia do Tanque Natural Fossilífero Jirau 01, Sítio Paleontológico Jirau - Município de Itapipoca (CE)", que foi publicado em 2021, no Livro de Resumos do I Simpósio Virtual de Paleontologia do Quaternário.

Esse resumo corresponde a um levantamento prévio sobre os aspectos geomorfológicos do tanque natural fossilífero Jirau 01, no Sítio Paleontológico Jirau - município de Itapipoca (CE). A descrição inicial do tanque natural foi realizada a partir de trabalhos de campo e com imagens de alta resolução obtidas por RPA. A análise dos condicionantes lito-estruturais da área de pesquisa, assim como o preenchimento sedimentar do tanque natural, é abordada de modo sucinto.

O **Anexo F** refere-se ao artigo intitulado "*Geomorphological aspects of the Jirau 01 fossiliferous natural tank, municipality of Itapipoca, Ceará state, Brazil*", que foi publicado em 2022, no volume 23, número 2 do periódico Revista Brasileira de Geomorfologia.

Esse artigo busca esclarecer os principais condicionantes geoambientais que resultaram na origem e no desenvolvimento do tanque natural fossilífero Jirau 01, no Sítio Paleontológico Jirau - município de Itapipoca. Uma série de dados e informações foram coletadas em campo e através de sobrevoos com RPA no intuito de apresentar, em detalhe, a geomorfologia do tanque natural e do sítio paleontológico. Um modelo de evolução é proposto a partir do controle estrutural, do reafeiçoamento do tanque (*forma etch*) a partir do processo de corrosão química-física em condições subedáficas e,

posteriormente, da exposição episódica e do preenchimento sedimentar do tanque natural fossilífero.

O **Anexo G** refere-se ao artigo intitulado "Breves considerações sobre tafoni em *inselbergs*: aspectos genéticos e morfoestruturais", que foi publicado em 2022, no volume 23, número 4 do periódico Revista Brasileira de Geomorfologia.

Esse artigo busca esclarecer os condicionantes morfoestruturais que resultaram na origem de formas menores do relevo granítico. Os *tafoni* são cavidades localizadas nas escarpas dos *inselbergues* ou nas bases de domos graníticos residuais. São originados a partir da intemperização química ao longo de superfícies de discontinuidades como fraturas, onde se instalam microambientes de maior umidade. O estudo propõe um modelo morfogenético para a formação de cavidades a partir do controle estrutural e, por vezes, adicionados ao petrográfico. A meteorização inicial se dá preferencialmente ao longo das fraturas, especialmente nas zonas onde a água pode percolar ou mesmo residir. A partir daí, as depressões vão sendo alargadas por meio da progressiva descamação das superfícies interiores e a sua desintegração granular. Tais mecanismos poderiam ser replicados em hipóteses sobre a possível origem dos tanques naturais de Itapipoca (CE).

O **Anexo H** refere-se ao resumo intitulado "*Paleobiogeography of meso-megamammals from South America and the potential historically stable intertropical areas during the Late Quaternary*", que foi publicado em 2022, nos Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Paleontologia.

Esse resumo buscar apresentar a paleobiogeografia de meso-megamamíferos da América do Sul durante o Quaternário. Cabe ressaltar que a confecção das áreas historicamente estáveis foi elaborada a partir do levantamento da distribuição geográfica de tanques naturais fossilíferos no semiárido brasileiro, incluindo a área de pesquisa em Itapipoca (CE). A compilação de informações sobre os tanques com material fóssil da megafauna e outros jazigos fossilíferos (cavernas, lagoas e planícies aluviais) foi fundamental para o recorte espacial e delimitação da área limítrofe de interesse.

O **Anexo I** refere-se ao trabalho intitulado "Considerações sobre a dinâmica paleoambiental a partir da análise de depósitos de tanque no Sítio Paleontológico Jirau, município de Itapipoca (CE)", que foi publicado em 2023, nos Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada e também no periódico GeoUERJ.

Este trabalho recebeu o Prêmio Prof. Jorge Soares Marques de melhor apresentação - modalidade pôster - no eixo temático "Análises ambientais aplicadas ao estudo das mudanças globais". Esse trabalho completo corresponde a descrição e análise do depósito de tanque no Tanque Natural Fossilífero Jirau 01, no Sítio Paleontológico Jirau - município de Itapipoca (CE). A pesquisa busca apresentar os principais mecanismos que viabilizaram a formação do depósito de tanque e os processos geomorfológicos que atuaram no transporte do material sedimentar ao interior do tanque natural durante o Quaternário. O levantamento estratigráfico inicial permite uma reconstituição parcial das condições paleoambientais e paleoecológicas no sítio paleontológico e entorno.

O **Anexo J** refere-se ao trabalho intitulado "Tanques naturais fossilíferos de João Cativo - Patrimônio natural, geocientífico e histórico de Itapipoca (CE)", que foi publicado em 2023, nos Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada e também no periódico GeoUERJ.

Este trabalho recebeu o Prêmio Prof. Jorge Soares Marques de melhor apresentação - modalidade oral - no eixo temático "Geoarqueologia, geodiversidade e gestão do patrimônio natural". Esse trabalho completo constitui uma revisão sobre a importância histórica e geocientífica dos tanques naturais de João Cativo, considerado um dos sítios paleontológicos mais representativos do município de Itapipoca (CE). Há uma breve descrição geomorfológica dos tanques naturais e a elaboração de uma proposta em tornar a área em Geomorfossítio. As temáticas de Geodiversidade, Geoconservação e Geoturismo são apresentadas no intuito de ampliar o debate sobre a conscientização social e a importância de valorizar o patrimônio natural brasileiro.

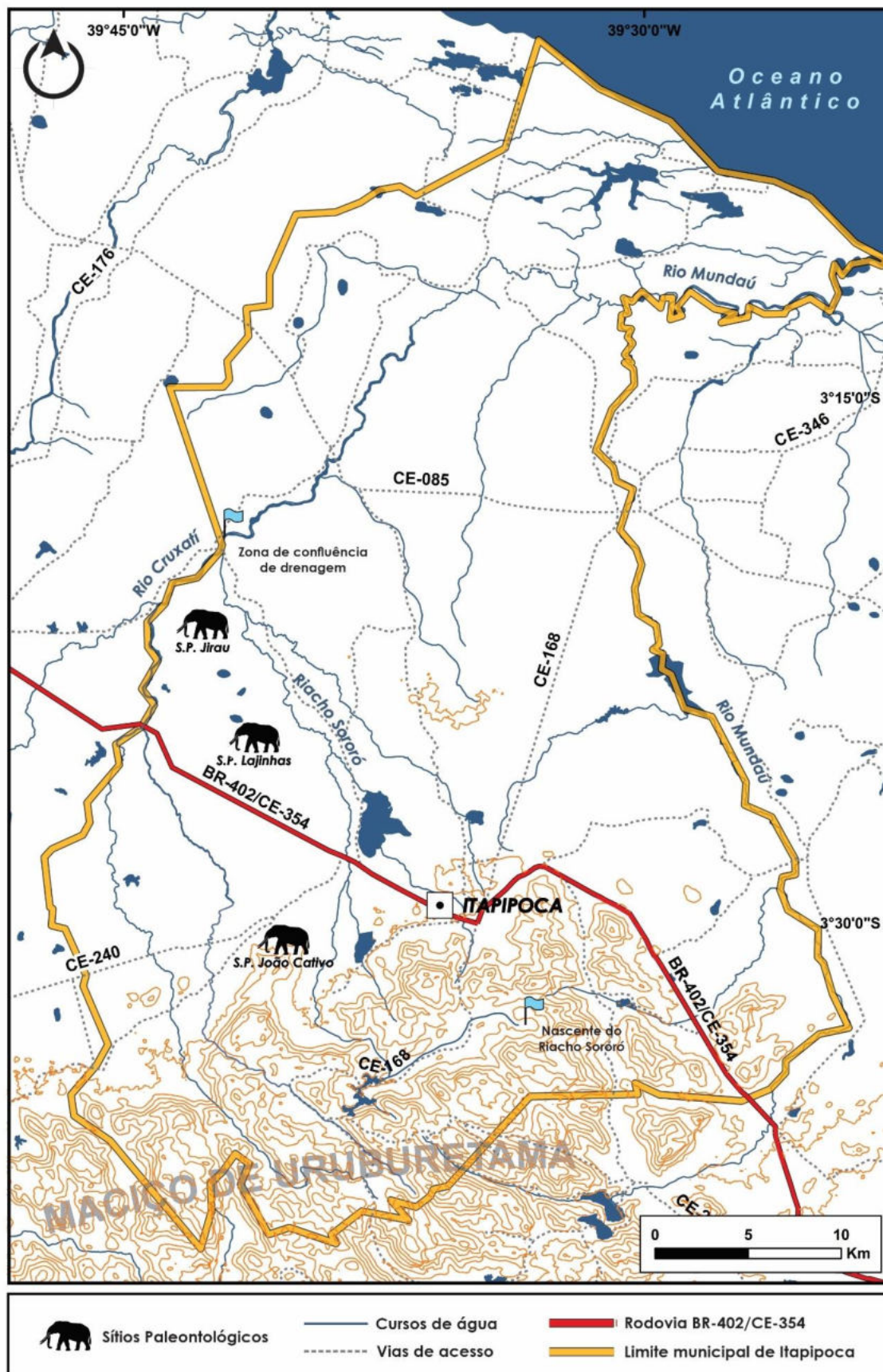
2 ÁREA DE ESTUDO

2.1 Localização

A área de estudo abrange três sítios paleontológicos localizados no município de Itapipoca, na porção norte do estado do Ceará. Os sítios paleontológicos compreendem tanques naturais, sendo alguns preenchidos com material fossilífero da megafauna pré-histórica. Em geral, os tanques naturais fossilíferos correspondem as depressões de maiores dimensões, denotando estimativas que sobressaem em relação a comprimento, largura e profundidade de tanques no entorno. Na presente pesquisa de doutorado foram selecionados três tanques naturais fossilíferos de referência, em distintos sítios paleontológicos, para o levantamento de informações a partir de trabalhos de campo e de sobrevoo com o auxílio de RPA. Em ordem de apresentação, os tanques naturais de maiores dimensões são: o "Tanque Jirau 01", localizado no Sítio Paleontológico Jirau; o "Tanque Criminoso", no Sítio Paleontológico Lajinhas; e o "Tanque João Cativo 02", no Sítio Paleontológico João Cativo. As principais vias de acesso aos sítios paleontológicos mencionados podem ser visualizadas na Figura 6.

De modo geral, o acesso aos sítios paleontológicos é realizado seguindo os principais eixos rodoviários (federal/estadual) e, posteriormente, utilizando vias secundárias não pavimentadas. O acesso aos sítios paleontológicos Jirau e Lajinhas é feito através da rodovia BR-402/CE-354, enquanto o acesso ao Sítio Paleontológico João Cativo é realizado por meio da rodovia CE-240. O caminho que leva ao Sítio Paleontológico Jirau fica nas proximidades do Km 241 da rodovia BR-402/CE-354, próximo ao Riacho Cruxati, no limite municipal entre Itapipoca e Amontada, seguindo uma via secundária em direção ao estabelecimento denominado "Cipozão". O Sítio Paleontológico Jirau integra parte da propriedade particular "Fazenda Queimadas", da família Barroso Nunes. A entrada para o Sítio Paleontológico Lajinhas encontra-se no Km 247 da rodovia BR-402/CE-354, utilizando a via secundária que percorre o Assentamento Taboca-Lajinhas. O acesso para o Sítio Paleontológico João Cativo é feito pela rodovia CE-240 na proximidade do Km 05, seguindo na direção da localidade denominada "Saquinho". O Sítio Paleontológico João Cativo encontra-se integralmente na propriedade particular "Fazenda Carrapato", do Sr. Fernando Diógenes e familiares.

Figura 6 - Mapa de localização das principais vias de acesso aos três sítios paleontológicos de referência (Jirau, Lajinhas e João Cativo) no município de Itapipoca, estado do Ceará.



2.2 Contexto Geológico Regional

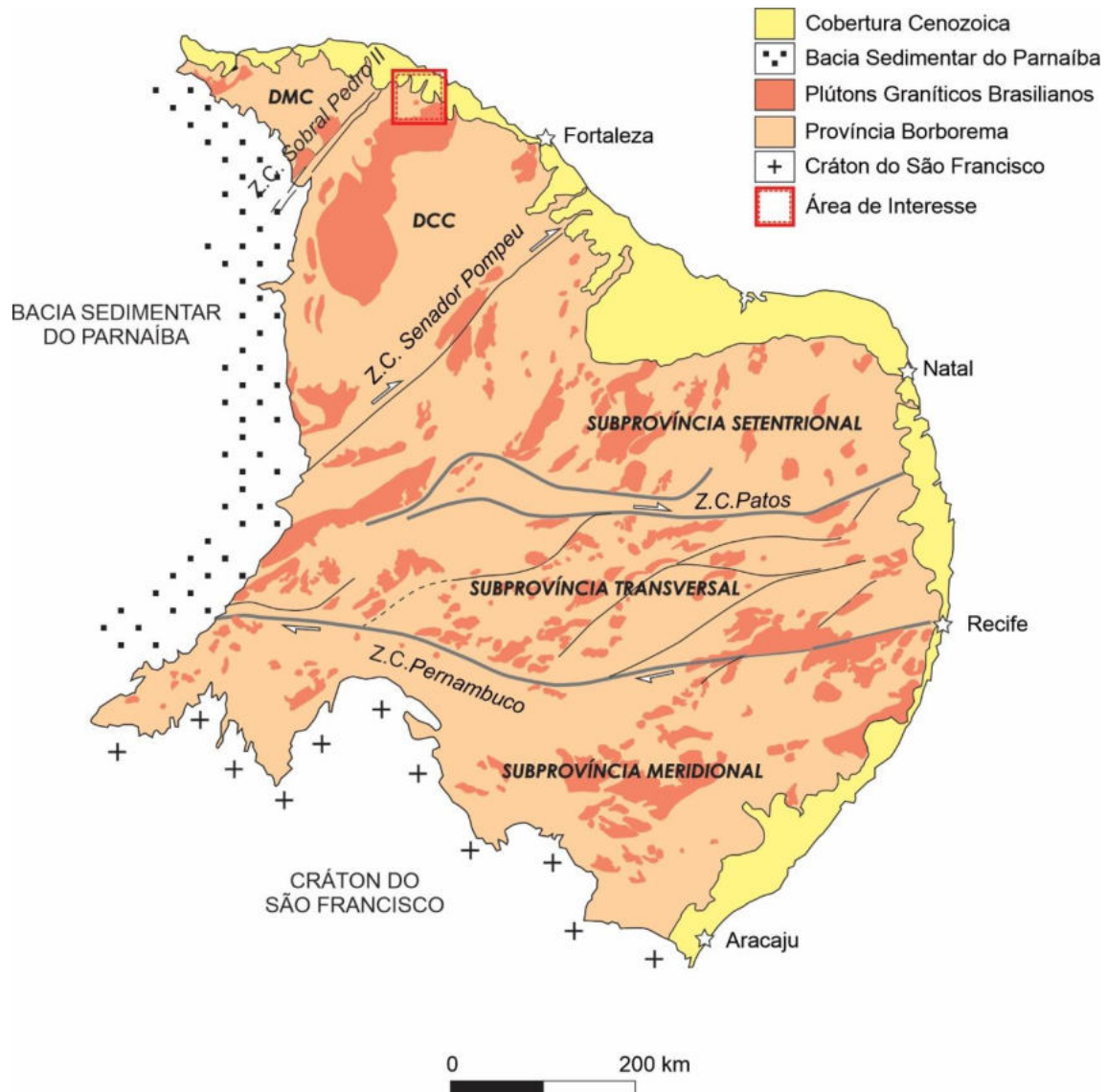
2.2.1 Geologia do Nordeste Setentrional

No contexto geológico, as áreas de interesse do presente trabalho - os Sítios Paleontológicos Jirau, Lajinhas e João Cativo - encontram-se no Domínio Ceará Central (DCC), na Subprovíncia Setentrional da Província Borborema. Em termos litológicos, os tanques naturais fossilíferos estão distribuídos sobre afloramentos graníticos associados a Suíte Magmática Tardi a Pós-orogênica, de idade cambriano-ordoviciano (541 - 485 Ma), e ao Complexo Tamboril-Santa Quitéria, de idade criogênica-ediacariana (\cong 635 Ma). O presente subitem aborda de maneira breve o contexto geológico regional e a evolução geotectônica das principais unidades litoestratigráficas da Folha Itapipoca SA.24-Y-D-II (BRAGA; GOMES, 2018).

2.2.1.1 Província Borborema

Segundo Almeida *et al.* (1977; 1981), a Província Borborema compreende uma área do Nordeste Setentrional localizada a leste da Bacia Sedimentar do Parnaíba e ao norte do Cráton do São Francisco. O trabalho elaborado por Rodrigues *et al.* (2010) define a Província como uma ampla região brasileira constituída por litologias metamórficas e ígneas, formada por um sistema ramificado de orógenos neoproterozoicos, separados por terrenos de idade Proterozoica que, eventualmente, apresentam núcleos arqueanos (ALMEIDA *et al.*, 1981; BRITO NEVES *et al.*, 2000). Os autores ainda destacam a complexidade estratigráfica e geocronológica da área que define uma série de compartimentos tectônicos caracterizados por diferentes aspectos geológicos e geofísicos (RODRIGUES *et al.*, 2010). Destaca-se na Província Borborema um amplo magmatismo associado ao evento orogênico brasileiro, entre 750 e 540 Ma, durante o Neoproterozoico, com extensos e diversificados plútons graníticos (Figura 7).

Figura 7 - Mapa tectônico regional simplificado com as subdivisões da Província Borborema. Modificado de: ARCHANJO *et al.* (2008).



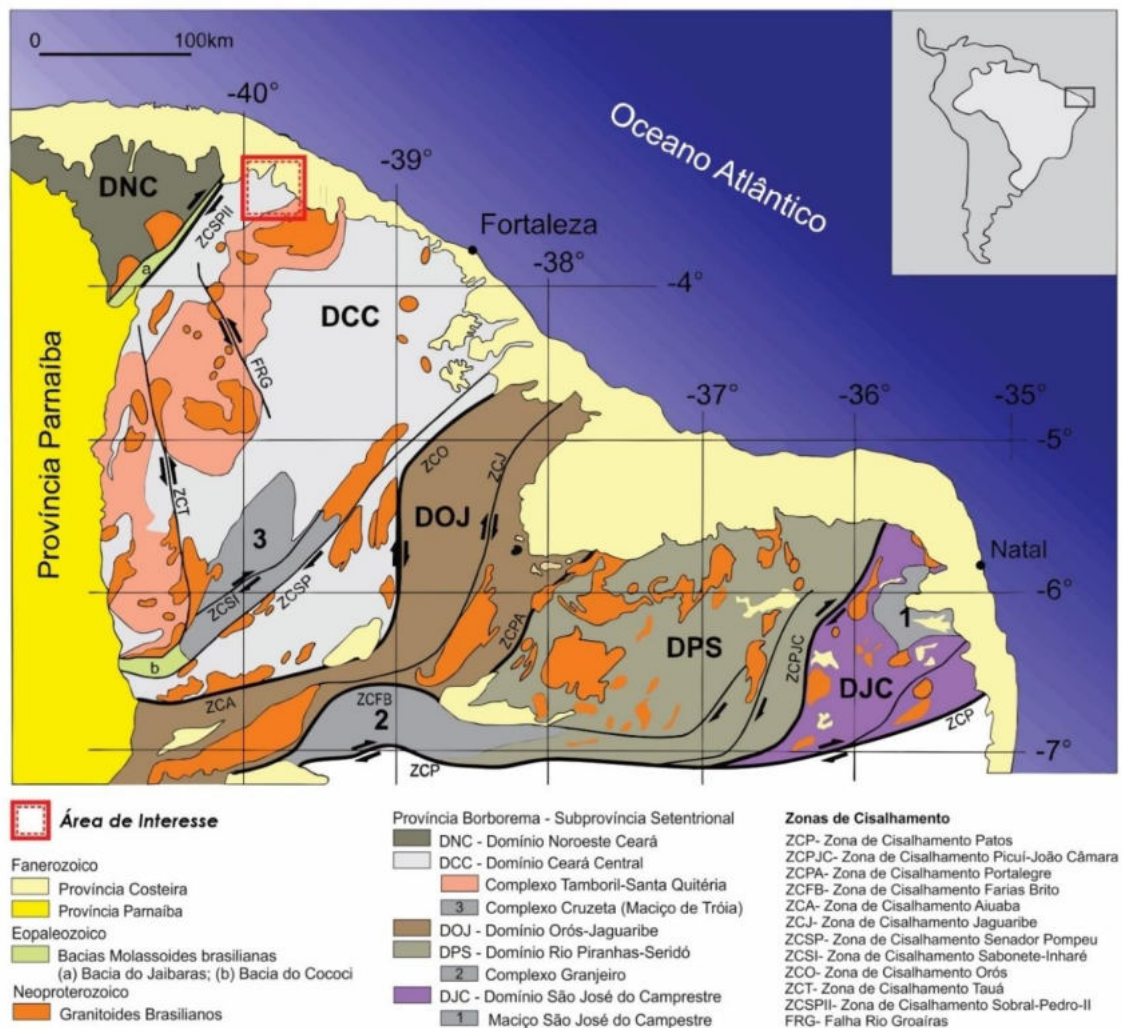
De acordo com Abdelsalam *et al.* (2002), a Província Borborema é o resultado do processo de convergência dos Crátoms Amazônico, São Luís - Oeste Africano e São Francisco com a participação do metacráton saariano. O processo de amalgamento Brasileiro/Pan-Africano em questão foi o responsável pela formação do Gondwana Ocidental (BRITO NEVES; CORDANI, 1991). Segundo Braga; Gomes (2018), uma das principais características estruturais da Província Borborema é a presença de uma extensa rede de cisalhamento transcorrente, sendo que duas megazonas de cisalhamento dúcteis dextrais, a de Patos e de Pernambuco, promovem sua compartimentação em três grandes subprovíncias: Setentrional (onde está localizada a área de estudo), Zona Transversal e

Meridional. De acordo com Vauchez *et al.* (1995) a Província Borborema possui uma malha de zonas de cisalhamento de escala continental que constitui um sistema cinematicamente consistente que se estende por mais de 200.000 km².

A Subprovíncia Setentrional é limitada a norte e a leste pelo Oceano Atlântico, a oeste pela Bacia Sedimentar do Parnaíba e a sul pela Zona de Cisalhamento Patos. A subprovíncia pode ser dividida em três domínios tectônicos, a saber: Domínio Noroeste Ceará (DNC); Domínio Ceará Central (DCC) e Domínio Rio Grande do Norte - Figura 08. O Domínio Rio Grande do Norte é subdividido nos subdomínios Orós-Jaguaribe (DOJ), Piranhas-Serindó (DPS) e São José do Campestre (DJC) (JARDIM DE SÁ, 1994; FERREIRA *et al.*, 1998; SANTOS, 1996; BRAGA; GOMES, 2018; ARTHAUD *et al.*, 2008, 2015; CPRM, 2015).

A área de estudo está localizada no Domínio Ceará Central (DCC - Figura 8), que é limitado a oeste pela Zona de Cisalhamento Sobral-Pedro II e pela Bacia Sedimentar do Parnaíba, ao norte, pela Província Costeira. O limite a leste ainda hoje é debatido. Segundo Braga; Gomes (2018), diversos autores têm definido a Zona de Cisalhamento de Senador Pompeu como zona limítrofe (SANTOS; BRITO NEVES 1984; CAVALCANTE, 1999; FETTER, 1999; CAVALCANTE *et al.*, 2003), enquanto outros tem defendido a Zona de Cisalhamento Orós-Aiuaba (ARTHAUD *et al.*, 2007).

Figura 8 - A Província Borborema Setentrional. Modificado de: ARTHAUD *et al.* (2008) e BRAGA; GOMES (2018).



O magmatismo neoproterozoico no Domínio Ceará Central tem como maior expressão o Complexo Tamboril-Santa Quitéria, que é composto por uma associação ígnea/anatética (CAMPOS, 1976; BRAGA *et al.*, 1977; DNPM, 1983). Apresenta idades entre 650 e 610 Ma (FETTER *et al.*, 2003; CASTRO, 2004; SANTOS *et al.*, 2008; ARAUJO *et al.*, 2012b; COSTA *et al.*, 2013, ARAUJO *et al.*, 2014), sendo caracterizado por numerosos pulsos magmáticos por meio dos quais grandes volumes de magma intrudiram nas rochas dos Complexos Ceará e Canindé do Ceará (ARAÚJO *et al.*, 2014). Apresenta variação litológica entre granitoides, diatexitos e metatexitos, com composição granítica a granodiorítica, predominante, e diorítica e tonalítica subordinadas (FETTER *et al.*, 2003; COSTA *et al.*, 2013; ARAÚJO *et al.*, 2014). Fetter *et al.* (2003) sugeriram que o complexo representaria um arco magmático desenvolvido em ambiente continental,

principalmente, entre 660-590 Ma, enquanto estudos mais recentes propõem ambiente de colisão continental, com retrabalhamento de rochas geradas durante uma fase pré-colisional ocorrida entre 800 e 650 Ma (AMARAL, 2010; COSTA *et al.*, 2010; COSTA *et al.*, 2013; ARAUJO *et al.*, 2014).

De acordo com diversos autores (VAUCHEZ *et al.*, 1995; FETTER, 1999; NOGUEIRA, 2004) a deformação em regime transcorrente com escape de terrenos e intrusão de granitoides em zonas de cisalhamento no Domínio Ceará Central, assinala o estágio pós-colisional da evolução no domínio, ocorrido em torno de 590 e 560 Ma. Segundo Braga; Gomes (2018) os principais exemplos do magmatismo nesta fase correspondem aos granitoides Quixadá e Quixeramobim, encaixados na Zona de Cisalhamento Senador Pompeu, e os de Novas Russas e Pedra Lisa na Zona de Cisalhamento Tauá (NEVES, 1989; NOGUEIRA, 2004; PARENTE, 2008; ARCHANJO; HOLANDA, 2013).

2.3 Geologia da Folha Itapipoca

A presente pesquisa baseou-se no mapeamento geológico das folhas Itapipoca (SA.24-Y-D-II) e Irauçuba (SA.24-Y-D-V), em escala 1:100.000, disponibilizado pelo Programa Geologia do Brasil - CPRM (BRAGA; GOMES, 2018; NALETO, 2018). Em geral, os tanques naturais de Itapipoca ocorrem preferencialmente em unidades litológicas com características granítico-gnáissicas, no caso, o Leucogranito Penedos, pertencente a Suíte Magmática Tardi a Pós-orogênica, de idade Cambriano-ordoviciano (541 - 485 Ma); o Granitoide Santa Quitéria, pertencente ao Complexo Tamboril-Santa Quitéria, de idade Criogênica-ediacariano (\cong 635 Ma); e os migmatitos do Complexo Canindé do Ceará, datado do Paleoproterozoico (Riaciano, 2300 Ma). Segue abaixo uma breve apresentação das diferentes unidades litoestratigráficas que compõe parte do embasamento cristalino do município de Itapipoca (Figura 9).

2.3.1 Complexo Canindé do Ceará.

O Complexo Canindé do Ceará pode ser subdividido em duas unidades, a saber: i) migmatitos predominantes paraderivados, com ortognaisses subordinados (PRcn1), e ii) ortognaisses subordinados (PRcn2). Na área de estudo, a ocorrência do Complexo do Canindé do Ceará está restrita ao migmatito paraderivado (PRcn1) que cobre cerca de

10% do município de Itapipoca. Os migmatitos do Complexo Canindé do Ceará são datados do Paleoproterozoico (Riaciano, 2300 Ma).

Segundo o mapeamento de Braga; Gomes (2018) os litotipos (PRcn1) afloram na porção central do município e possuem contato discordante com as coberturas cenozoicas. Ainda de acordo com as autoras, com os Granitoides Santa-Quitéria, entre as localidades de Arrodeador, Sororô do Meio e Caldeirão, o contato é tectônico, através de uma zona de cisalhamento contracional, com médio ângulo de mergulho; no entanto, na região de Várzea Redonda e Caldeirão os granitoides são intrusivos na unidade migmatítica, quando formam corpos com dimensões variadas, com foliação bem definida; e a oeste da Zona de Cisalhamento Forquilha (ZCF), os ortognaisses porfiríticos ocorrem como *sheets* nos migmatitos, frequentemente milonitizados (*augen* gnaisses) e dobrados, reproduzindo a trama dobrada dos migmatitos (BRAGA; GOMES, 2018).

Os migmatitos desta unidade, predominantemente paraderivados, afloram geralmente em lajedos rasteiros de tamanho variado, apresentando estruturas bandadas e/ou dobradas e baixo grau de alteração (BRAGA; GOMES, 2018). Os migmatitos são compostos essencialmente por quartzo, feldspato anfibólio e biotita, com ou sem granada. Secundariamente, a unidade engloba metagranitoides migmatizados, ortoderivados, de coloração cinza, finos a médios, metamorfizados em fácies anfibolito, classificados como ortognaisses que alternam biotita e hornblenda como máfico principal, além de meta-quartzo monozodiorito, meta-quartzodioritos, meta-monzogranitos e, biotita monzogranitos, porfiríticos ou não (BRAGA; GOMES, 2018).

2.3.2 Complexo Tamboril - Santa Quitéria

Granitoide Santa Quitéria (NP3ytsq)

O Complexo Tamboril-Santa Quitéria aflora em cerca de 40% da área do município de Itapipoca, sendo subdividido nas unidades Granitoide Santa Quitéria (NP3ytsq) e Diatexitos (NP3ytsd). A Unidade Granitoide Santa Quitéria é constituída por corpos descontínuos de portes variados, na porção centro-sul de Itapipoca. O Granitoide Santa Quitéria, pertencente ao Complexo Tamboril-Santa Quitéria, possui idade Criogênica-ediculariano (\cong 635 Ma).

De acordo com Braga; Gomes (2018) o contato com os migmatitos paraderivados é predominantemente tectônico compressivo. Apresenta boas exposições na forma de

bancadas de pedreiras, nas proximidades de Itapipoca, sendo lajedos e blocos suas formas mais comuns de ocorrência. A unidade engloba hbl-bi ortognaisses, biotita gnaisses, augen gnaisses, hbl-bt gnaisses com granada e, secundariamente metagranodioritos e anfibolitos, metamorfizados e fácies anfibolito. No geral são ortognaisses cinza a cinza com tons rosados, com baixo grau de alteração. Contém porfiroclastos orientados, comumente de K-feldspatos, anedrais e subedrais, por vezes, ocelares, em média com 1 a 4 cm, envoltos em matriz de granulação fina.

2.3.3 Suíte Magmática Tardi a Pós-Orogênica

No município de Itapipoca, a suíte magmática tardi a pós-orogênica é composta através de duas unidades: o Leucogranito Penedos e o Granulito Macacos, que agrupados compõem aproximadamente 10% da área de ocorrência. No geral, constituem corpos intrusivos, com formas alongadas, orientadas segundo a direção N45°E (BRAGA; GOMES, 2018).

Leucogranito Penedos (NP3y1p)

Nas localidades de Penedo e Barra do Macaco afloram granitoides cinza esbranquiçados a rosados. Segundo Braga; Gomes (2018), as rochas são predominantemente constituídas por sienogranitos, isotrópicos de granulação grossa, com baixo grau de alteração, raramente fraturados. Macroscopicamente são formados por feldspatos, quartzo, tendo como máficos biotita, anfibólio, além de expressiva porcentagem de granadas bem formadas, em média variando 0,4 a 1,0 cm. Afloram como lajedos, comumente, de grande porte, envolto por coberturas inconsolidadas. Relações de contato em campo indicam que são mais velhos que os granitos finos Amontada (NP3y3amt), com maior expressividade na região de Amontada e, mais novos que os migmatitos porfiríticos dobrados (PRcn1), encontrados como xenólitos nas bordas do corpo. São comuns enclaves máficos centimétricos a decimétricos, com eixo maior concordante com a foliação medida nos granitoides Santa Quitéria. O Leucogranito Penedos, pertencente a Suíte Magmática Tardi a Pós-orogênica, possui idade Cambriano-orдовiciano (541 - 485 Ma).

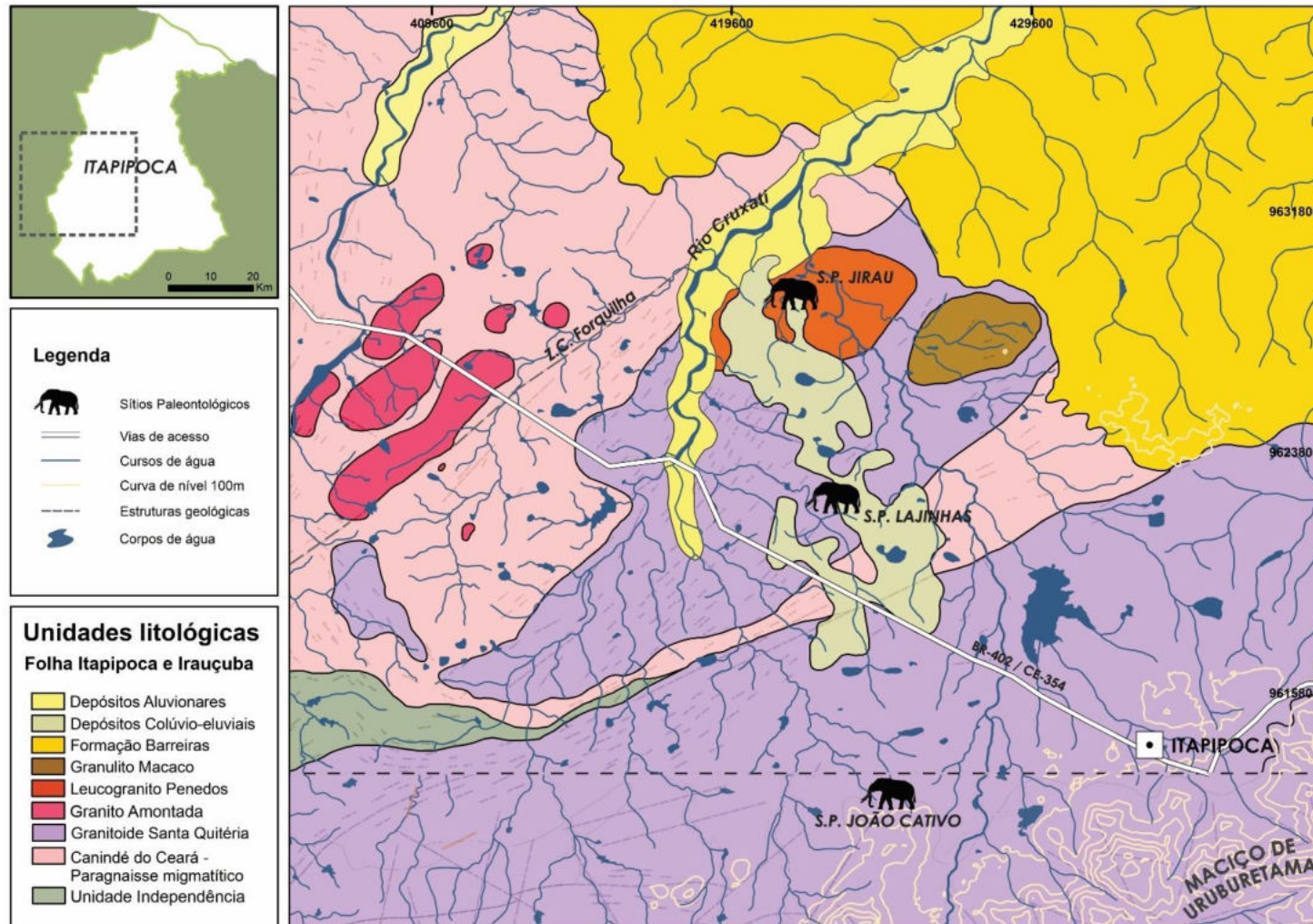
Granulito Macaco (NP3ymc)

O Granulito Macaco aflora na localidade homônima, intrusivo nos granitoides Santa Quitéria, e estruturado segundo a direção NE-SW. De acordo com Braga; Gomes (2018), a unidade constitui uma pequena elevação de rochas de coloração cinza escura a cinza esverdeada, isotrópicas a levemente foliadas. Apresentam granulação média a grossa, são compostas essencialmente por plagioclásio, quartzo, feldspato potássico, biotita, piroxênio, biotita e anfibólio. Enclaves microgranulares máficos, com dimensões e formas variadas são comuns. Em associado ocorrem rochas calciossilicásticas de granulação fina, cinza escura, isotrópicas e levemente foliadas, constituídas por plagioclásio, anfibólio, clinopiroxênio e granada.

2.3.4 Coberturas Cenozoicas

De acordo com Braga; Neto (2018) as coberturas cenozoicas estão representadas através da Formação Barreiras, Coberturas Sedimentares Inconsolidadas, Coberturas Eólicas Litorâneas e Coberturas Aluvionares. O conjunto de depósitos cenozoicos representa aproximadamente 40% da área de exposição no município de Itapipoca, apresentando contatos deposicionais discordantes com as demais litologias da área. Ainda de acordo com os autores, a Formação Barreiras é formada por arenitos argilosos de granulação fina a média, com coloração amarelada a avermelhada, sendo caracterizada pela matriz argilo-caulinítica com cimento argiloso e leitos conglomeráticos e nódulos lateríticos. As coberturas sedimentares inconsolidadas (N2Q1c) são sedimentos argilo-arenosos e arenosos, com fragmentos de quartzo e, localmente, seixos e blocos de arenito (BRAGA; NETO, 2018).

Figura 9 - Mapeamento geológico e a distribuição dos sítios paleontológicos com ocorrência de tanques naturais fossilíferos. Modificado de: BRAGA; NETO (2014, 2018) e NALETO (2018).



2.3.5 Bacia do Ceará e a Sub-bacia do Mundaú

A Bacia do Ceará encontra-se na plataforma continental da margem equatorial brasileira, abrangendo uma área de aproximadamente 34.000 km² (CONDÉ *et al.*, 2007). De acordo com Moraes Neto *et al.* (2003) a Bacia do Ceará é limitada pelo Alto de Fortaleza, a sudeste, e pela Bacia de Barreirinhas pelo Alto de Tutoia. O limite sul é definido a partir da faixa de afloramentos do embasamento cristalino e ao norte através do ramo sul da Zona de Fratura Romanche. Ainda segundo os autores, a origem e evolução da Bacia do Ceará está associada a uma história geológica polifásica, tendo início na separação do Gondwana, durante o Cretáceo Inferior, e no contexto da formação da margem equatorial afro-brasileira (MORAIS NETO *et al.*, 2003).

A Bacia do Ceará foi desenvolvida sob um complexo regime tectônico de natureza transtrativa e transpressiva, responsável pela geração de um rifteamento oblíquo caracterizado pelo desenvolvimento de estágios distintos, pré-, sin- e pós-ativação dos movimentos transformantes (MORAIS NETO *et al.*, 2003; OLIVEIRA, 2020). Em razão das diferentes características tectônicas, a Bacia do Ceará foi compartimentada em quatro sub-bacias: Piauí-Camocim, Acaraú, Icarai e Mundaú, de oeste para leste, as quais apresentam histórias deposicionais e deformacionais ligeiramente distintas (BELTRAMI, 1990; MORAIS *et al.*, 2003; SANTOS, 2018; OLIVEIRA, 2020).

A sub-bacia do Mundaú, limita-se a oeste com a sub-bacia do Icarai a partir de uma importante inflexão de falha de borda, no prolongamento nordeste da Zona de Cisalhamento Forquilha, e a leste através do Alto de Fortaleza (Figuras 10 e 11). Os limites indicam o controle das estruturas pretéritas do embasamento cristalino na nucleação e traçado das inflexões que se encontram presentes nas falhas de borda das sub-bacias (MORAIS *et al.*, 2003).

Figura 10 - Localização, limites e arcabouço estrutural da Bacia do Ceará e Sub-bacia do Mundaú. Modificado de: MORAIS NETO *et al.* (2003).

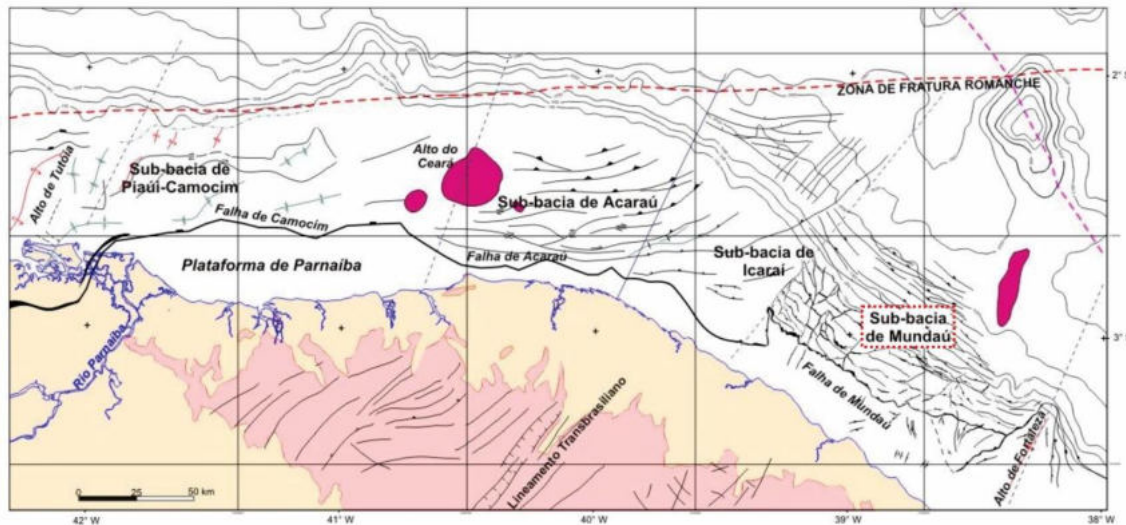
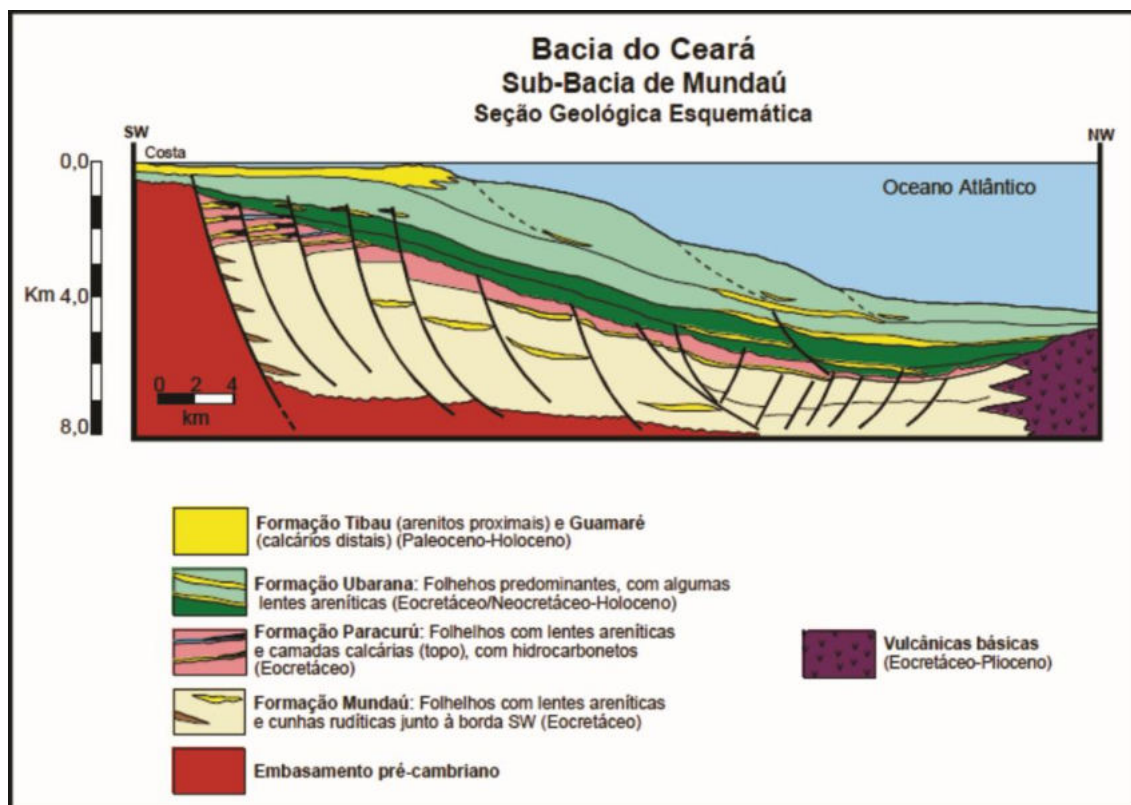


Figura 11 - Seção esquemática da Sub-bacia do Mundaú, na Bacia do Ceará. Modificado de: COSTA *et al.* (1990) e SILVA FILHO (2004).



De acordo com Moraes *et al.* (2003), o padrão de falhamentos na sub-bacia do Mundaú é predominantemente NW-SE, sendo responsável pela estruturação em blocos basculados e escalonados a partir de falhas sintéticas de mesma direção. Ainda de acordo com o autor, os lineamentos de direção NE-SW que cortam de maneira oblíqua o principal

trend estrutural, podem ser interpretados como zonas de transferência de natureza transcorrente que teriam auxiliado a compartimentar, acomodando diferentes partes de deformação durante a formação da bacia e, posteriormente, na deformação (MORAIS *et al.*, 2003).

No decorrer do tempo geológico, o registro deposicional na Sub-bacia do Mundaú se torna fundamental na compreensão da dinâmica erosiva continental, em especial durante o Cenozoico. Segundo Moraes *et al.* (2003), o Neógeno é marcado por uma notável mudança na geometria deposicional da bacia, de progradacional eminentemente agradacional, e pela implantação de uma plataforma mista dominada por sedimentação litorânea, siliciclástica na porção interna, passando lateralmente por carbonatos de alta energia na porção externa e pelitos de talude e bacia. A mudança pode ser claramente observada a partir de uma importante discordância erosiva regional de idade eomiocenica. Ainda de acordo com os autores, a seção compreende as formações Tibau (siliciclásticos), Guamoré (carbonatos) e Ubarana (pelitos) associadas a fase tectono-sedimentar drifte ou de deriva continental da Margem Equatorial Brasileira. Nas porções proximais, os sedimentos da Formação Tibau interdigitam-se com os depósitos siliciclásticos da Formação Barreiras, os quais repousam diretamente sobre o embasamento cristalino, na zona costeira (MORAIS *et al.*, 2003).

Na presente pesquisa, a análise se manteve direcionado às formações Tibau-Guamoré-Uburana e Barreiras, pacotes representativos do Paleógeno e Neógeno na Bacia do Ceará, em razão do aporte sedimentar, indicando uma importante sucessão de eventos de denudação sobre a porção continental (Figura 12), em especial sobre a área de estudo que aparentemente se encontrava vinculada a bacia de drenagem do Rio Mundaú e afluentes durante o Neógeno e o Quaternário.

2.4 Geologia estrutural e tectônica - Folha Itapipoca

De acordo com Braga; Gomes (2018), as rochas que compõem o embasamento apresentam um *trend* estrutural principal de NE-SW, ocorrendo de modo marcante, em especial no segmento central, e condicionando a forma da Unidade Granitoide Santa-Quitéria e a Suíte Magmática Tardi a Pós-Orogênica, constituída pelo Leucogranito Penedos, Granulito Macacos e Granito Amontada, este último localizado a oeste do município de Itapipoca. Já a Zona de Cisalhamento Forquilha (ZCF), no limite municipal de Itapipoca, representa a principal estrutura dúctil da área de estudo, seccionando a área segundo a direção N50E. Segundo Braga; Gomes (2018) a ZCF afeta mais intensamente os migmatitos (*PRcn1*) e ortognaisses (*PRcn2*) do Complexo Canindé do Ceará.

2.4.1 Zona de Cisalhamento Forquilha (ZCF)

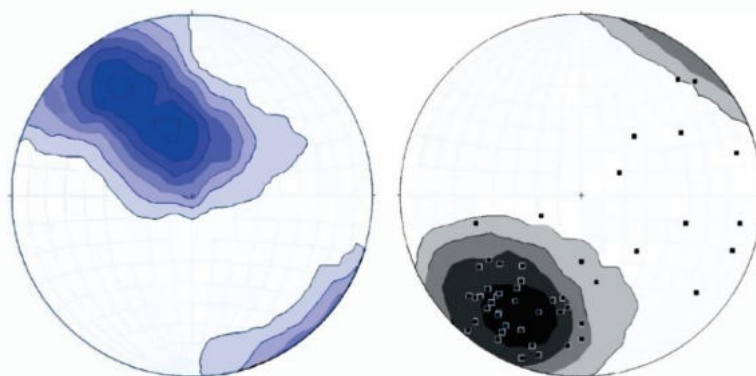
De acordo com Maia; Bezerra (2014), as zonas de cisalhamento se formaram em nível crustal profundo. No entanto, as zonas de cisalhamento foram reativadas em vários níveis crustais. As reativações produziram deformações no campo dúctil-rúptil e rúptil. Ambos os processos são potenciais geradores de *trends* de lineamentos que constituem para a Geomorfologia em feições do relevo associadas a deformação tectônica (MAIA; BEZERRA, 2014). As deformações são vinculadas a estruturas de subsuperfície, sendo identificadas no terreno e através de imagens de sensores remotos.

Segundo Cunha; Silva (2005), a porção norte do Domínio Ceará Central, na Província Borborema Setentrional, apresenta diversas feições tectônicas marcantes que exercem um forte condicionamento aos elementos estruturais planares e lineares das litologias aflorantes. Dentre as feições destacam-se zonas de cisalhamento de direção geral NNE a NE, dispostos ao longo de uma ampla extensão adjacente ao Lineamento Sobral-Pedro II (Lineamento Transbrasiliano).

A principal zona de cisalhamento que afeta a área de estudo é denominada Forquilha (ZCF), estendendo-se por mais de 50 km. O prolongamento estabelece inclusive a área limítrofe na porção oeste da Sub-bacia do Mundaú, integrada a Bacia do Ceará (bacia *offshore*). Desse modo, a ZCF, de direção SW-NE, apresenta indícios de movimentação dextral e secciona dois domínios estruturais (leste e oeste). Braga; Gomes (2018) expressam que a deformação brasileira tende a afetar de forma mais intensa algumas unidades litológicas, entre elas os migmatitos paraderivados e ortognaisses oclares (*PRcn1*) do Complexo Canindé do Ceará.

De acordo com Braga; Gomes (2018), é possível identificar dois domínios estruturais, a leste e a oeste da Zona de Cisalhamento Forquilha. Cabe ressaltar que o domínio leste tem destaque em virtude da ocorrência dos tanques naturais, sendo conveniente não aprofundar sobre o domínio a oeste da ZCF. Desse modo, a leste o tratamento de dados de foliação indica dois máximos de planos principais, representando valores de mergulho variando de médio (32°) a médio/alto (61°), para o quadrante SE (Figura 13) (BRAGA; GOMES, 2018). A lineação associada é oblíqua a direcional, com caimento médio de 26° para SW.

Figura 13 - Diagrama de isolinhas de foliação Sn preservada e atitudes de lineação (Lx) para o domínio a leste da Zona de Cisalhamento Forquilha (Sn=128 medidas, Lx=50 medidas, contornos com intervalo de 2% para Sn e 3% para Lx). Fonte: BRAGA; GOMES (2018).



Os planos de foliação em questão são considerados registros da foliação Sn, desenvolvida durante a intrusão/alojamento das rochas do Complexo Tamboril-Santa Quitéria (BRAGA; GOMES, 2018). Ainda de acordo com Braga; Gomes (2018), nesta porção da área os corpos do Leucogranito Penedos, Granulito Macacos e os ortognaisses Santa Quitéria constituem corpos com formas alongadas, com estruturação coerente com a direção NE-SW identificada em trabalho de campo.

2.4.2 Evolução tectônica - Folha Itapipoca

No trabalho de Braga; Gomes (2018), o modelo proposto de evolução geológica das principais unidades litoestratigráficas na Folha de Itapipoca (SA.24-Y-D-II) consiste em dois eventos tectônicos (Figura 14): a) Intrusão da associação granito-migmática do Complexo Tamboril - Santa Quitéria (CTSQ) ocorreu em torno de 640-620 Ma em regime sin-colisional (ARAÚJO *et al.*, 2012; COSTA *et al.*, 2013) ou em estágio evoluído de

arco magmático continental (FETTER *et al.*, 2003; ARAÚJO *et al.*, 2014). Esta intrusão ocorreu concomitante ao desenvolvimento da foliação Sn (intrusão sin-tectônica) e está caracterizada por planos com mergulho baixo a médio para SE. Neste estágio o sentido de transporte tectônico (vergência) foi para NW; b) Em torno de 580-530 Ma desenvolveu-se o regime transcorrente, geralmente com cinemática dextral, datado no DCC a partir de granitoides sin-transcorrentes, por exemplo, Quixadá-Quixeramobim de 590-580 Ma, segundo Fetter (1999) e Nogueira (2004), a tardi-transcorrentes, por exemplo, Mucambo e Meruoca de 540-530 Ma, de acordo com (FETTER, 1999; ARCHANJO *et al.*, 2009; SANTOS *et al.*, 2013). Sob este regime foram desenvolvidos planos de médio a alto mergulho para SE, que caracterizam a foliação milonítica Sn+1. Na área, como já dito anteriormente, a principal estrutura transcorrente é a Zona de Cisalhamento Forquilha (ZCF) e onde o movimento relativo entre planos secundários dobrou Sn, formando um padrão crenulado como observado no domínio oeste (Figura 14B).

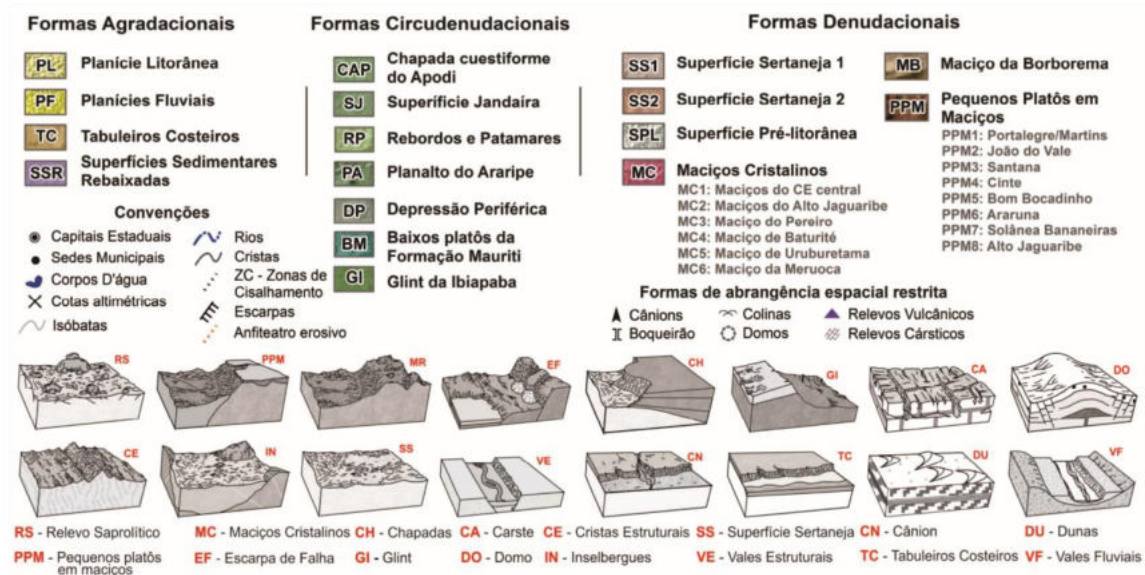
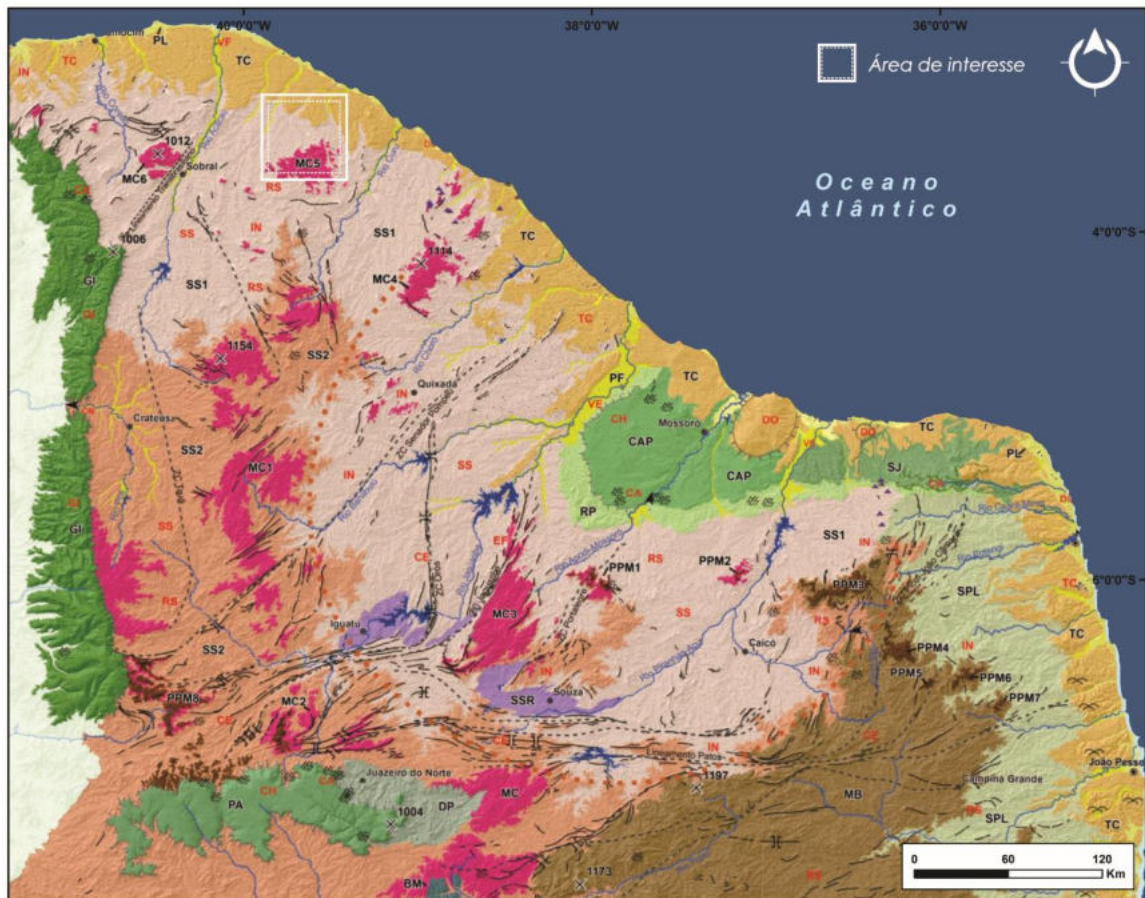
Os corpos do Leucogranito Penedos e do Granulito Macaco intrusivos na Unidade de Granitoide Santa Quitéria exibem formas alongadas, orientadas segundo a direção N45E, sendo caracterizados por apresentar somente uma foliação (Sn+1). Os granitos isotrópicos de Amontada provavelmente tiveram seu alojamento em fase tardia a posterior à movimentação dextral da ZCF. Por fim, em contatos discordantes com as demais litologias da área, ocorreu a deposição das coberturas superficiais cenozoicas (BRAGA; GOMES, 2018).

No contexto geomorfológico, os sítios paleontológicos com tanques naturais fossilíferos encontram-se distribuídos sobre afloramentos graníticos associados ao compartimento de superfícies aplainadas e no entorno de maciços cristalinos residuais. O presente subitem expõe o contexto geomorfológico regional e a evolução morfoestrutural dos principais compartimentos de relevo que integram a área de interesse no município de Itapipoca (CE).

Ao tratar da evolução do relevo do Nordeste do Brasil é necessário considerar de forma prévia a subdivisão da região estabelecida em uma série de províncias geotectônicas (vide capítulo anterior). De acordo com Costa *et al.* (2020), os compartimentos de relevo do Nordeste Setentrional são representados por um conjunto de morfologias herdadas da estruturação Pré-Cambriana e Cretácea, reativadas por vezes durante o Cenozoico (Figura 15). A estruturação tem início, em termos genéticos, a partir da Orogênese Brasileira no Neoproterozoico e o evento geotectônico que culminou na separação do megacontinente Gondwana no Jurássico-Cretáceo. Ainda segundo os autores, ambos os eventos tectônicos foram responsáveis pela formação de extensas zonas de cisalhamento dúcteis de direção NE-SW e NW-SE que atualmente exercem importante controle na dinâmica da paisagem (COSTA *et al.*, 2020). Na presente pesquisa, foi dada atenção especial aos processos de natureza estrutural associados aos eventos geotectônicos que ocorreram do Mesozoico ao Cenozoico, em especial ao rifteamento, a separação do Gondwana no Cretáceo, formação de ombros de rifte e aos processos vinculados a flexura marginal que resultaram na formação dos maciços cristalinos residuais, por exemplo, o compartimento Baturité e Irauçuba/Uruburetama, e nos processos de agradação que prevaleceram ao longo do litoral no decorrer da evolução pós-cretácea.

De acordo com Maia; Bezerra (2014), a sucessão dos eventos tectônicos acima mencionado é a principal responsável pelas linhas mestras do relevo do Nordeste Setentrional que condicionam a dinâmica geomorfológica atual, estabelecendo o controle estrutural e reorganizando os processos denudacionais no Cenozoico. Ainda segundo os autores, o controle está associado ao condicionamento estrutural das zonas de cisalhamento brasileiras dispostas em faixas paralelas e direcionadas de acordo com os planos de deformação, falhas e fraturas, orientando os processos erosivos que constituem a configuração atual do relevo (MAIA; BEZERRA, 2014).

Figura 15 - Proposta de classificação geomorfológica para o Nordeste Setentrional. Modificado de: COSTA *et al.* (2020).



O quadro paisagístico do Nordeste setentrional, onde está localizada as áreas de interesse da pesquisa, é constituído por diversos compartimentos geomorfológicos resultantes de eventos tectônicos e associados a importantes episódios da evolução

morfotectônica e sob atuação de distintos domínios paleoclimáticos. Na descrição do relevo do nordeste setentrional, Peulvast; Claudino Sales (2002; 2003; 2005; 2006) incluíram processos estruturais vinculados à tectônica mesozoica e cenozoica na interpretação evolutiva. Os autores apresentam uma proposta de evolução do relevo para o nordeste brasileiro baseada na exposição de platôs com origem poligênica. No contexto indicado, a flexura marginal e a subsidência térmica contribuíram de maneira decisiva no processo de inversão do relevo no Cenozoico e, conseqüentemente, resultando na formação dos depósitos correlatos a partir das oscilações do nível de base geral e as zonas de cisalhamento, oriundas da orogênese brasiliana, e que mantiveram o controle estrutural sobre as principais feições de erosão diferencial, retrabalhando escarpas e as linhas de falha (MAIA *et al.*, 2010).

De acordo com Claudino-Sales *et al.* (2020), a evolução do Nordeste do Brasil é caracterizada por fases múltiplas de erosão, deformação, magmatismo, eustatismo, sedimentação e variações climáticas. Em relação as principais morfoestruturas do Nordeste Setentrional do Brasil, uma série de importantes contribuições acadêmicas têm auxiliado a compreender o conjunto de eventos tectônicos que contribuíram na gênese e o desenvolvimento do relevo (BRITO NEVES, 1999; PESSOA NETO *et al.*, 2007; LIMA, 2008; PEULVAST; CLAUDINO-SALES, 2002; PEULVAST *et al.*, 2008; MAIA; BEZERRA, 2014, 2015; ARTHAUD, *et al.*, 2015; CLAUDINO-SALES, 2016; CLAUDINO-SALES *et al.*, 2022; MAIA *et al.*, 2016; PEDROSA JÚNIOR *et al.*, 2016; SANTOS *et al.*, 2022). Segue abaixo, em ordem cronológica, os principais eventos geotectônicos:

- (1) Orogênese Brasiliana (665 - 550 Ma), com a formação do arco magmático Tamboril-Santa Quitéria no interior da Província Borborema (Neoproterozoico).
- (2) Intrusão de granitos tardios e formação de riftes precursores que originaram as bacias de Jaibas e do Parnaíba (Final do Neoproterozoico e início do Paleozoico).
- (3) Abertura da Margem Equatorial Atlântica, formação das bacias sedimentares Potiguar e Araripe, reativação das zonas de cisalhamento com soerguimento de relevos sedimentares e exumação de maciços graníticos e cristas estruturais (Cretáceo Inferior).
- (4) Subsidência térmica e sedimentação da plataforma *offshore* (Cretáceo Superior).

(5) Soerguimento flexural do continente, com início do Paleógeno. Deposição das formações Barreiras e Serra dos Martins (Mioceno), variações climáticas e elaboração das superfícies de aplainamento sertanejas entre o Mioceno e o Pleistoceno.

Segundo Claudino-Sales (2021), as províncias tectônicas refletem segmentos crustais com histórias diversas de formação e respostas singulares aos mecanismos de deformação pós-cretáceos, amplamente aceitos como fatores controladores de macroformas plataformais que constituem o arcabouço da paisagem física. De acordo com Moura-Fé (2017), o processo de separação entre a América do Sul e a África ensejou inicialmente um rifteamento intracontinental que ocorreu durante o Cretáceo Inferior, do início do Berriasiano (145 Ma) ao final do Albiano (100,5 Ma), o qual resultou no soerguimento de volumes significativos de um paleorrelevo vinculado ao longo das estruturas de riftes abortados. Segundo Claudino-Sales (2018), a ruptura da Pangea, na porção que compreende o Nordeste brasileiro, ocorreu durante o Neocomiano (120 Ma), resultando no soerguimento de áreas em forma de "ombros de riftes", o conjunto de relevos situados a leste, o Maciço da Borborema, e os relevos a oeste, os maciços cristalinos do Ceará. No Nordeste Oriental, os riftes gerados durante esta etapa foram na sequência abortados, convertendo-se em bacias sedimentares, por exemplo, nas Bacias do Araripe e a Potiguar.

Para Moura-Fé (2008), na porção Oeste, na área correspondente ao rifte, um amplo relevo montanhoso integrava os maciços de Baturité, Irauçuba/Uruburetama, além dos maciços centrais e do sudoeste do Ceará. Esse conjunto representava o ombro oeste do rifte intracontinental Potiguar, embora mais desenvolvido na época do que atualmente. Peulvast *et al.* (2008) comenta que os ombros de rifte, comparado a estudos na Austrália e África do Sul, erodem relativamente rápido, ou seja, < 40 Ma após sua formação. No entanto, os afloramentos rochosos localmente resistentes e que constituem parte do ombro de rifte podem se manter na paisagem por muito mais tempo como formas de relevo residuais, por exemplo, os alinhamentos Ibiapaba-Baturité.

Claudino-Sales (2016) explica que durante o Aptiano (115 Ma) e o Albiano (97 Ma), a separação definitiva foi empreendida em um regime transformante, engendrando uma margem passiva transformante nesse segmento do Nordeste brasileiro. Ainda segundo a autora, o advento deste episódio induziu novos soerguimentos de maciços cristalinos, em especial no entorno de zonas costeiras.

De acordo com Claudino-Sales; Peulvast (2007), os processos pretéritos foram responsáveis pela formação, entre a Bacia Sedimentar do Parnaíba e o Maciço da Borborema, de um vasto anfiteatro de 450 km aberto em direção ao Oceano Atlântico. Segundo Costa *et al.* (2021), este anfiteatro comporta atualmente um conjunto complexo de formas estruturais soerguidas em direção ao sul e amplamente retrabalhadas pela erosão (a zona de rifteamento Cariri/Potiguar), com platôs tabulares, bacias de afundamento e corredores de erosão diferencial bordejadas por relevos herdados de falhas. Dessa maneira, a herança Mesozoica, decorrente do processo de rifteamento que ocasionou a separação da América do Sul da África, proporcionou o arcabouço para atuação dos processos denudacionais durante o Cenozoico (Figuras 16 a 18) (COSTA *et al.*, 2020). Segundo estes autores, os processos erosivos acabaram por gerar distintas unidades geomorfológicas, orientadas principalmente pela dissecação fluvial, com exposição e remobilização de mantos de alteração oriundos das variações de domínios morfoclimáticos no Cenozoico. De acordo com Maia; Bezerra (2014), a atividade tectônica durante o Cenozoico também contribuiu na evolução de feições presentes em distintas unidades geomorfológicas.

Figura 16 - Representações de mapas paleogeográficos que apresentam os períodos: (A) Pré-rifte e (B) Rifteamento Intracontinental. Modificado de: PEULVAST (2015) e MOURA-FÉ (2017).

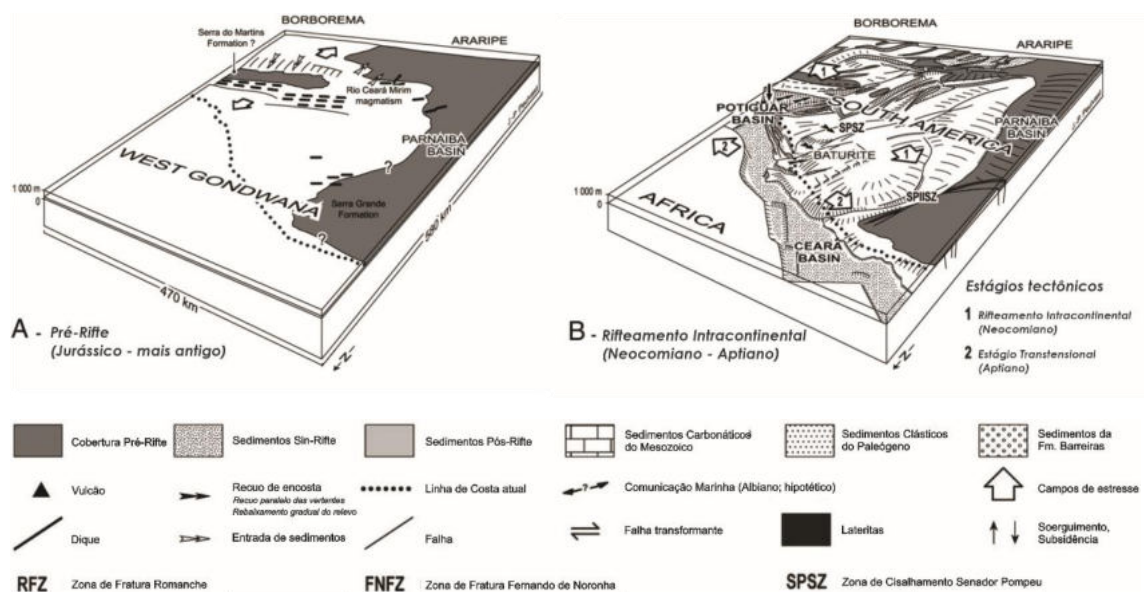


Figura 17 - Representações de mapas paleogeográficos que apresentam os períodos: (C) Pós-Rifte e de Abertura Oceânica e (D) Estágio Drifte, com o soerguimento da margem recém formada pela Flexura Marginal. Modificado de: PEULVAST (2015) e MOURA-FÉ (2017).

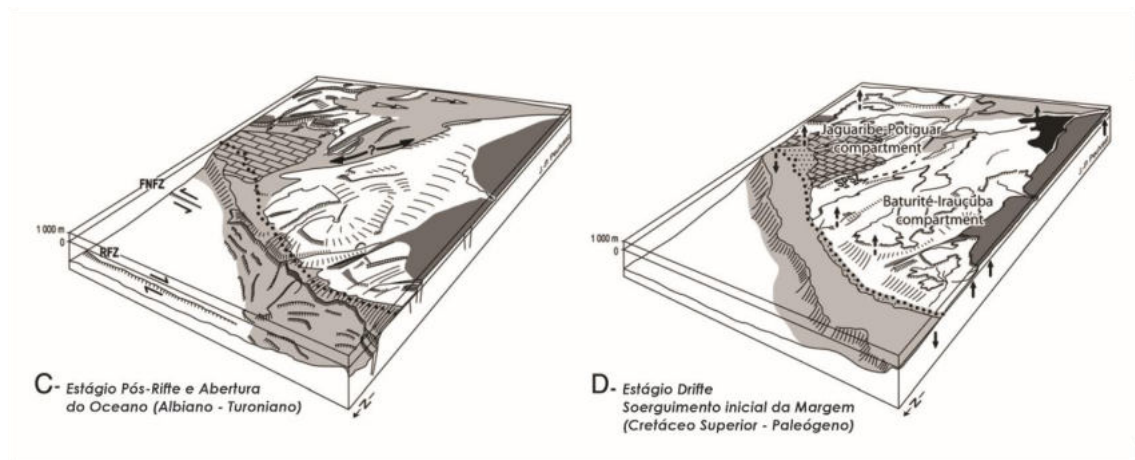
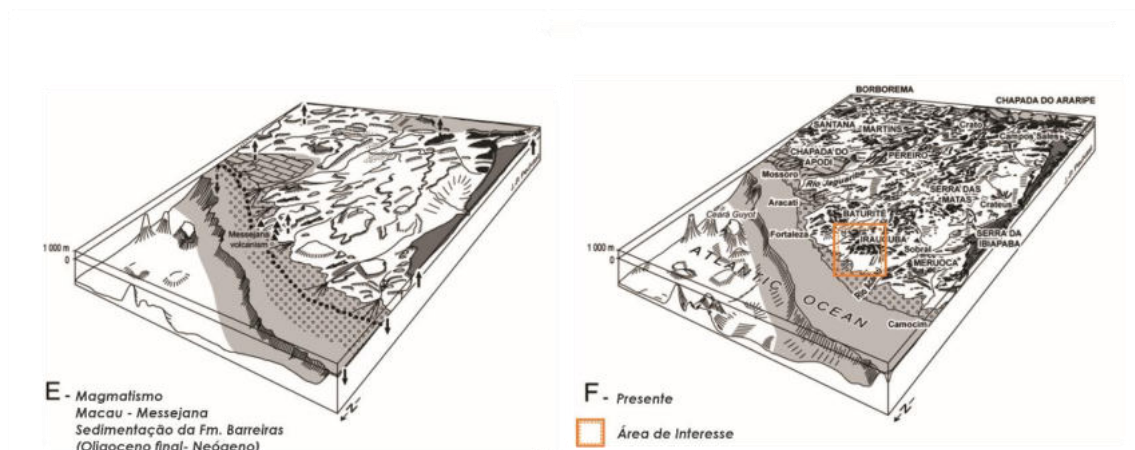


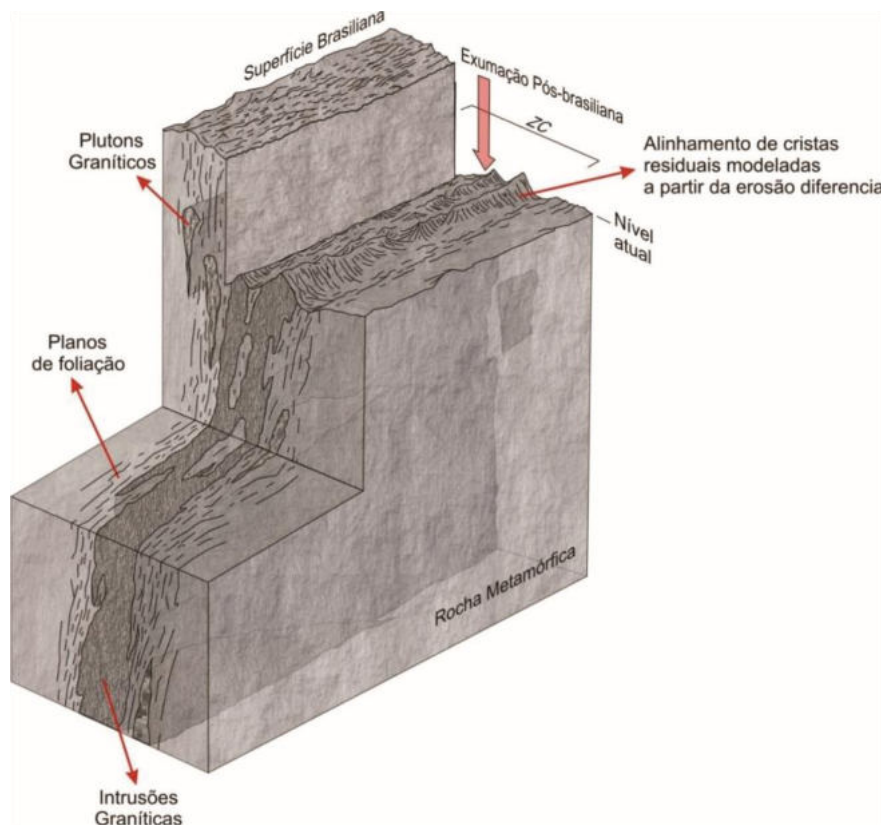
Figura 18 - Representações de mapas paleogeográficos que apresentam os períodos: (E) Magmatismo Macau-Messejana e Sedimentação da Formação Barreiras e (F) Atual compartimentação de relevos do Nordeste Setentrional. Modificado de: PEULVAST (2015).



Maia; Bezerra (2014) comentam que o relevo do Nordeste do Brasil tem sua configuração submetida a disposição das zonas de cisalhamento dúcteis e suas reativações. Os autores apontam dois aspectos fundamentais neste controle: (i) exercido pela erosão diferencial como ocorrida em zonas de cisalhamento caracterizadas pela ocorrência de corpos graníticos, mais resistentes à erosão e constituem sobressaltos topográficos na paisagem; (ii) exercido pela reativação das zonas de cisalhamento que geraram soerguimentos e abatimentos de acordo com os planos de deformação brasileira, caracterizando notavelmente o relevo através da disposição de *trends* de lineamentos estruturais. Na figura 19 é possível observar a formação de lineamentos paralelos, de resistência diferenciada em relação a denudação geoquímica ou física, favorecendo

através da erosão diferencial o desgaste das faixas menos tenras de acordo com os planos de deformação e a manutenção dos corpos intrusivos, que passam a ser externados no relevo como cristas residuais de origem estrutural (MAIA; BEZERRA, 2014).

Figura 19 - Intrusões de magma granítico na rocha metamórfica encaixante e a atuação da erosão diferencial. Fonte: MAIA; BEZERRA (2014).



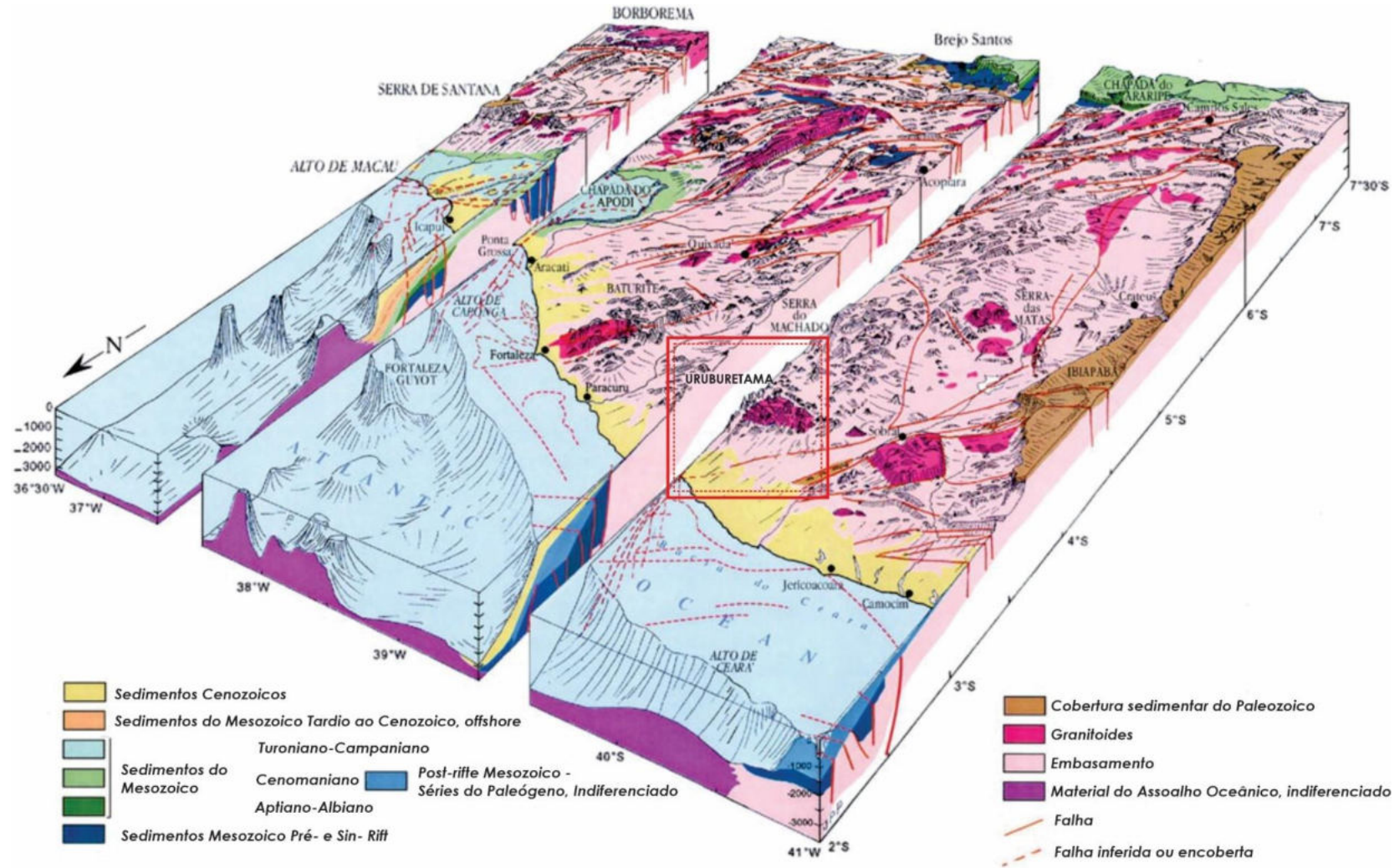
Liu (1984) elabora uma revisão sobre a definição do termo lineamento a partir dos trabalhos de O'Leary *et al.* (1976) e Sabins Junior (1978). De acordo com O'Leary *et al.* (1976), os lineamentos são feições lineares da crosta terrestre, mapeáveis e podem ser simples ou compostas, cujas partes encontram-se alinhadas de modo retilíneo ou levemente curvada. Um lineamento difere dos padrões das feições adjacentes e presumivelmente reflete fenômenos de subsuperfície. Por sua vez, Sabins (1978), comenta que lineamentos são feições lineares da superfície terrestre (relevo, limites lineares entre distintos tipos de terrenos ou rupturas dentro de uma unidade uniforme), podendo ser geomórficos ou tonais (por exemplo, a ocorrência de um limite reto entre áreas com tons contrastantes ou uma faixa realçada sobre um fundo uniforme em imagem

sob análise), e podem representar uma zona de fraqueza estrutural. Cursos de água retilíneos e segmentos alinhados de vales são também expressões geomórficas características de lineamentos.

Sintetizando, no contexto geomorfológico, lineamentos são representados no terreno por variações na elevação dos terrenos, alinhamento de cristas, segmentos de escarpas, trechos de drenagem e vales, que refletem as principais linhas de fraqueza regionais e podem indicar locais de ocorrência de estruturas geológicas importantes na investigação da influência estrutural e/ou tectônica na evolução do relevo (MAIA; BEZERRA, 2014).

De acordo com Maia; Bezerra (2014), a sucessão dos eventos tectônicos desencadeados no Nordeste brasileiro é a principal responsável pelas linhas mestras do relevo do Nordeste Setentrional que condicionam a dinâmica geomorfológica atual, estabelecendo o controle estrutural e reorganizando os processos denudacionais no Cenozoico (Figura 20); sendo o controle associado ao condicionamento estrutural das zonas de cisalhamento brasileiras dispostas em faixas paralelas e direcionadas de acordo com os planos de deformação, falhas e fraturas e, assim, orientando os processos erosivos que constituem a configuração atual do relevo (MAIA; BEZERRA, 2014).

Figura 20 - Esquete bloco-diagrama do Nordeste brasileiro. Modificado de: PEULVAST *et al.* (2002).



Moura-Fé (2008) comenta que, após o período de formação de riftes no eixo Cariri/Potiguar, os abortamentos dos riftes junto a formação das bacias sedimentares do Araripe e Apodi e a abertura de fossas transformantes, além da subsidência térmica das bacias e deposição das coberturas superiores das mesmas, uma nova etapa se apresentava no contexto evolutivo do Nordeste Setentrional, a flexura marginal. Ainda segundo o autor, a flexura marginal tem sua origem situada, de modo mais preciso, durante o Cretáceo Superior. Costa *et al.* (2020) explicita que a flexura marginal está vinculada com a instalação do Oceano Atlântico Equatorial, sendo um processo resultante da diferença de densidade entre materiais litológicos continentais e oceânicos, provocando o rebaixamento do litoral e elevação do continente (CLAUDINO-SALES, 2007) e contribuindo para a intensificação dos processos erosivos no interior e, conseqüentemente, agradacionais na zona costeira. De acordo com Claudino-Sales (2016), a zona costeira apresenta também evidências de controle estrutural associado com a evolução Cretácea da margem continental nordestina.

A importância da flexura marginal é dada por se constituir uma etapa subsequente da evolução morfoestrutural do Nordeste Setentrional e se configura através do soerguimento flexural do interior do continente e subsidência da zona costeira, em curso até o presente (CLAUDINO-SALES; PEULVAST, 2006). Peulvast; Claudino-Sales (2000) explicitam que o processo de flexura marginal tende a elevar as porções interioranas do continente, tornando-as mais altas topograficamente que o setor litorâneo e nivela o soerguimento costeiro com a superfície do oceano. O processo de soerguimento resulta em um suave declive que têm início no interior do continente, mas que segue de forma contínua em direção ao Oceano Atlântico. Moura-Fé (2008) comenta que a partir do Mioceno-Plioceno, iniciou-se a acumulação sobre a Fachada Atlântica de fácies de origem continental e que constitui a maior parte dos sedimentos da Formação Barreiras. Segundo Claudino-Sales (2002), a Formação Barreiras se instalou sobre os relevos precedentes situados próximos a costa e, devido a declividade resultante da atuação marginal, a zona costeira funcionou como uma área de trânsito, do continente para a plataforma continental, dos sedimentos resultantes da erosão dos relevos continentais.

Desse modo, a flexura marginal constituiu o principal processo morfotectônico no período pós-rifte, juntamente com os pulsos de soerguimento, estabelecendo a configuração morfoestrutural que ao longo do Cenozoico foi sendo retrabalhada pelos processos intempérico-erosivos (MOURA-FÉ, 2008). No entanto, cabe ressaltar que as

linhas mestras as quais orientam os processos erosivos e deposicionais são, na maior parte das vezes, as formas de relevo herdadas de eventos geotectônicos deflagrados no Cretáceo (CLAUDINO-SALES; PEULVAST, 2007; CLAUDINO-SALES, 2016).

2.5 Denudação pós-cenomaniana e o registro deposicional

A denudação continental, portanto, foi responsável pela diferenciação das formas de relevo, resultando em um complexo mosaico geomorfológico que expressa em superfície, os condicionantes estruturais e litológicos que conduziram os processos erosivos e deposicionais até a atual morfologia da Província Borborema (MAIA; BEZERRA, 2014; COSTA *et al.*, 2020). De acordo com Claudino-Sales (2021) a evolução do relevo regional, junto aos arranjos geotectônicos, é caracterizada devido a repetida retomada da erosão diferencial sobre a porção continental, principalmente a partir da abertura final do Oceano Atlântico no Cretáceo e o estabelecimento de um nível de base geral.

Peulvast *et al.* (2008) indicam que a paisagem do Nordeste brasileiro é o resultado de um nível de base episodicamente flutuante, mas decrescente desde o Cretáceo Médio, e do arqueamento da crosta terrestre entre as bacias do interior do Araripe e do litoral Potiguar. Após a abertura oceânica no Aptiano e a formação da margem passiva, o desenvolvimento da paisagem foi impulsionado por uma elevação e/ou soerguimento mantendo suas cotas topográficas de maiores altitudes situadas a $\cong 300$ km da costa. O flanco deste antigo relevo voltado para o mar foi erodido e atualmente constitui as superfícies aplainadas circundadas por um conjunto de maciços cristalinos residuais e escarpas de relevos cuestiformes que compõe um aspecto semicircular na paisagem do Nordeste Setentrional.

De acordo com Peulvast *et al.* (2008), as estimativas da massa erodida na costa só podem ser inferidas a partir de dados referentes a sedimentação *offshore*. No entanto, a maior parte dos sedimentos está retida na margem equatorial brasileira, o que permite que o sistema sob investigação seja tratado relativamente como fechado desde o Cenomaniano (Cretáceo Superior). Na Bacia do Ceará, o influxo de sedimentos do continente parece ter permanecido moderado e muitas vezes descontínuo. A diversidade de controles estruturais, junto a forte assimetria dos padrões de drenagem observada no embainhamento Jaguaribe - Piranhas (principais sistemas de drenagem do Nordeste Setentrional), ao longo da margem equatorial (MATOS, 2000), podem explicar a

heterogeneidade nos padrões deposicionais. É importante igualmente considerar que um hiato não deposicional de 50 Ma separou o Cenomaniano (Cretáceo Superior) do final do Eoceno na Sub-bacia do Piauí - Camocim, um fluxo de sedimento mais contínuo é registrado no Acaraú e Sub-bacias Icarai, e pelo menos seis eventos erosivos ou não deposicionais são reconhecidos entre as unidades deposicionais do Paleoceno Inferior ao Oligoceno Inferior na Sub-bacia do Mundaú. Durante o Oligoceno foi registrado as maiores taxas de sedimentação, ao menos na Sub-bacia do Mundaú. Apesar dos níveis do mar relativamente altos que prevaleceram até as regressões de Tortoniano, apenas sedimentos terrígenos foram depositados na superfície da planície costeira de erosão. Embora a Formação Barreiras, que é o equivalente terrestre dos sedimentos siliciclásticos do Mioceno Inferior (LIMA, 2008) da plataforma interna, seja atribuída como uma resposta ao soerguimento da crosta (flexura marginal), sendo que o aumento relativo no fornecimento clástico do interior também está provavelmente ligado a uma marcante mudança nas condições paleoambientais em relação à aridez e semiaridez de longo prazo no Nordeste do Brasil, existente provavelmente há pelo menos 13 Ma (HARRIS; MIX, 2002). A denudação subsequente da Formação Barreiras é associada às flutuações do nível do mar durante o Plioceno e o Quaternário.

2.5.1 Controle eustático e erosão durante o período Cenozoico

De acordo com Peulvast *et al.* (2008), os períodos posteriores ao Campaniano (83-72 Ma) correspondem a uma tendência a longo prazo de queda progressiva em relação aos níveis do mar até que os ciclos oscilatórios de amplitude crescente do Mioceno final em diante trouxeram os níveis do mar +140 metros durante o Mioceno Médio para -120 metros durante o Último Máximo Glacial (UMG). Ao colocar temporariamente o sistema sedimentar fora de equilíbrio, espera-se que as áreas baixas aumentem a curto prazo (<100 ka) a erosão local mais do que as oscilações de longo prazo (HARRIS; MIX, 2002; MOLNAR, 2004). Os efeitos de tais eventos de remodelação da paisagem do Cenozoico tardio ligados a instabilidades climáticas globais de ciclo curto são confirmados no registro sedimentar pela deposição das séries sedimentares terrígenas da Formação Barreiras (*onshore*) e Formação Tibau (*offshore*) e a subsequente dissecação fluvial do Barreiras. Estes refletem eventos de remoção de regolito em pedimentos e escarpas em toda porção interiorana. A formação da cunha do Barreiras pode ser explicada pela subsidência na costa, o que teria proporcionado espaço de acomodação na plataforma

interna para o influxo de sedimentos. A sedimentação continuou até que a taxa de subsidência foi substituída pelas taxas de queda do nível do mar. Nessa fase crítica, possivelmente já no Mioceno médio (SHIMABUKURO; ARAI, 2001; PESSOA NETO, 2003; ARAI, 2006) e certamente no final do Plioceno, incisão de foi iniciado sobre o amplo avental de leques aluviais do Barreiras. A maior abundância de depósitos continentais constituídos por quartzo grosso e seixos de quartzito e cascalho que ocorre no entorno de Fortaleza e a oeste da zona de cisalhamento Senador Pompeu em relação a costa leste pode refletir a proximidade de relevos montanhosos mais altos e/ou uma menor taxa de subsidência na região de Baturité-Fortaleza (CLAUDINO SALES, 2002). As suaves rampas de sedimentos provenientes do Barreiras que descem em direção ao oceano foram provavelmente causadas pelos contínuos efeitos de rebaixamento da parte interiorana do Sertão. A sua dissecação a partir das principais drenagens que formam os tabuleiros costeiros também reflete essa deformação muito suave. No interior, além do nó flexural, existem evidências apenas de soerguimento, erosão e possível recuo da escarpa.

2.5.2 Estimativas de taxas de erosão para o Nordeste Setentrional

Segundo Peuvast *et al.* (2008), uma integração das profundidades de denudação pós-Cenomaniano ao longo do eixo Jaguaribe-Piranhas - desde o máximo de 600 metros do Araripe até 0 metros na costa - resultaria em 1.470 metros de sedimentos descompactados distribuídos ao longo da margem *offshore* de 120 km de largura (Plataforma, Talude continental e Margem continental). Este cálculo é baseado em densidades médias de 2.800 kg/m³ para os substratos rochosos não alterados e 2.000 kg/m³ para os produtos terrígenos. Ainda segundo Peulvast *et al.* (2008), a recompactação do sedimento mencionado anteriormente por um fator de 10% se obtém uma pilha de 1.320 metros de espessura distribuída em uma largura média de acomodação de 120 km. É necessário igualmente considerar que os sistemas de drenagem Jaguaribe - Apodi-Piranhas (ocupam 73% da área total do Nordeste Setentrional), atualmente depositam os sedimentos a apenas 30% da extensão linear da margem (ou seja, a porção *offshore* da Bacia Potiguar), e que maiores espessuras de sedimentos na porção *offshore* deveriam ser esperados neste segmento. Uma estimativa grosseira nesta base sugere que espessuras de 3.200 metros para a série pós-rifte devam existir naquele depocentro, e até 6.000 metros se depositada na meia largura, principalmente na plataforma externa e talude continental.

Esses números correspondem efetivamente a espessuras conhecidas de séries pós-desdobramento naquela área (MORAIS-NETO, 1999; MATOS, 2000; PESSOA-NETO, 2003). Considerando que mais de 3.000 metros de sedimentos em momento pós-rifte foram depositados na porção *offshore* da Bacia Potiguar (MORAIS-NETO, 1999), as espessuras atingem apenas 1.000 - 2.500 metros na Sub-bacia do Piauí - Camocim e 1.000 - 2.000 metros na Sub-bacia do Mundaú.

É importante destacar que a espessura média no final do Mioceno e de sedimentos mais recentes da Formação Barreiras e Tibau (150 - 200 metros) estendendo-se por uma faixa de 100 km de largura medida em perfis da Bacia Potiguar elaborados por Pessoa-Neto (2003) representaria uma espessura máxima erodida de 50 a 70 metros em uma zona interior de 300 km de largura, a uma taxa de < 10 m/Ma em um intervalo de $\cong 10$ Ma. Isso corresponde à taxa média de desnudação pós-Cenomaniana estimada a partir dos critérios de inversão da bacia utilizados no modelo proposto por Peulvast *et al.* (2008).

2.6 Compartimentação geomorfológica e morfoestrutural do estado do Ceará

Segundo Claudino-Sales (2016), os relevos que emolduram a geomorfologia regional correspondem à estruturas que foram desenvolvidas ou organizadas durante o processo de rifteamento intracontinental que precedeu a abertura oceânica no Cretáceo Médio e à formação das fossas transformantes que definiram a margem equatorial brasileira e a abertura do Atlântico durante o Cretáceo Superior, bem como à estruturas mais antigas do Paleozoico Inferior, amplamente trabalhadas a partir da erosão diferencial, e que foram reativadas no decorrer desses eventos cretáceos. Nas porções interioranas do arranjo morfoestrutural, as baixas superfícies de aplainamento substituíram a vasta superfície paleozoica deformada e que anteriormente ocupava a área no período anterior ao Cretáceo, atualmente conservada somente em compartimentos fossilizados. A atual organização morfoestrutural do relevo nordestino setentrional indica uma ampla condução de processos geomorfológicos posteriores a partir da história de evolução geotectônica do Cretáceo. Os episódios geotectônicos expressam características tão profundas na paisagem que de modo geral parecem ter sido pouco alterados durante os episódios evolutivos durante o Paleógeno e Neógeno (PEUVALST; CLAUDINO-SALES, 2004; CLAUDINO-SALES, 2002).

2.6.1 Geomorfologia de Itapipoca

Na presente tese, a área de estudo encontra-se no setor setentrional do Nordeste do Brasil. A área é caracterizada por relevos desenvolvidos em unidades litológicas distintas, com destaque para os tabuleiros costeiros, as superfícies de aplainamento e os maciços cristalinos residuais. Em análise prévia de imagens obtidas através da ALOS-PALSAR, foi possível notar os padrões de dissecação regional orientados a partir da Zona de Cisalhamento Forquilha e a ocorrência de tanques naturais de acordo com os principais *trends* de fraturas sobre o embasamento cristalino. As altitudes variam de 0 - 250 metros na faixa costeira (tabuleiros costeiros) em direção a porção interiorana (superfície aplainada) do município de Itapipoca, onde podem alcançar cotas altimétricas superiores a 1000 metros no Maciço de Uruburetama (maciço cristalino residual).

De acordo com a proposta de classificação geomorfológica do Nordeste Setentrional (COSTA *et al.*, 2020), os tanques naturais fossilíferos encontram-se distribuídos sobre a Superfície Sertaneja 1, uma denominação a qual se refere as superfícies de aplainamento que constituem o quadro paisagístico. A Superfície Sertaneja 1 (SS1) compreende setores topograficamente mais baixos, correspondendo as áreas onde os processos de aplainamento se mostram mais evidentes. De acordo com Costa *et al.* (2020), a unidade SS1 está localizado entre as cotas de 50 e 250 m de altitude, apresentando morfologias planas ou levemente onduladas. Ressalta-se ainda que a complexidade litológica associada as superfícies aplainadas têm dificultado sua caracterização, pois o metamorfismo associado a litologia dessas áreas condiciona processos de erosão diferencial entre superfícies e maciços cristalinos (COSTA *et al.*, 2020).

Maia; Bezerra (2014) afirmam de modo reiterado que o processo de denudação foi e ainda é induzido a partir da ação fluvial que segue a orientação estabelecida por estruturas rúpteis e dúcteis do embasamento pré-cambriano. Em geral, as porções mais resistentes a erosão encontra-se associadas a núcleos graníticos exumados e que constituem na paisagem interiorana sobressaltos topográficos que se distinguem da monotonia das superfícies aplainadas (PEULVAST *et al.*, 2006).

Segundo Costa *et al.* (2020), as elevadas taxas de erosão desencadeadas, em especial, pelo contexto climático semiárido, limitam a pedogênese, tornando os solos da superfície sertaneja rasos. Desse modo, é comum que o embasamento cristalino seja exposto. Cabe ressaltar que as condições de aridez e semiaridez começaram a atuar no

Nordeste brasileiro há pelo menos 13 Ma (HARRIS; MIX, 2002). E, de acordo com Costa *et al.* (2020), nas fases úmidas, com o predomínio da pedogênese sobre a morfogênese, espessos regolitos se originaram, tendo os processos erosivos limitados aos vales fluviais. Nos casos de predomínio da morfogênese sobre a pedogênese, intensos processos erosivos remobilizaram os mantos de alteração situados nas escarpas para os fundos de vale. Ainda segundo os autores, os processos erosivos vinculados ao regime climático favoreceram a remoção de fácies mais finas deixando apenas os blocos parcialmente intemperizados do saprolito. A remoção ocorre a partir do escoamento superficial difuso e sua capacidade proporcional ao volume escoado (COSTA *et al.*, 2020). A exumação do embasamento diaclasado expõe os blocos parcialmente meteorizados que passam a caracterizar a paisagem sertaneja.

Em relação aos granitos orogênicos estes são interpretados como resultado da intrusão em regiões extensionais associadas as estruturas tectônicas locais e regionais (NEVES, 2012). Na Província Borborema essas estruturas são representadas, principalmente, por zonas de cisalhamento de direção NE-SW e E-W (VAUCHES *et al.*, 1995). As zonas de cisalhamento são condutos por onde pode circular um grande volume de fluidos. Na maior parte das vezes, a ocorrência de corpos graníticos está vinculada a presença de zonas de cisalhamento (ALMEIDA; ULBRICH, 2003).

Segundo a classificação de Costa *et al.* (2020), o Maciço de Uruburetama corresponde a uma das seis grandes subunidades de maciços cristalinos que pontuam o relevo do Nordeste Setentrional. De acordo com os autores, os maciços cristalinos são relevos de características montanhosas, na maior parte das vezes isoladas, e com dissecação acentuada, resultante da ação intempélica e erosiva pretéritas e atuais. A atuação da erosão diferencial tem ampla relevância, uma vez que os lineamentos têm condicionado a formação de vertentes, escarpas e desníveis topográficos (COSTA *et al.*, 2020).

Já para Claudino-Sales; Peulvast (2007), os maciços pré-litorâneos de Baturité, Uruburetama, Aratanha, Maranguape e Conceição distribuem-se em vários volumes de relevos isolados. A ausência de falhas transversais, o qual poderia sugerir uma divisão tectônica, é substituída pela hipótese de erosão consecutiva ao soergimento do conjunto durante o Neocomiano, ou seja, anteriormente ao Cretáceo. Ainda de acordo com os autores, o conjunto de maciços que constitui o relevo atual corresponde a resquícios da

existência do ombro de rifte da Bacia Potiguar, sendo submetido no período pós-Neocomiano a novos soerguimentos vinculados ao processo de flexura marginal.

De acordo com Lima (2018), o Maciço de Uruburetama apresenta disposição predominante WNW-ESE e NW-SE, ocupando uma área de 930 km² e com níveis altimétricos que variam de 500 - 800 metros e, em alguns pontos, alcançando cotas superiores a 1.000 metros. Ainda segundo a autora, o desnível topográfico é justificado em virtude da resistência litológica frente à erosão diferencial o qual foi estabelecida e distinguiu o núcleo intrusivo, constituído por granitoides, da depressão erosiva rebaixada circundante constituída por uma associação de terrenos granítico-migmatítico (LIMA, 2018).

Para Lima (2018), o Maciço de Uruburetama pode ser compartimentado nas seguintes feições morfológicas: platô; vertente seca e vertente dissecada úmida baseando-se em suas características naturais e topográficas.

O platô corresponde a uma topografia ligeiramente plana que se situa acima dos 500 metros de altitude, expondo superfícies de aplainamento dissecadas; e que a partir dos 600 metros de altitude é caracterizado como áreas elevadas e suavemente aplainadas do maciço. Enquanto, as declividades das vertentes se acentuam de acordo com o entalhe da rede de drenagem.

A vertente dissecada seca (porção sul-ocidental) corresponde ao relevo mais dissecado e degradado, prevalecendo formas de topo aguçados e declividades que variam entre ondulado (8 - 20%) e forte ondulado (20 - 45%), em sua maior extensão, tende ao montanhoso (45 - 75%). Já a vertente dissecada úmida (porção norte-oriental) do Maciço de Uruburetama apresenta cotas altimétricas entre 100 - 500 metros, prevalecendo formas de topos convexos e vertentes curtas, com declividades que variam entre forte ondulado (20 - 45%) em sua maior extensão e montanhoso (45 - 75%) onde o entalhe da drenagem é acentuado.

Além dos tabuleiros que consistem em feições típicas da zona costeira, com relevo predominantemente tabular, resultante da erosão corrida no continente que se acumulou na faixa litorânea. Esta unidade morfológica constitui-se como resultante de um estágio de transição do interior para costa, evidenciada através da baixa declividade em relação as Superfícies Aplainadas e a Pré-litorânea. Esses Tabuleiros Costeiros são sustentados pela Formação Barreiras, de origem continental, transicional e marinha (ARAÍ, 2005), com idade entre 23 Ma e 17 Ma (LIMA, 2008). Apresenta matriz argilosa com bolsões

e/ou níveis de seixos, na maior parte dos afloramentos ocorrem porções ferruginosas e concreções lateríticas. Em geral, a Formação Barreiras encontra-se bem consolidada e recoberta por uma camada cascalhosa ou crosta laterítica (COSTA *et al.*, 2020).

No Ceará, a Formação Barreiras recobre o embasamento com formas predominantemente tabulares e recortadas pela rede de drenagem. Na porção interiorana do estado, onde se encontra o Maciço de Uruburetama, a Formação Barreiras reflete uma interessante disposição espacial, podendo ter estendido - da zona costeira até o sopé desse maciço - por leitos conglomeráticos espessos de 10 a 20 m, assim como ocorrem em relação a outros maciços cristalinos (COSTA *et al.*, 1979). No entanto, no prolongamento em direção à praia, esses sedimentos conglomeráticos desaparecem, cedendo espaço a acumulações tipicamente arenosas e argilosas, interpretadas aqui como resultante de um provável retrabalhamento dos depósitos conglomeráticos, provavelmente pela ação de escoamentos torrenciais e da acumulação de fácies litorâneas nos sedimentos Barreiras (CLAUDINO-SALES, 2016).

Segundo Claudino-Sales (2016), os sedimentos do Barreiras podem assim ter sido parcialmente evacuado pela ação do rio Mundaú, que nasce no Maciço do Uruburetama, possui aproximadamente 85 km, e associado a outros pequenos cursos de água (córregos Trairi e Cruxati), drena uma área de aproximadamente 3.100 km² até a sua desembocadura.

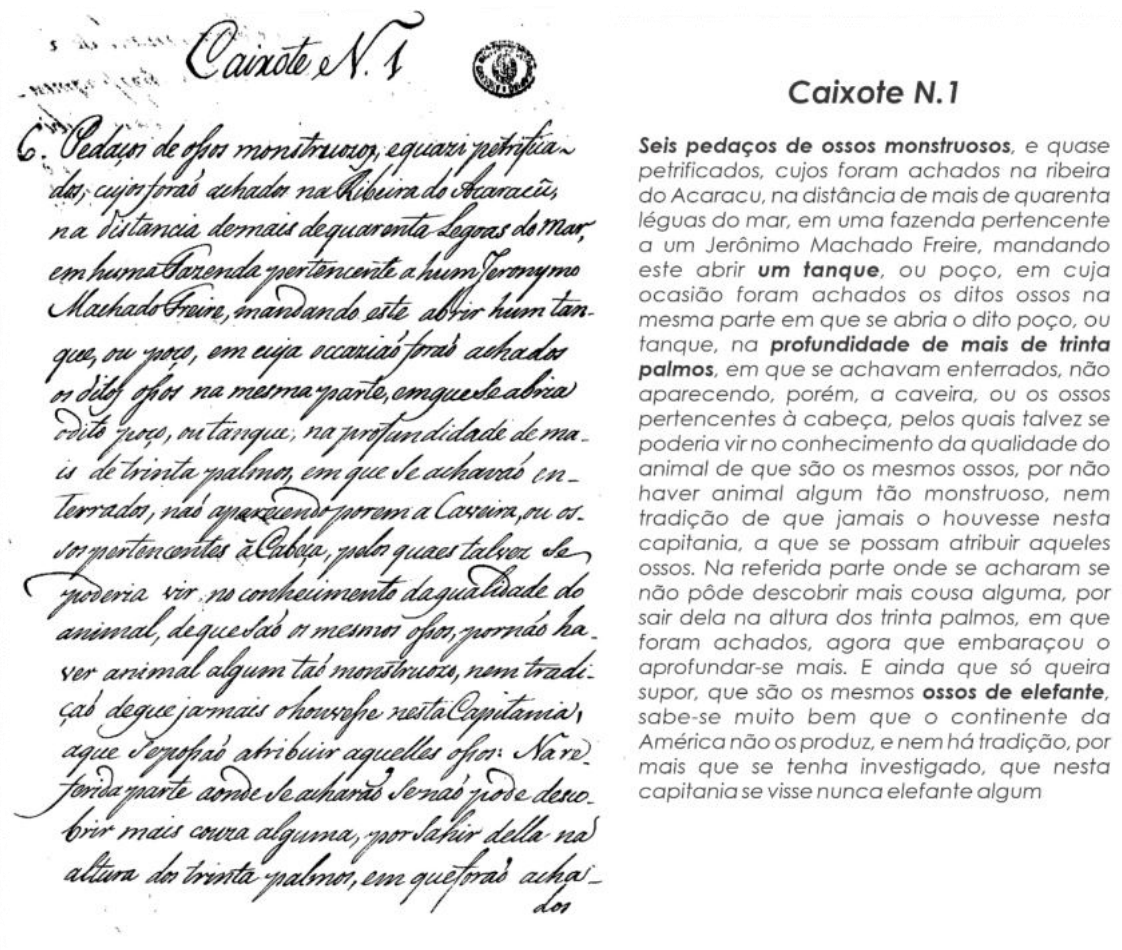
3 OS TANQUES NATURAIS

No atual capítulo são apresentadas uma série de informações reunidas a partir do levantamento bibliográfico sobre tanques naturais, depósitos de tanque, nomenclatura empregada e hipóteses que contribuíram nos estudos sobre a origem e o desenvolvimento de tanques fossilíferos no nordeste brasileiro, em especial na região do semiárido.

3.1 Histórico dos estudos sobre tanques naturais no semiárido brasileiro

As primeiras referências que se tem conhecimento em formato de ofício ou carta sobre tanques naturais fossilíferos e a escavação de depósitos de tanque no território nacional datam do final do século XVIII (Figura 21) (XIMENES, 2006a; FERNANDES *et al.*, 2013) e início do século XIX (CASAL, 1817a, 1817b; HENDERSON, 1821; GRAHAM, 1824; SPIX; MARTIUS, 1824, 1828). As expedições científicas que percorreram os estados do nordeste, em particular a área que hoje integra o chamado semiárido brasileiro, reaproveitaram o termo "tanque" para denominar áreas escavadas ou mesmo ao referir-se diretamente sobre as depressões naturais que ocorriam no embasamento cristalino, onde foram coletados inúmeros fósseis de idade pleistocênica (BURLAMAQUE, 1855, 1856; KRATIF, 1858; CAPANEMA, 1866; HARTT, 1870, 1941; BRANNER, 1902, 1915, 1948; MORAES, 1924, 1928). A partir da metade do século XIX, os tanques naturais tornaram-se feições geomorfológicas de referência com enorme potencial para a investigação de material paleontológico. Entre os anos de 1848 e 1862, por exemplo, o Museu Nacional empreendeu, por iniciativa do então diretor Frederico Leopoldo Cesar Burlamaque (1803 - 1866), custosas expedições que trouxeram ao Rio de Janeiro uma grande quantidade de fósseis da megafauna pré-histórica do Nordeste do Brasil, sendo a maior parte recuperada a partir da escavação de cacimbas sobre depósitos sedimentares que colmatavam o interior de tanques naturais (FERNANDES *et al.*, 2007, 2010, 2012).

Figura 21 - Primeira página do relatório remetido por João Batista de Montauray a Martinho de Mello e Castro em 25 de outubro de 1784. O relatório informa o envio de ossos monstruosos provenientes da escavação de um tanque natural na região do vale do rio Acaraú, no estado do Ceará. A transcrição segue ao lado do relatório oficial. Fonte: FERNANDES *et al.* (2013); ARQUIVO HISTÓRICO ULTRAMARINO, Cx. 10, Doc. No. 609, p. d609f.



Os modelos prévios para a origem dos tanques naturais baseavam-se na observação de três importantes situações, em ambiente subaéreo, para a formação dessas cavidades. Embora muitos tanques tenham sido analisados e descritos ao longo dos séculos, principalmente em termos de conteúdo fossilífero, pouco se tem discutido sobre os processos responsáveis pela sua origem (WALDHERR *et al.*, 2017a). A partir da segunda metade do século XIX até meados dos anos de 1990, os modelos propostos para a origem dos tanques no nordeste brasileiro apresentavam três situações: (i) processo de evorsão e cavitação; (ii) o fator composicional do embasamento cristalino; e (iii) a influência do sistema de fraturas e diáclases, sendo este responsável pelo estabelecimento de áreas preferenciais ao intemperismo físico-químico em condições subaéreas (CAPANEMA, 1866; BRANNER, 1915; MORAES, 1924, 1928; MORAES RÊGO, 1926;

DOMINGUES, 1952; ROLIM, 1974, 1982; PAULA COUTO, 1980; SANTOS, 1982; OLIVEIRA, 1989; OLIVEIRA *et al.*, 1989; OLIVEIRA; HACKSPACHER, 1989; MABESOONE; CASTRO, 1975; MABESOONE *et al.*, 1990; GUÉRIN, 1993).

É interessante notar que o modelo vinculado ao processo de evorsão/cavitação tenha se mantido no meio acadêmico por mais de um século como principal referência para a formação dos tanques naturais no semiárido brasileiro. O modelo é baseado em um processo associado a um tipo específico de abrasão (corrasão) que é provocado pelo movimento turbilhonar entre os clastos rochosos e/ou o colapso de bolhas de gás sobre o leito rochoso de canais fluviais. Um dos primeiros registros do emprego deste modelo, mesmo que de forma indireta, para os tanques naturais brasileiros é de autoria de Guilherme Schüch de Capanema (1824 - 1908), também conhecido pelo título de Barão de Capanema¹¹, responsável pela seção geológica da Comissão Científica de Exploração entre os anos de 1859 e 1861. No trabalho intitulado *Decomposição dos Penedos no Brasil*, o Barão de Capanema expressa um breve comentário sobre a suposta origem de um tanque natural fossilífero associada ao processo de evorsão, deduzindo a dinâmica fluvial como principal responsável pela formação da cavidade, a saber:

"[...] Existe entre Canindé e São Francisco uma colina que tem em cima uma pequena chapada um pouco inclinada, em um dos pontos havia uma depressão; por um exame atento se conhecia que havia sido um poço em leito de rio, os sertanejos são atilados em descobrir esses lugares, aí cavaram para ajuntar água, e encontraram camadas de areia, seixos rolados e ossadas de animais gigantescos completas, pois referiam a existência de queixadas, vértebras, costelas, omoplatas, tíbias e fêmures, vi alguns fragmentos, porém quando fui lá fazer a escavação anteciparam-me as águas e inundaram o tanque, apenas pude verificar a existência do antigo riacho e ossos [...]" (CAPANEMA, 1866, p. 17).

O tanque natural fossilífero descrito pelo Barão de Capanema encontra-se em um platô na alta vertente de um domo granítico, situada entre a localidade de Canindé de São Francisco, na porção interiorana da então Província do Ceará (CAPANEMA, 1866). O

¹¹ Em 1849, o Prof. Guilherme Schüch foi auxiliar de Frederico Leopoldo Cesar Burlamaque no Museu Nacional. O Barão de Capanema deixou uma série de trabalhos associados a petrografia, a decomposição de rochas em clima tropical, aos terremotos no Brasil, aos sambaquis, a origem da seca do Nordeste, aos depósitos de fosfato em Fernando de Noronha, e etc., tendo sido o primeiro a confrontar a hipótese de Agassiz sobre uma glaciação geral na América do Sul (PEREIRA, 1945).

trabalho torna-se uma das referências a partir da metade do século XIX, estabelecendo no meio acadêmico uma das primeiras explicações sobre os processos de formação dos tanques naturais.

Outro pesquisador a propor uma origem para os tanques no semiárido brasileiro, ainda no século XIX, foi o geólogo norte-americano Charles Frederick Hartt (1840 - 1878). É importante destacar que Hartt foi discípulo do então prestigiado zoólogo e geólogo suíço Jean Louis Rodolphe Agassiz, principal referência na temática associada a ocorrência de glaciação nos trópicos. Hartt também pôde manter contato com outros importantes acadêmicos, por exemplo, Joel Asaph Allen o qual menciona à Charles Frederick Hartt a possível origem glacial das depressões naturais (HARTT, 1870). Um outro ponto interessante é a participação de Hartt e Allen na "Expedição Thayer", coordenada por Louis Agassiz, entre os anos de 1865 e 1866, o qual percorreu as regiões norte e sudeste do território do Império do Brasil, buscando legitimar a teoria da glaciação em todos os continentes (FREITAS, 2002; GOUDIE; VILES, 2010).

Segue abaixo um breve comentário feito pelo zoólogo Joel Asaph Allen à Charles Hartt sobre a ocorrência de cavidades naturais localizadas na região sudeste da Serra de Jacobina, na então Província da Bahia. A saber:

"[...] Com intervalos frequentes, observam-se singulares panelas nas rochas, que costumam estar quase cheias de água, a que os habitantes dão o nome de "caldeirões". Estes caldeirões ocorrem com frequência, mas fui incapaz de determinar se todos eram de caráter similar. Quase todos dos que foram examinados, provavam ser autênticas panelas, sendo algumas de grande tamanho. As maiores que medi eram de contorno elíptico, 2,40 m no eixo menor, 2,90 ou 3 m no maior e 8,10 m de profundidade, com paredes lisas. Abaixo da água que a enchia parcialmente, devia haver alguns metros de detritos, que através dos tempos caíram nela, de modo que a profundidade total devia ser muito maior do que as minhas medidas indicam [...]" (HARTT, 1870, p. 314).

Na obra intitulada *Geologia e Geografia Física do Brasil*¹², elaborado por Charles Hartt em 1870, sugere que as cavidades encontradas atualmente nas superfícies rochosas do sertão baiano (Figura 22) estariam associadas a cachoeiras glaciais, da mesma forma

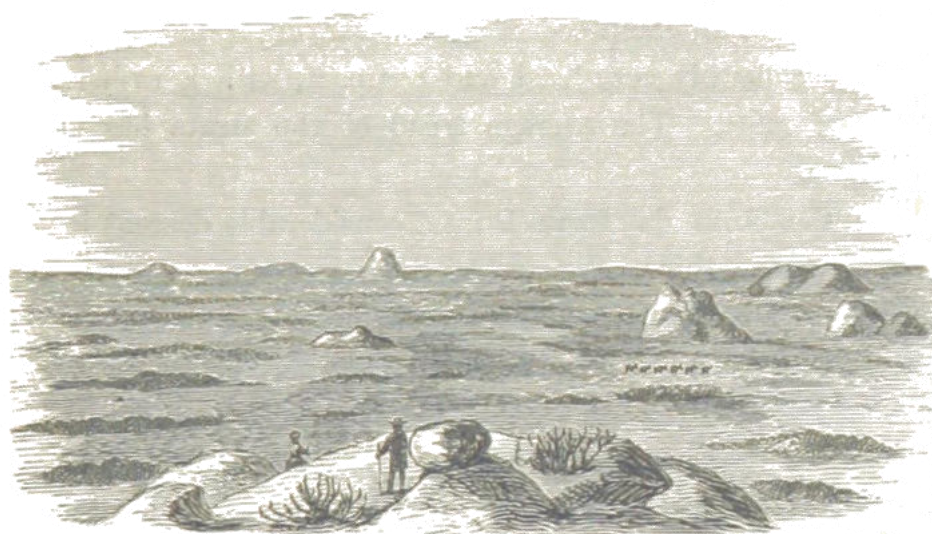
¹² O livro *Geology and Physical Geography of Brazil* (HARTT, 1870), além de conter a descrição física das províncias do então Império do Brasil, é igualmente considerado, em âmbito nacional, como o primeiro trabalho de síntese regular da geologia (MENEZES, 1878).

como os *pot-holes* (traduzido para português, buracos) são encontrados hoje nas regiões de alta latitude da América do Norte (HARTT, 1870). Em nota de rodapé, Charles Hartt exemplifica a presença das cavidades da seguinte maneira, a saber:

"[...] O Sr. Allen me disse que estas cavidades ocorrem, muitas vezes, na planície, longe de qualquer região montanhosa, e que são encontradas, às vezes, nos cumes de pequenos blocos, nas planícies, ou mesmo no topo de uma colina, como no caso no Morro do Caldeirão. Estes buracos devem ter sido escavados pelas águas caindo. Há apenas uma sugestão que posso fazer em relação às suas origens, isto é, que foram formadas por torrentes glaciais, do mesmo modo que as panelas encontradas nas regiões atingidas pela ação glacial na América do Norte como, por exemplo, em New Brunswick e Nova Escócia, onde tive a oportunidade de examiná-los. É sabido que a ação glacial, não obstante o constante movimento do gelo, é muitas vezes estacionária, e nos Alpes escavaram enormes panelas nas rochas [...]" (HARTT, 1870, p. 315).

Entretanto, a ideia de glaciação no nordeste brasileiro durante o período Cenozoico, resultando na formação de extensos glaciares, circos glaciais e quedas d'água associadas a esse tipo de ambiente não se sustenta em virtude de ausência de evidências científicas. A hipótese da ação glacial vinculada a origem e ao desenvolvimento dos tanques naturais sobre o embasamento granítico-gnáissico é então descartada.

Figura 22 - Ilustração realizada a partir do nível de cimeira do Morro do Caldeirão-Assú com a ocorrência de uma enorme cavidade natural. O Morro do Caldeirão-assú (açú) localiza-se no interior do estado da Bahia. Fonte: HARTT, (1870).



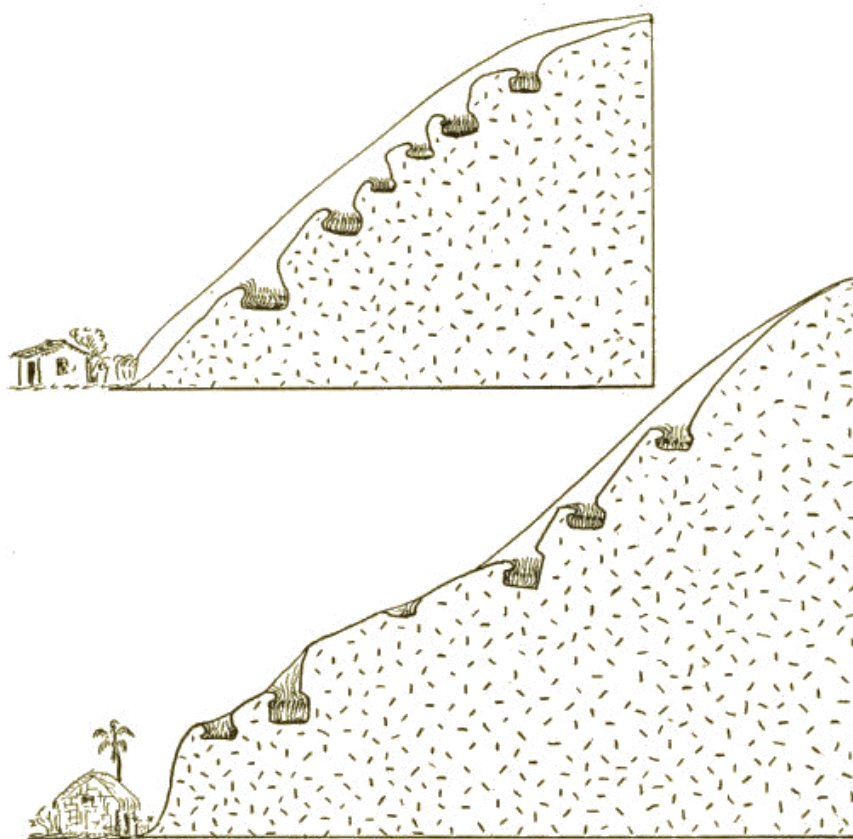
É provável que em virtude da semelhança entre as cavidades, sendo os *pot-holes* eventualmente descritos e analisados em trabalhos acadêmicos na Europa e na América do Norte, e a influência de Louis Agassiz, especialmente em relação as teorias de glaciação, interferiram nos apontamentos iniciais de Hartt em relação aos tanques naturais brasileiros. Posteriormente, Charles Frederick Hartt, então coordenador da Comissão Geológica do Império do Brasil entre os anos de 1875 e 1877, reconsiderou suas ideias sobre as glaciações e, conseqüentemente, dos registros sedimentares associados aos *drift glaciários*, colocando em evidência a ação preponderante da decomposição (intemperismo) das rochas no Brasil.

É interessante observar que algumas das principais referências do meio científico nacional durante o século XIX, no caso, os autores citados, Guilherme Schüch de Capanema e Charles Frederick Hartt, tenham se baseado na experiência internacional e em processos atuantes em paisagens completamente díspares do semiárido brasileiro para explicar a possível origem dos tanques naturais. Aparentemente, o modelo apresentado na publicação do Barão de Capanema sobre a relevância do processo fluvial, distanciando-se da proposta glacial, na formação de um tanque natural consiste em uma importante referência acadêmica. A influência de Capanema e a disposição de estudos sobre a temática pode ter fomentado pesquisadores e cientistas a replicar de modo geral a mesma hipótese em relação as depressões encontradas sobre o embasamento rochoso no semiárido nordestino. No entanto, cabe ressaltar que a hipótese era utilizada de modo independente em relação a um amplo quadro de fatores intrínsecos a área de estudo, por exemplo, na distribuição geográfica dos tanques, níveis altimétricos, constituição litológica, controle estrutural e, em alguns casos, ao registro sedimentar resguardado no interior da depressão natural.

No início do século XX, o geólogo estadunidense John Casper Branner (1851 - 1922) apresentou através do artigo *The Fluting and Pitting of Granite in the Tropics*, transcrito para o português no Boletim Geográfico no ano de 1962 em *As Caneluras e Caldeirões dos Granitos nos Trópicos*, e do livro *Geologia Elementar* algumas considerações a respeito da ocorrência de tanques naturais no nordeste brasileiro, ressaltando inclusive a ação de processos químicos na formação das cavidades (BRANNER, 1913, 1915, 1962). Branner (1913, 1915) utiliza o termo caldeirão ao se referir às depressões encontradas sobre a superfície rochosa. Entretanto, o autor distingue a forma em dois tipos, os caldeirões oriundos do desgaste do contato entre o material

transportado em ambiente subaquoso e o leito dos rios, como já citado anteriormente, e os caldeirões localizados em morros constituídos por rochas graníticas, como os que ocorrem nas vizinhanças de Quixadá, no Ceará, os quais teriam uma origem distinta (Figura 23). Segundo Branner (1915), nestes últimos a cavidade seria o resultado da ação química provocada diretamente pela estagnação de água em buracos na rocha. Assim, os minerais da rocha eram degradados, sendo transformados em lodo, e retirados da depressão por transbordamento através da entrada de novos fluxos de escoamento superficial e na renovação das águas internas.

Figura 23 - Ilustração expondo a distribuição e disposição geral dos caldeirões nas superfícies rochosas em Quixadá, no estado do Ceará. Fonte: BRANNER (1913).



Embora tenha acontecido algum tipo de discussão no meio acadêmico no que se refere a morfogênese das cavidades naturais (BRANNER, 1915), a hipótese de evorsão e/ou cavitação tornou-se a principal explicação para a formação dos tanques fossilíferos até meados da década de 1980 (MORAES, 1924; MORAES RÊGO, 1926; DOMINGUES, 1952; PAULA COUTO, 1953; ROLIM, 1974, 1982; SANTOS, 1982). O

contínuo processo de escavação ao longo do leito do eixo de drenagem principal resultaria em feições geomorfológicas associadas a gênese fluvial, no caso, em depressões conhecidas atualmente como marmitas ou caldeirões. Estas formas estariam hoje expostas a condições climáticas bem distintas daquelas responsáveis pela sua formação. Era comum entre os autores associar a ocorrência de tanques naturais, no caso, a feição geomorfológica, como um suposto indicativo de áreas associadas a *braços de rios abandonados*, convertendo-se na atual paisagem interiorana do nordeste brasileiro em evidências da dinâmica de paleossistemas de drenagem sob condições de maior umidade (ROLIM, 1974, 1982).

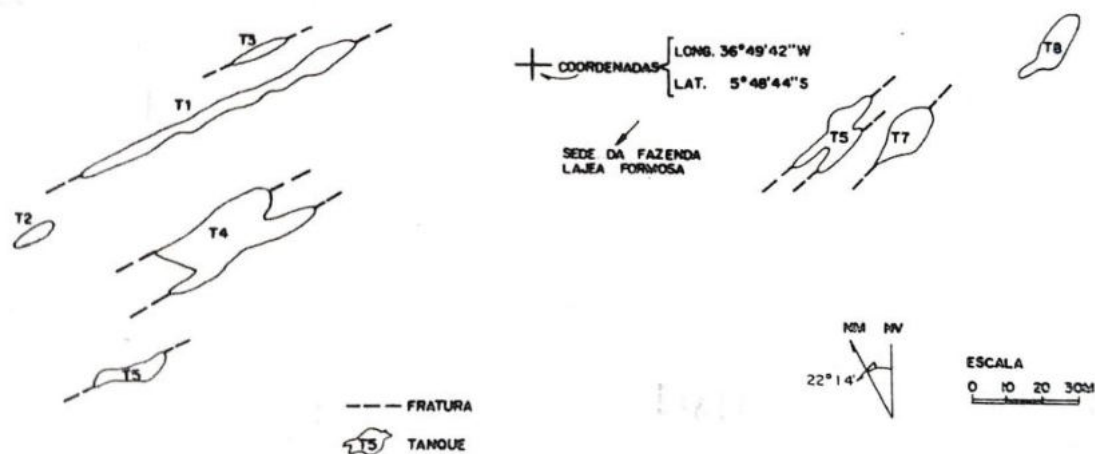
No trabalho intitulado *Fossil Pleistocene to Sub-Recent mammals from Northeastern Brazil. I - Edentata Megalonychidae*, de autoria do paleontólogo Carlos de Paula Couto (1910 - 1982), há uma breve explicação sobre a possível origem dos tanques no Nordeste do Brasil. Paula Couto (1980) propõe que os tanques naturais estão associados a ação intempérica da água, em condições subaéreas, sobre o conjunto de diaclases no embasamento cristalino. Ainda de acordo com o autor, a ação intempérica da água foi significativamente efetiva durante o Pleistoceno final e Holoceno inicial na região com a mudança climática de um ambiente úmido para um seco, ocorrendo no mesmo intervalo de tempo uma série de alterações na disposição fitogeográfica e o desaparecimento de grande parte da fauna de vertebrados.

De acordo com Paula Couto (1980), os fósseis em geral são encontrados nos sedimentos arenosos no interior dos tanques naturais. Embora, os fósseis não apresentem aspectos tafonômicos que associem a processos de rolamento e/ou traços de material desarticulado, eles são encontrados de forma dispersa nos sedimentos. A maior parte do material fossilífero consiste em fragmentos ósseos, sendo constituído principalmente por pedaços menores e caracterizados por apresentar traços lineares e cortantes, resultante do fraturamento dos fósseis. Aparentemente, os sedimentos e os respectivos ossos fósseis foram retrabalhados por diversas vezes desde a primeira deposição a partir de torrentes fluviais (enxurradas) que atuaram na região após o estabelecimento das novas condições climáticas de semiaridez.

O XI Congresso Brasileiro de Paleontologia (CBP), realizado em Curitiba, no estado do Paraná, no ano de 1989, representou um importante marco no que se refere ao entendimento para a formação dos tanques naturais fossilíferos no Nordeste brasileiro, destacando a importância dos condicionantes estruturais. Nos anais do XI CBP é possível

visualizar uma série de trabalhos referentes a descrição e a hipótese de gênese destas formas menores do relevo (OLIVEIRA, 1989; OLIVEIRA *et al.*, 1989; OLIVEIRA; HACKSPACHER, 1989). O trabalho de Oliveira; Hackspacher (1989), por exemplo, realizado no oeste potiguar, esclarece que a ocorrência dos tanques não poderia representar trechos abandonados de leitos fluviais, mas depressões originadas pelo trabalho erosivo, de caráter químico e físico, ao longo do sistema de fraturas e diáclases existentes no embasamento cristalino (Figura 24). Os autores reconhecem a importância da tectônica rúptil e do controle litoestrutural na formação e distribuição geográfica dos tanques naturais.

Figura 24 - Mapa de localização dos tanques fossilíferos na área de Lágua Formosa II, no estado do Rio Grande do Norte. Os autores destacam a distribuição dos tanques naturais junto ao sistema de fraturas no embasamento granítico. Fonte: OLIVEIRA; HACKSPACHER (1989).



Na década de 1990, o geógrafo holandês Jannes Markus Mabesoone (1931 - 2014) e coautores trouxeram importantes observações sobre os componentes litológicos e o controle estrutural em relação a possível origem dos tanques fossilíferos. Segundo o trabalho de Mabesoone *et al.* (1990), é evidenciado que a maior parte dos tanques naturais do Rio Grande do Norte localizam-se sobre uma faixa contínua N-S do embasamento granítico, sendo observada também a presença de xenólitos de biotita-gnaiss e biotita-xisto. Os autores mencionam que os tanques ocorrem principalmente sobre *inselbergs* semicirculares e bastante fraturados. A direção dessas fraturas (NE-SW) teria sido responsável pela gênese da maioria dos tanques. No entanto, uma pequena quantidade

dos tanques não segue o padrão estrutural NE-SW, e constitui forma subcircular, sendo sua origem atribuída à decomposição de megaxenólitos.

Em termos de comparação ao terreno granítico, os xenólitos são mais suscetíveis ao ataque intempérico em superfície devido à própria composição mineralógica, rica em biotita. Em geral, os xenólitos têm o formato circular ou oval e em conjunto ao intemperismo diferencial podem gerar cavidades. De acordo com os autores, o sistema de fraturas e diáclases observado em campo estaria associado às atividades tectônicas de caráter rúptil na época da Glaciação Riss (entre 140 ka e 200 ka), que posteriormente foram retrabalhados em condições subaéreas por processos físicos e químicos, resultando no aprofundamento das depressões e na origem dos tanques naturais durante o Pleistoceno Final. Posteriormente, as depressões foram preenchidas por sedimentos resultantes do intemperismo físico em áreas adjacentes e, ocasionalmente, por restos fósseis da megafauna pleistocênica, carregados pelo escoamento superficial. Apesar de atribuir um período relativamente curto de 140 a 200 ka - Pleistoceno médio, para a formação de tanques naturais, é possível notar que, assim como no trabalho de Oliveira; Hackspacher (1989), o controle estrutural a partir de rochas pré-cambrianas parece novamente ter sido levado em consideração para explicar a possível origem e distribuição das depressões.

Os apontamentos retratados por Mabesoone *et al.* (1990) para a formação dos tanques naturais, seja por influência de fraturas e diáclases ou pela distribuição de xenólitos decompostos, baseiam-se em um esquema de controle estrutural pré-estabelecido que compreende a eventual expansão e/ou aprofundamento dessas formas menores do relevo. Ainda segundo os autores, os tanques aumentaram o seu tamanho devido ao processo de evorsão e/ou cavitação de águas pluviais torrenciais, típicas de clima semiárido e que carregaram fragmentos de rochas, incluindo seixos, resultando em atrito sobre o embasamento cristalino. A intensidade e a frequência desse processo de abrasão, além da ação química das águas estagnadas, produziriam tanques mais rasos, enquanto outros seriam mais aprofundados com paredes bastante íngremes.

Ao analisar os tanques naturais de Conceição das Crioulas, no Sertão de Pernambuco, o arqueólogo francês Claude Guérin (1939 - 2016) comenta que a origem das depressões parece residir na erosão preferencial sobre um ponto de menor resistência nos granitos anatóticos, provavelmente em interseções e/ou cruzamentos de fraturas em várias direções (GUÉRIN, 1993). Ainda segundo o autor, o material depositado no interior da depressão era constituído por sedimentos argilo-arenosos e seixos de quartzo

angulosos/subangulosos presentes em vários níveis, inclusive na camada fossilífera. O material depositado no entorno da depressão indicava que antes da escavação da cacimba havia ocorrido uma espécie de confluência de escoamento superficial na área de investigação, resultando em um breve fenômeno de transbordamento.

Na obra *Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais*, o Prof. João José Bigarella (1923 - 2016) sugere que a formação das depressões naturais em afloramentos rochosos no semiárido brasileiro está associada a ação intempérica atuando em condições subaéreas sobre as estruturas rúpteis (diaclasses), coadjuvada pela ação biológica, em especial, de vegetais inferiores. Ainda segundo o autor, em uma superfície plana do embasamento cristalino, determinados pontos - aparentemente, mesmo sem influência de diaclases - podem sofrer maior ação da umidade, originando pequenas depressões muito rasas que evoluem em formas embaciadas de larguras e profundidades progressivamente maiores (BIGARELLA, 1994). O fenômeno em questão tem origem igualmente no cruzamento de diaclases ou ao longo do eixo de uma outra diaclase. Nas pequenas depressões assim formadas tende a acumular, de modo periódico, água, a qual na presença de restos orgânicos atua na alteração dos silicatos, principalmente feldspatos. O aumento progressivo da profundidade, a água com ácidos orgânicos, passa a atuar por tempo cada vez maior. No nível de água mais elevado, nas paredes da depressão, pode ser verificado uma ação corrosiva de solapamento que faz com que a reação química atue lateralmente para o interior da rocha, originando uma forma com bordas pendentes. No decorrer do tempo, a bacia assume dimensões maiores mantendo a água no seu interior (BIGARELLA, 1994).

Bigarella (1994) expressa que algumas das depressões de intemperismo que ocorrem atualmente no semiárido tiveram como única causa do início de sua formação a ação do sistema radicular (fixação de raízes) que penetraram ao longo das diaclases, fissuras e interstícios da rocha. A ocorrência de inundações e enxurradas periódicas contribuíram para a remoção dos detritos acumulados na cavidade, parecendo fundamentais ao seu desenvolvimento (BIGARELLA, 1994).

Ao estudar os tanques naturais fossilíferos de Itapipoca, Ximenes (2009) destaca que na formação das depressões há controle de ordem litológica, geomorfológica e estrutural. O controle litológico consiste na ocorrência de afloramentos graníticos e do alto percentual de feldspatos e micas na composição da rocha, sendo mais susceptível a ação do intemperismo químico provocado pela água que se acumula no interior dos

tanques. No caso dos campos de *inselbergs*, os fatores geomorfológicos e estruturais atuam em conjunto na formação de depressões, seja pelo alinhamento de *inselbergs* como resultante da denudação diferencial ao longo de zonas de cisalhamento intrudidas por plútons, e posteriormente, durante as fases de reativação, foco da ocorrência de fraturas e diáclases que servem in loco para o desenvolvimento dos tanques, ou pela alternância entre áreas mais e menos fraturadas que regulam a ocorrência de relevos residuais e depressões erosivas entre as mesmas em terrenos mais fraturados.

De acordo com Ximenes (2009), os três fatores expostos anteriormente em conjunto seriam os condicionantes responsáveis - em ambiente subaéreo - pela existência dos tanques naturais, restrito a um processo muito lento de desenvolvimento. Ximenes (1996) propôs seis estágios de desenvolvimento das depressões naturais, a saber: (i) estágio inicial: dissociação dos minerais da rocha granítica a partir de uma diaclase, resultando em várias aberturas ao longo da mesma; (ii) estágio de alargamento: o intemperismo químico agindo na esfoliação da rocha faz com que as pequenas aberturas aumentam na largura, constituindo uma forma elipsoidal; (iii) estágio de expansão: as diversas aberturas ao longo da diaclase se unem e aumentam a depressão no comprimento, mas mantendo ainda rasa; (iv) estágio de aprofundamento: a depressão passa por nova etapa dos processos anteriores, que tendem a atuar no fundo da mesma, tornando-a cada vez mais profunda; (v) estágio de maturidade: a depressão se torna profunda o suficiente para permitir a deposição de fósseis; (vi) estágio avançado: nesta fase a depressão alcança grandes dimensões. É possível que, com a continuidade dos processos, uma lagoa seja desenvolvida no local da depressão.

No trabalho de Waldherr *et al.* (2017a, 2019, 2022) é apresentado novas interpretações sobre a possível gênese dos tanques naturais (*stricto sensu*), estabelecendo uma classificação morfológica e morfométrica dessas feições em terrenos graníticos no Nordeste do Brasil. O trabalho propõe a utilização do termo tanque natural (raso e escarpado) para as cavidades naturais, de origem não-fluvial, sobre o embasamento cristalino, e manter o termo marmitta, ou caldeirões, para aquelas de origem fluvial. De acordo com os autores, as formas menores do relevo granítico podem estar associadas ao processo de corrosão química e, em alguns casos, a migração e a concentração de cargas em subsuperfície, atuando sobre zonas de debilidade do substrato rochoso, especialmente em *sets* de fraturamento (*sheet structure*) e interseções de diáclases. O conjunto deste tipo de estruturas secundárias e/ou tardias condicionaria a gênese dos tanques naturais. Ao

contrário da necessidade de a superfície estar exposta para iniciar a formação da cavidade, o tanque natural poderia ter sua origem e desenvolvimento associado ao ambiente subedáfico, sendo posteriormente exposto as condições subaéreas de modo gradual.

Ao trabalhar com as marmitas de dissolução (tanques naturais) na área de Fazenda Nova, no município de Brejo da Madre de Deus, estado de Pernambuco, Silva (2007), Silva; Barros (2009), Silva *et al.* (2006, 2009, 2017) e Listo (2022) ressaltam que as depressões naturais têm servido como fontes de dados e informações para a reconstrução geomorfológica recente da paisagem do Quaternário através do reconhecimento de eventos pretéritos encontrados no registro sedimentar no interior da cavidade. De acordo com os autores, as marmitas de dissolução na área de estudo estão associadas, na maior parte das vezes, aos *inselbergs* constituídos por um granito pórfiro, em zona de intercessão de linhas de fraturas e morfologicamente restrita aos pedimentos intermontanos de topografia marcadamente plana, nas proximidades de *knickpoints* das unidades de encostas (SILVA, 2007; SILVA *et al.*, 2006, 2009, SILVA; BARROS, 2009; LISTO *et al.*, 2022). Ao analisar os aspectos morfológicos, os autores elaboraram uma proposta de classificação das marmitas de dissolução (tanques naturais) a partir do tipo de fundo das depressões (SILVA *et al.*, 2017).

Em importante contribuição sobre os relevos graníticos do Semiárido brasileiro, Maia; Nascimento (2018) indicam que as bacias de dissolução ocorrem na maior parte das vezes em *inselbergs* constituídos por rochas graníticas com ocorrência, e adensamento, de enclaves máficos, resultando na formação de diversas reentrâncias erosionais e que confinam parte da drenagem. Assim, as bacias de dissolução de formato circular e, por vezes, elipsoidal - com tamanho que varia de decimétrico a métrico - manteriam as características geométricas originais dos enclaves máficos ou xenólitos. A ocorrência de bacias de dissolução é mais comum em declives, podendo estar isoladas ou interconectadas por meio de exutórios. Os autores comentam igualmente, uma vez que o talvegue do exutório não se encontra suficientemente desenvolvido, há então o acúmulo de água. Em escarpas com declives superiores a 45°, a interconexão pode desenvolver um outro tipo de forma, a canelura. A tipo de forma em questão é resultante do aprofundamento e alargamento do exutório. Os casos foram observados com maior frequência em *inselbergs* com ampla quantidade de enclaves máficos. No entanto, os autores destacam que a presença de enclaves não constitui um pré-requisito para o

desenvolvimento de caneluras, mas sim um facilitador geomorfológico na sua formação (MAIA; NASCIMENTO, 2018).

Maia *et al.* (2018) comentam que, dada a ausência de um consenso no meio acadêmico em relação a origem e ao desenvolvimento das depressões naturais, parte dos trabalhos desenvolvidos no semiárido brasileiro tende a inferir a gênese a partir das condições ambientais vigentes, distanciando-se do levantamento sistemático da química da água ou da análise microscópica das rochas. Em diversos trabalhos, o papel fundamental da estagnação da água - em contato direto com as superfícies da rocha - é tido como o principal agente que em tese viabilizaria o aprofundamento e o alargamento dos tanques naturais; outros indicam os processos químicos de solução como os principais responsáveis pelo desenvolvimento das depressões; e, por fim, alguns trabalhos sugerem a atuação de processos vinculados a hidratação e ao intemperismo bioquímico, além da ação mecânica de haloclastia e erosão eólica.

No geral, os aspectos levantados nos estudos acadêmicos que buscam elucidar a origem e desenvolvimento dos tanques naturais a partir do controle litológico e estrutural induzem à ideia de que as formas atualmente expostas nos maciços graníticos e entorno estão relacionadas à erosão diferencial associada ao sistema de fraturas e a presença de corpos estranhos no embasamento, por exemplo, os megaxenólitos. Alguns trabalhos reorientam a discussão ao papel da estagnação da água da chuva nas depressões das superfícies das rochas, enquanto outros direcionam a atenção ao possível trabalho contínuo de erosão dos rios (turbilhamento) sobre o leito rochoso na formação dos tanques naturais. No entanto, autores do meio acadêmico internacional têm associado a origem de formas análogas (em outros continentes) aos tanques naturais do semiárido brasileiro, sendo o resultado do trabalho de corrosão química e/ou efeito de migração e concentração de cargas sobre o embasamento cristalino em subsuperfície (TWIDALE, 1989; TWIDALE; VIDAL ROMANÍ, 2005; VIDAL ROMANÍ, 1989, 2008; VIDAL ROMANÍ; TWIDALE, 1998; VIDAL ROMANÍ; YEPES TERMIÑO, 2004; VIDAL ROMANÍ *et al.*, 2014a, 2014b, 2018; CAMPBELL, 1997; CAMPBELL; TWIDALE, 1995; MAYOR RODRÍGUEZ, 2011).

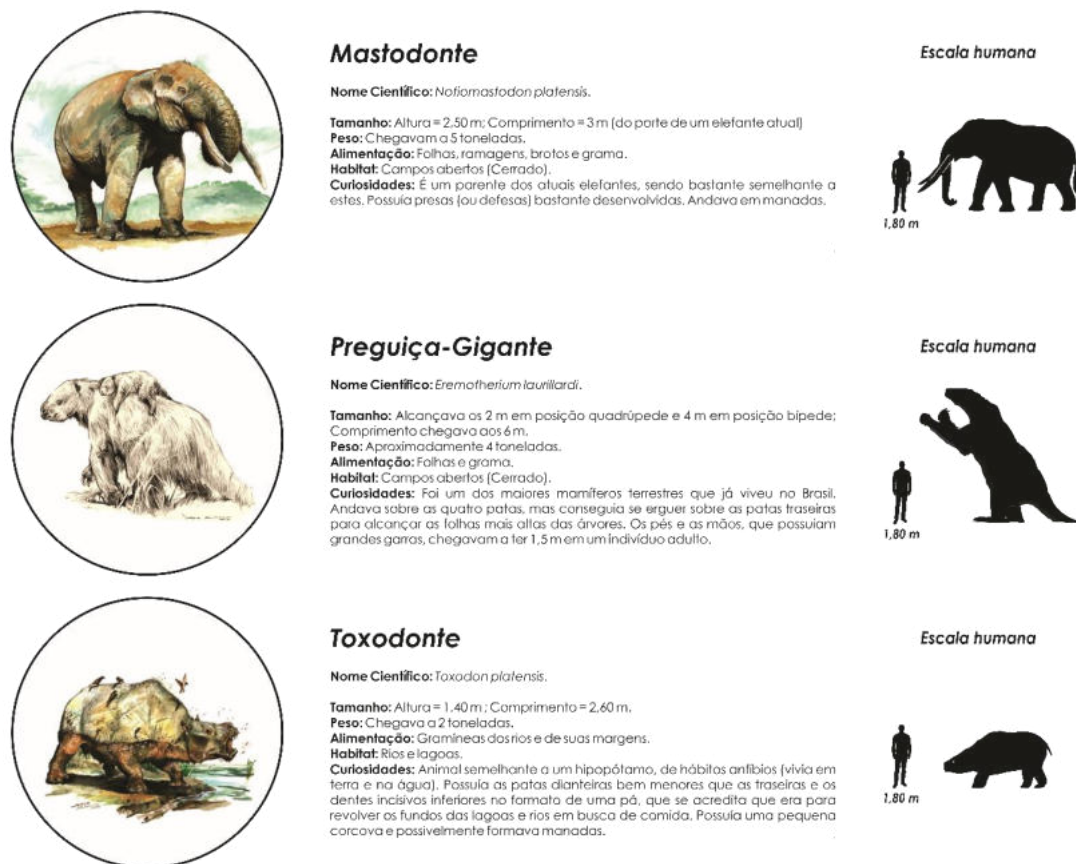
3.1.1 Tanques naturais fossilíferos

A conformação geomorfológica entre os "tanques naturais" e os "depósitos de tanque fossilíferos" constitui uma característica *sui generis* do Nordeste do Brasil

(WALDHERR *et al.*, 2019), em particular na região do semiárido. A ocorrência de feições semelhantes aos tanques naturais tem sido reportada em diversos continentes (GODARD, 1977; TWIDALE; VIDAL-ROMANÍ, 2005). No entanto, não há documentação até o presente momento sobre a presença de depósitos fossilíferos da megafauna pré-histórica do Quaternário no interior destas depressões naturais em um contexto internacional (WALDHERR *et al.* 2017a, 2019).

Os depósitos de tanque são pequenos corpos sedimentares de idade quaternária que preenchem os tanques naturais em afloramentos rochosos, em especial, sobre os lajedos e no entorno de domos graníticos (ARAÚJO-JÚNIOR *et al.*, 2013a). Os depósitos de tanque são constituídos, na maior parte das vezes, por sedimentos siliciclásticos estratificados e, eventualmente, camadas fossilíferas, preservando restos de uma diversificada fauna que inclui principalmente a megafauna do Pleistoceno Final - Holoceno inicial, por exemplo, megateriídeos, gliptodontídeos, gonfoteriídeos, toxodontídeos, macrauqueniídeos e felídeos (Figura 25) (PAULA COUTO, 1980; MABESOONE *et al.*, 1990; BERGQVIST *et al.*, 1997; CARTELLE, 1999; XIMENES, 2003, 2009). Sob a ótica biogeográfica, a ocorrência de depósitos de tanque fossilíferos no semiárido brasileiro não corresponde somente ao sucesso de dispersão geográfica da megafauna pré-histórica, mas denota igualmente um dos eventos mais importantes no que se refere a história evolutiva dos mamíferos - denominado de "Grande Intercambio Biótico Americano" (CIONE *et al.*, 2015), decorrente da formação do Istmo do Panamá. O evento geológico em questão foi responsável por encerrar a insularidade da América do Sul através da emersão de uma estreita faixa de terra, menor que 65 km de largura, que possibilitou, ao longo de distintos pulsos de migração, o intercambio e a diversificação faunística de mamíferos (não marinhos) no continente americano, em especial no final do Plioceno e início do Pleistoceno ($\cong 2.5$ Ma) (CARRILLO *et al.*, 2020).

Figura 25 - Os principais representantes da megafauna pré-histórica do Nordeste do Brasil durante o Quaternário. Fonte: JORGE BLANCO (2006); FORASIEPI *et al.* (2007).



Segundo Oliveira *et al.* (2014), os tanques naturais estão associados aos depósitos mais comuns e com maior potencial fossilífero no domínio morfoclimático das caatingas, compreendendo parte do semiárido brasileiro (Figura 26). Ainda segundo esses autores, a presença de fragmentos fósseis de ossos de megamamíferos (mamíferos com peso acima de 1.000 kg) e grandes mamíferos (acima de 44kg) preservados em depósitos de tanque, por exemplo, da ordem de Xenartha (preguiças, tatus e gliptodontes), Proboscidea (mastodontes) e Notoungulata (toxodontes), por si só, já constitui uma forte evidência de um antigo mosaico de vegetação de campos abertos, savanas e florestas na caatinga, assim como de maior ou menor quantidade de cursos de água durante o Pleistoceno (OLIVEIRA *et al.*, 2014). E, em vista disso, os registros paleontológicos que se encontram resguardados em formas menores do relevo constituem áreas relevantes em relação as informações sobre a atuação e predomínio de paleoclimas que podem ter viabilizado condições ambientais apropriadas ao desenvolvimento desse amplo conjunto faunístico pré-histórico (SILVA, 2007; SILVA; CÔRREA, 2009). De acordo com Araújo-Júnior *et*

al. (2013a), tais sedimentos consistem, ainda, em um tipo singular de depósito fossilífero da América do Sul.

Figura 26 - Trabalho de coleta de fósseis em depósitos de tanque no Sítio Paleontológico Jirau - município de Itapipoca (CE). Na imagem, o Prof. Celso Ximenes exibe um fragmento fóssil (tíbia) procedente de uma preguiça gigante (*Glossotherium* sp). Foto: Felipe Waldherr, Dez./2021.



De acordo com Carvalho (2022), os momentos finais do Pleistoceno e o início do Holoceno foram marcados por uma série de mudanças climáticas locais e regionais, com eventos de clima árido a semiárido sobre a área continental. Isto acabou por se refletir na paleofauna de vertebrados encontrada em distintos tipos de depósitos sedimentares, por exemplo, litorâneo, de caverna, de lagos, de rios e de tanque. Ainda segundo o autor, os depósitos de tanque estão vinculados a ocorrência e deposições sucessivas de detritos, que contém uma expressiva quantidade de fósseis da megafauna quaternária (CARVALHO, *op. cit.*). A interpretação em relação a camada fossilífera dos depósitos de tanque tem se baseado na premissa o qual os animais pereciam no entorno dos tanques naturais, principal área de reserva de água em períodos de estiagem, e que, posteriormente, suas carcaças seriam transportadas através de escoamento superficial, no caso, de enxurradas, para o interior das depressões (XIMENES, 2003, 2009; ARAÚJO-JÚNIOR *et al.*, 2013a). Em geral, os tanques naturais apresentam uma única camada

fossilífera, estabelecendo uma tanatocenose singular e sincrônica. Esse aspecto sugere a conformação de distintos "episódios" cronologicamente constrictos de mortandade. É importante destacar que a datação e análise das propriedades sedimentares que integram os depósitos de tanque fossilíferos subsidiaram uma reconstituição em relação aos cenários paleoclimáticos que atuaram em distintas porções do semiárido nordestino.

Figura 27 - Atividade de escavação e coleta de fósseis em depósito de tanque no Sítio Paleontológico Jirau, município de Itapipoca (CE). Na imagem, é possível observar a espessura do preenchimento sedimentar no interior da depressão natural. Foto: Celso Ximenes, Jan./2006.



Ao elaborar um conjunto de estimativas em relação à presença da megafauna pré-histórica (média temporal) através de camadas fossilíferas em depósitos de tanque no Semiárido do Brasil, Ribeiro *et al.* (2021) comentam que na localidade de Puxinamã, no estado da Paraíba, a média de mistura temporal em relação aos fósseis coletados foi de 5.000 anos (KINOSHITA *et al.*, 2005a, 2005b), enquanto na localidade de Brejo Madre de Deus, no estado de Pernambuco, é de aproximadamente 12.100 anos (KINOSHITA *et al.*, 2008). Em Poço Redondo, no estado de Sergipe, o grau de mistura temporal foi de 12.300 anos (DANTAS *et al.*, 2013). No entanto, estudos recentes têm revelado uma

média temporal superior em relação aos sítios citados anteriormente. De acordo com Ribeiro *et al.* (2021), o grau de mistura temporal na camada fossilífera na localidade da Lagoa do Rumo é de 51.000 anos, sendo considerado o maior alcance observado em um depósito de tanque. Os resultados demonstram a presença de toxodontídeos na região da Lagoa do Rumo entre, aproximadamente, 66.000 anos até o Holoceno Inicial, alcançando os 9.000 anos. Esses animais foram adaptados a ambientes com grande disponibilidade de corpos d'água, alimentando-se de plantas C₃ (vegetação arbórea e arbustiva) e C₄ (gramíneas) (DANTAS *et al.*, 2013), indicando um ambiente mais úmido durante Pleistoceno Final - Holoceno Inicial em relação ao atual.

Os trabalhos de geocronologia a partir da datação por ESR e ¹⁴C de fragmentos fósseis coletados em tanques naturais em sítios paleontológicos no semiárido nordestino também tem obtido o resultado onde a variação temporal de alguns exemplares de megamamíferos, no caso, de toxodontídeos, encontra-se limitada ao Holoceno inicial (RIBEIRO *et al.*, 2013; FARIA *et al.*, 2020a, 2020b). Esse resultado consiste, até o presente momento, em um importante registro em relação a distribuição geográfica e ocorrência de megamamíferos em períodos mais recentes no Nordeste do Brasil. Em geral, os resultados obtidos a partir de métodos de datação absoluta em depósitos fossilíferos têm posicionado, na escala de tempo geológico, fósseis da megafauna pré-histórica entre o Pleistoceno Final e o Holoceno Inicial (BARRETO *et al.*, 2003; KINOSHITA *et al.*, 2005a, 2005b, 2008; ALVES, 2007; FERREIRA, 2010; SILVA *et al.*, 2010; SILVA, 2013; FARIA *et al.*, 2020a, 2020b; RIBEIRO *et al.*, 2021). No contexto geomorfológico, é importante destacar que o preenchimento sedimentar e fossilífero dos tanques naturais denota na exposição prévia da forma menor do relevo granítico, assim como o desenvolvimento de espaços de acomodação no interior da cavidade para receber o aporte sedimentar durante o Quaternário.

Cabe destacar que, a questão do preenchimento de tanques naturais por sedimentos pleistocênicos e holocênicos constitui um capítulo importante sobre a Geomorfologia do Quaternário no semiárido brasileiro, uma vez que tais feições de relevo, quando completamente preenchidas, preservam informações sobre a dinâmica da paisagem e de seu entorno, auxiliando na reconstituição de parte do quadro paleoambiental. Segundo Silva; Barros (2009), as idades mais antigas de preenchimento sugerem intervalos máximos de recorrência dos processos de remoção e transporte de sedimentos. Assim sendo, a importância dos tanques naturais se torna propícia ao configurar áreas, mesmo

em escala restrita, de retenção e sedimentação quaternária e, portanto, de novas perspectivas em relação a obtenção de dados que possam subsidiar a reconstituição da história geológica do semiárido nordestino.

De acordo com Moura (2007), os depósitos quaternários encontram-se distribuídos sob as múltiplas formas de relevo, comumente em uma estreita relação genética com as feições morfológicas da paisagem. Assim, os diferentes padrões de organização das paisagens-integração Geomorfologia-Estratigrafia devem sempre ser considerados na análise estratigráfica de depósitos quaternários. Nesse contexto, uma série de contribuições foram elaboradas a partir do estudo sistemático em depósitos de tanque no município de Brejo da Madre de Deus, no estado de Pernambuco (SILVA *et al.*, 2006, 2009, 2017; SILVA, 2007; SILVA; BARROS, 2009; LISTO *et al.*, 2022). Por exemplo, Silva; Barros (2009) e Listo *et al.* (2022) discorrem que a identificação e análise de processos que colmataram os tanques dependem da atuação de diversos fatores que influenciam processos superficiais em distintas escalas espaço-temporais. Embora confinados espacialmente, esses depósitos constituem, a partir da análise morfoestratigráfica, evidências de oscilações climáticas pretéritas, de distintos pulsos erosivos/deposicionais e de eventuais mantos de alteração que proveram material sedimentar para o preenchimento dessas depressões naturais durante o Quaternário (SILVA; BARROS, 2009; LISTO *et al.*, 2022).

Ao utilizarem de modo integrado um conjunto de métodos de análise, Listo *et al.* (2022) elaboraram qualitativamente os distintos cenários de deposição que resultaram no preenchimento de tanques naturais na localidade Fazenda Nova, no município de Brejo da Madre de Deus (PE). Os autores basearam-se na abordagem morfoestratigráfica, na análise de isótopos estáveis O^{18} em crosta carbonática, caracterização morfológica de fitólitos e na datação por LOE (Luminescência Opticamente Estimulada) em amostras de sedimentos provenientes dos depósitos de tanque. Nota-se que alguns eventos estão relacionados a ritmos climáticos amplamente conhecidos para o Nordeste do Brasil desde o Pleistoceno final. Os eventos datados no depósito de tanque com maior profundidade são de 58.900 anos (Penúltimo Interstadial), o qual denota uma paisagem marcada por uma remobilização maciça de fragmentos clásticos oriundos de coberturas superficiais associado a uma cobertura vegetal aberta após período de seca prolongada, deixando disponível sobre a superfície somente os materiais mais grossos (ossos da megafauna pré-histórica e fragmentos de rochas), e, posteriormente, remobilizados sob condições

torrenciais, resultando em depósitos de cascalheira. Após a deposição no tanque, a cascalheira viria a ser convertida em conglomerado sob cimentação carbonática e de idade de 45.000 anos (penúltimo stadial do Pleistoceno) e que reforça a interpretação de eventos ocasionais de intensas precipitações em um contexto de regime climático mais seco e frio; a camada subsequente obteve datação de 19.800 anos e foi depositada durante o Último Máximo Glacial (UMG). Acredita-se que seja corresponde a uma nova fase de remobilização dos mantos intempéricos, sendo igualmente associado a regime climático predominantemente seco e frio, mas com eventos de chuvas sazonais de alta magnitude.

Ainda, de acordo com Listo *et al.* (2022), medidas isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ revelaram a paleotemperatura para a Fazenda Nova de 18,7°C, apontando um decréscimo de aproximadamente 6°C para a área que atualmente tem temperatura média de 25°C, confirmando a hipótese de que o desenvolvimento de calcrete¹³ em depósitos de tanque na área foi formado sob um regime climático de severa semiaridez, mas de temperatura inferior à atual. Já a análise de fitólitos indicou uma baixa diversidade de morfotipos¹⁴. Apenas seis morfotipos foram identificados, a saber: bilobados (*Panicoideae*), buliformes, pilosos e alongados (*Poaceae*). Estes representam mais de 60% da assembleia de cada amostra estudada, com os morfotipos hexagonal (*Cyperaceae*) e bloco irregular (*Eudicotyledoneae*) representando 20 e 25% das assembleias. Essa baixa diversidade sugere uma predominância de fitólitos de monocotiledôneas C₄ e a vegetação aberta, como corroborado pelos valores nulos do índice de cobertura arbórea.

Uma cronologia detalhada em relação aos depósitos de tanques no município de Brejo Madre de Deus, integrada a estudos geomorfológicos, permite um melhor entendimento em relação a temporalidade das mudanças sofridas pela paisagem (LISTO *et al.*, 2022). Desse modo, é possível aferir que os eventos de acumulação de sedimentos analisados foram pontuais e correspondem à ocorrência de eventos deposicionais discretos e de curta duração. Outra observação importante é dada pelos mecanismos climáticos na geração dos depósitos, pois não refletem somente a ocorrência de períodos

¹³ Calcretes são acumulações secundárias de carbonato de cálcio continentais formadas próximo à superfície como resultado de processos pedogenéticos e diagenéticos, resultando em grande variedade de morfologias e texturas (SAMPAIO *et al.*, 2017). Nos climas áridos e semiáridos, os minerais carbonatados são dissolvidos; eles reprecipitam na proximidade da superfície, devido à evaporação, na forma de crostas pedológicas (caliça ou calcrete) (POMEROL *et al.*, 2013). Ainda de acordo com o geólogo francês, em clima semiárido, as calcretes são mais espessas, e um começo de carstificação pode implantar-se.

¹⁴ Morfotipo corresponde a um conjunto de critérios morfológicos (formato, textura, ornamentação, simetria e origem anatômica vegetal) que identifica os diferentes tipos de corpos silicosos dos vegetais e que apresentam especificidade taxonômica (ICPT, 2019).

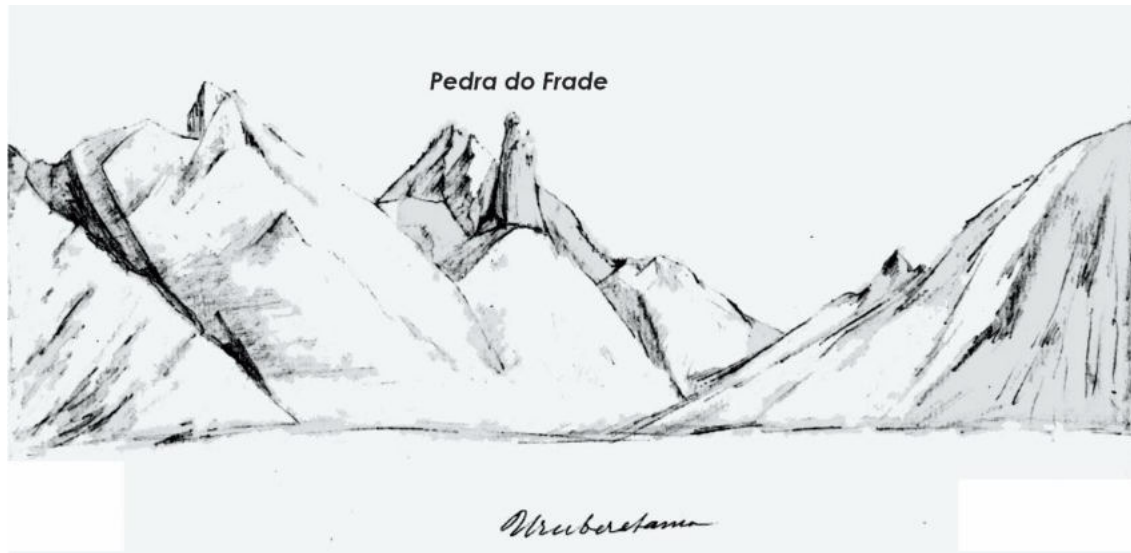
transicionais de climas mais secos para climas mais úmidos, mas também refletem a ocorrência de eventos pluviométricos de alta intensidade durante a vigência de climas provavelmente mais secos, por exemplo, o registro de calcrete indicando o predomínio de condições paleoclimáticas de semiaridez acentuada durante o preenchimento sedimentar do depósito de tanque na Fazenda Nova, no estado de Pernambuco.

3.1.2 Processos de intemperismo e modelo de etchplanação no mecanismo evolutivo de tanques naturais

De acordo com Vitte (2001), as primeiras observações sobre o intemperismo químico e a sua importância para a morfogênese nas regiões tropicais quentes e úmidas devem-se ao trabalho de Branner em 1896, no Brasil, e Falconer em 1911, na Nigéria. Esses autores atestaram o papel funcional do manto e do *front* de intemperismo nos processos de denudação e formação das paisagens. Cabe destacar igualmente o trabalho do Barão de Capanema (CAPANEMA, 1866) sobre a atuação do intemperismo profundo como principal hipótese na reinterpretação dos chamados *drifts* glaciaários e *boulders* erráticos que até então eram interpretados pelo Prof. Louis Agassiz como vestígios de uma ampla glaciação no Brasil e, conseqüentemente, na América do Sul.

Ao mencionar a então Província do Ceará, Capanema (1866) relata que a maior parte do terreno é baixo e largamente ondeado no meio do qual se elevam algumas serras isoladas, à maneira de ilhas (*inselbergs* e domos graníticos). De acordo com o autor, o sertão do Ceará corresponde a uma ampla laje granítica e a decomposição resulta na formação de uma camada de barro com areia de pequena espessura e que permanece sobre a superfície da rocha devido ao baixo declive, dificilmente excedendo um a dois palmos (CAPANEMA, 1866). No entanto, o próprio autor ao referir-se sobre o conjunto de formas do relevo granítico na Província do Ceará, em especial, os moinhos do diabo - feições geomorfológicas constituídas por blocos, matacões e *tors* - e os domos rochosos, corresponderiam a formas oriundas da decomposição de núcleos rochosos envoltos por um espesso manto intempérico (Figura 28) e que ocorriam de maneira evidente na paisagem do Rio de Janeiro.

Figura 28 - Esboço elaborado pelo médico e naturalista Francisco Freire Alemão da "Pedra do Frade", localizada no Maciço de Uruburetama, durante o trabalho da Comissão Científica de Exploração no Nordeste do Brasil no ano de 1860. A Pedra do Frade corresponde a um penedo arredondado e integra um importante conjunto de formas maiores do relevo granítico no semiárido brasileiro. Modificado: de FREIRE ALEMÃO (1862).



Branner (1896, 1948a, 1948b), por sua vez, deixa evidente os efeitos da decomposição das rochas sobre os terrenos granítico-gnáissicos em distintas partes do Brasil. Segundo o autor, existem regiões onde o solo é especialmente delgado, onde as rochas são argilosas e a drenagem é vertiginosa. A região em questão abarcaria o interior do estado da Bahia, abrangendo porções dos estados do Sergipe, Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará. Branner (*op. cit.*) destaca igualmente dois pontos sobre a decomposição de rochas no Brasil, a primeira refere-se ao contexto em que as rochas não são atacadas igualmente, mesmo quando se encontram maciças e aparentemente homogêneas, enquanto o segundo ponto compreende que a decomposição se processa ao longo das diáclases (e outros planos de debilidade da rocha) e à medida que se aprofunda, deixa de lado massas não desagregadas, sob a forma de *boulders* de decomposição.

Ao analisar os *boulders* graníticos no Rio de Janeiro, Ruellan (1944) destaca que somente a atuação do clima úmido e quente não seria o suficiente para o desenvolvimento do conjunto de matacões. Segundo o autor, é fundamental que a rocha permaneça soterrada no solo, sob o manto intempérico, para que os processos de desagregação e a decomposição sejam ativos e eficientes. A situação foi constatada pelo autor ao analisar a ocorrência de matacões expostos ao ambiente subaéreo e/ou envoltos por matriz *in situ*

em perfis de intemperismo. Os matacões e blocos cortados em estradas, os quais mantinham-se na maior parte das vezes imersos no regolito demonstravam uma rápida evolução no reafeiçoamento da própria feição geomorfológica em comparação com os matacões graníticos expostos em ambiente subaéreo.

De acordo com Ruellan (1944), é evidente que a água carregada de ácidos tende a atuar de modo mais eficiente quando sua ação é contínua. O autor chama atenção igualmente ao processo de impermeabilização temporária a partir da evaporação e concentração de sais sobre as superfícies rochosas, sugerindo um papel secundário ao papel de alteração das rochas através da estagnação de água em ambiente subaéreo. A transcrição segue abaixo:

"[...] Não é irrigando um corpo com ácidos, depois deixando-o secar ao vento e ao sol que os químicos obtêm um efeito máximo, porém mergulhando-o num meio ácido. Longe de favorecer a ação química, a evaporação rápida produz, por capilaridade, uma migração das águas carregadas de sais para a superfície onde se forma um verdadeiro verniz que protege a rocha contra erosões mais profundas. É o que se verifica sob uma forma mais acentuada ainda nos desertos, onde os granitos, recobertos pelo verniz desértico e praticamente imutável, não se alteram do lado exposto ao sol; alteram-se ao contrário, do lado da sombra e em contato com a terra, onde a umidade depositada pelo orvalho se conserva e onde afloram também, por capilaridade, as águas de circulação subterrânea, sem serem imediatamente evaporadas [...]" (RUELLAN, 1944, p. 26).

Ruellan (1944) comenta que no contexto da desagregação e da decomposição das rochas do embasamento cristalino, resulta que o caos de blocos é formado em profundidades antes de serem exumados pela erosão fluvial ou marinha e que por consequência a desintegração depende da rede pré-existente de diáclases. A desagregação e a decomposição procedem dos planos de diaclases para os núcleos rochosos dos blocos. Uma rocha compacta e pouco diaclasada, por exemplo, resulta em blocos maiores de redução longa e difícil, enquanto em outros lugares, a rocha é partida em pequenas bolas facilmente convertidas em zonas arenosas e, posteriormente, em argilas (RUELLAN, 1944).

As observações de Ruellan sobre a exposição dos *boulders* em condições subaéreas, dificultando a ação intempérica sobre o substrato rochoso, encontram paridade na literatura acadêmica atual. Por exemplo, Bremer (1993) comenta que rochas desnudas

dificultam os processos intempéricos por não permitirem o acúmulo de umidade. No entanto, as formas de relevo granítico expostas podem atuar como áreas de (re)distribuição do escoamento superficial para zonas no entorno e que ainda podem estar recobertas pelo regolito ou manto intempérico e, conseqüentemente, sob ação da frente de alteração/intemperismo no contato solo-rocha (TWIDALE; VIDAL-ROMANÍ, 2005).

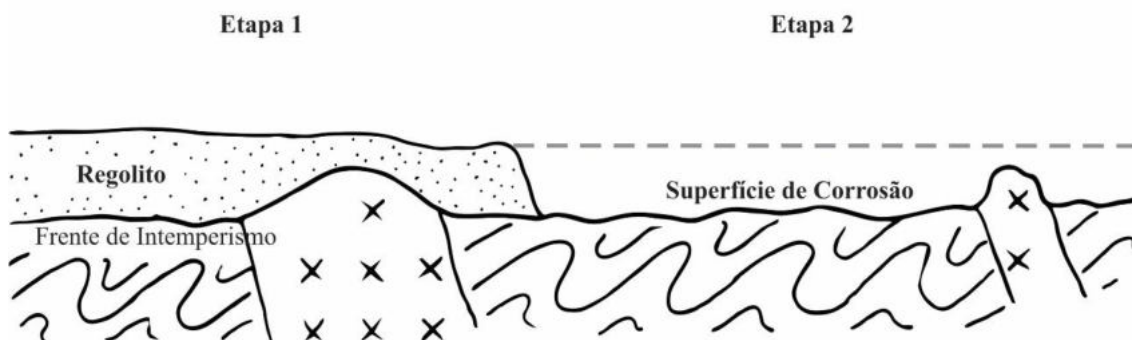
Embora os trabalhos referentes ao século XIX e início do século XX tenham deixado uma importante contribuição ao estudo sobre a decomposição das rochas no Brasil, seria necessário um intervalo de tempo até o desenvolvimento de um modelo incipiente de evolução da paisagem o qual integraria a dinâmica dos mantos intempéricos, a influência do *front* de intemperismo na modelagem das formas de relevo em condições subedáficas e, posteriormente, na exposição gradual das unidades e a formação de compartimentos geomorfológicos, principalmente em relação ao relevo granítico. O modelo em questão é denominado de teoria de etchplanação ou conceito de duplo estágio (duas etapas) de aplainamento, sendo aprimorado ao longo das décadas.

Segundo Twidale (1989), uma ampla diversidade de Formas Maiores e Menores do relevo granítico é modelada e esculpida abaixo da superfície, em condições subedáficas. As formas, na maior parte das vezes, encontram-se plenamente desenvolvidas na frente de intemperismo, ou seja, ao longo da base do perfil do regolito e recebem a alcunha de formas *etch* ou formas de corrosão. Em geral, as formas *etch* são expostas através de processos naturais, por exemplo, na ação remontante da rede de drenagem, ou por atividades humanas, em especial, a mineração e ao setor de engenharia e construção. Ainda segundo Twidale (1989), o termo *etch* se deve aos trabalhos de Wayland (1933) e a Willis (1936), no entanto remonta a Hassenfratz (1791) e Logan (1849, 1851) ao referir-se as Formas Menores e a Bornhardt (1900), Falconer (1911) e Jutson (1914) quando descreve as Formas Maiores como os *inselbergs* e os mosaicos aplainados de lajedos graníticos.

Twidale (1989, 2002) explica que as formas *etch* ou de corrosão química são desenvolvidas em duas etapas (Figura 29). A primeira se refere ao modelado da frente de alteração segundo os fatores que foram mencionados anteriormente. A etapa em questão é caracterizada por ocorrer em subsuperfície, ou seja, em condições subedáficas. A segunda etapa implica na denudação do regolito e a exposição da frente de alteração. Ainda que a remoção seja realizada em geral através dos rios, é possível que resultados similares ocorram por ação de ondas, glaciares e por ventos. Uma vez que superfície

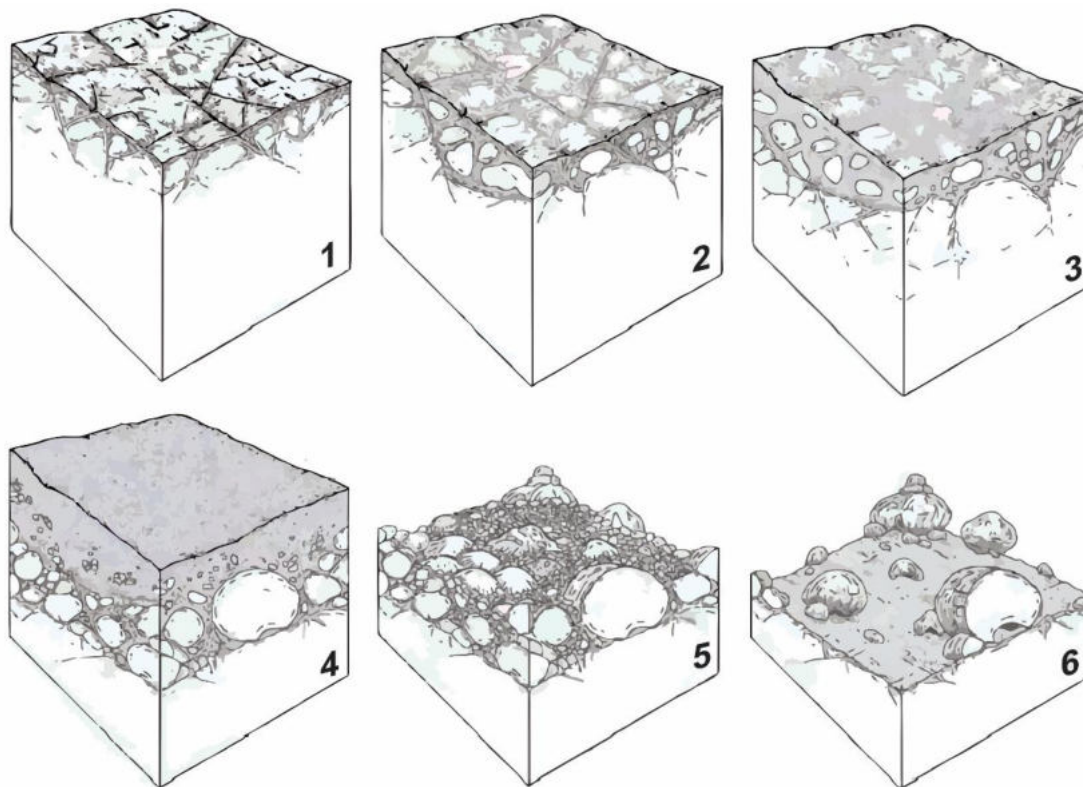
rochosa granítica seja exposta em condições subaéreas, removendo o contato solo-rocha e, conseqüentemente, a umidade que mantinha o processo de corrosão atuando sobre o substrato, o conjunto de formas do relevo granítico tende a permanecer relativamente seco e estável (TWIDALE, 1989).

Figura 29 - Diagrama das relações entre regolito, frente de intemperismo e formas *etch* ou de corrosão química. Modificado de: TWIDALE (1989).



Estudos recentes sobre a geomorfologia granítica do Nordeste Setentrional têm se baseado amplamente na teoria da etchplanação ou duplo estágio (duas etapas), desenvolvida no meio acadêmico internacional por Wayland (1933) e aprimorada por Büdel (1982), e que analisa a evolução e a dinâmica dos mantos de intemperismo que recobrem os terrenos granítico-gnáissicos, expondo posteriormente as distintas formas de relevo (Figura 30) que compõe os compartimentos geomorfológicos (PEULVAST; BÉTARD, 2015; MAIA; NASCIMENTO, 2018; MAIA *et al.*, 2015, 2018; LIMA, 2018; LIMA *et al.*, 2019; CORDEIRO *et al.*, 2018, 2019a, 2019b; BASTOS *et al.*, 2022). A proposta de Büdel (1957, 1982) baseia-se na interação entre a alteração geoquímica das rochas e o papel preponderante do intemperismo na análise geomorfológica. Ollier (1984) comenta que o aprofundamento da alteração é mais irregular que propriamente paralelo à superfície. O saprolito pode ser profundamente alterado em algumas zonas, enquanto outras zonas a alteração não é substancial. Mabbut (1962), ao constatar tal fato, propôs a alteração do termo superfície basal de intemperismo para *front* de alteração.

Figura 30 - Etapas de desenvolvimento do relevo saprolítico. Desde o estágio inicial com o aprofundamento do perfil de intemperismo sobre as fraturas até a remoção das fácies arenossílticas (zona de *grus*) e a exumação das formas do relevo saprolítico, por exemplo, os *boulders* ou matacões. Modificado: de MAIA *et al.* (2018).



De acordo com Büdel (1982), a formação do relevo tem início com o abaixamento gradual da superfície, determinado pela velocidade de aprofundamento da alteração e pelas características topográficas do *front* de alteração. As características em questão são interpretadas pela existência e disposição de falhas, fraturas e do arranjo estrutural, sendo que o *front* de alteração pode apresentar "corcovas" (VITTE, 2001). Uma vez que ocorre a predominância de juntas, as corcovas são desprendidas e formam blocos rochosos que se distribuem sobre o *front* de alteração.

Os horizontes superficiais, por sua vez, encontram-se predispostos à erosão mecânica, em função das influências sazonais da atmosfera, da ação biológica da fauna endopedônica e dos ácidos orgânicos que promovem a aluição do fundo matricial, por meio da quebra nas ligações ferro-argila, promovendo gradativamente a liberação dos finos e solutos. De maneira simultânea, o lençol freático é enriquecido com cátions e íons,

que passam a circular no topo do *front* de alteração, viabilizando a destruição da rocha (VITTE, 2001).

Ao explicitar a teoria de etchplanação, Vitte (2001) comenta que nas zonas em que a alteração é profunda, surgem depressões no qual o aprofundamento é dependente da intensidade do intemperismo e da ação do lençol freático. O lençol freático, uma vez confinado em falhas, fraturas ou mesmo em função da alterabilidade das rochas, tende a condicionar a velocidade de alteração, ao mesmo tempo em que isola zonas com graus diferentes de alteração. As depressões (leia-se áreas ou zonas de depressão) tem a função de receber e canalizar o escoamento superficial e subsuperficial, reorientando a água de infiltração para o front de alteração, mantendo a recarga durante a estação seca.

Büdel (1982) apreciava a ideia de que o sincronismo entre o aprofundamento de modo progressivo do front de alteração associado à erosão superficial acarretaria no isolamento de alguns setores do *front* de alteração que, gradativamente, seriam expostos de forma episódica, originando os *inselbergs*.

Assim, a proposta de Büdel (1982) sugere a existência de interrelação entre a alteração geoquímica das rochas e a erosão superficial, constituindo como base a ideia do duplo aplainamento, com a concepção de etchplanos. De acordo com Maia *et al.* (2020), a aceitação do entendimento da origem dos etchplanos, uma nova concepção foi trazida para o termo "erosão diferencial", considerando as diferenças litológicas no contexto geológico regional na elaboração do relevo (CORRÊA *et al.*, 2010), tendo em vista a maior ou menor resistência das rochas aos processos de intemperismo e erosão, resultando na origem de diferentes formas do relevo granítico.

Twidale (1989) destaca os cinco pontos principais que tratam o caráter das formas de corrosão química ou formas *etch*, a saber:

1º.) As formas de corrosão química podem ser igualmente modificadas após a exposição subaérea. Por exemplo, a estrutura de lascas de descamação tende a desintegrar em campos de blocos e domos. Os blocos, por sua vez podem ser partidos em razão de processo de termoclastia. As janelas (*ventanas* ou *visores*) que ocasionalmente são encontrados em tafoni podem ser eliminados em decorrência de climas mais úmidos. As depressões naturais de escala menor (centimétrica) podem ser destruídas com maior ou menor rapidez. As caneluras, por sua vez, podem ser recobertas por uma película de sais minerais ou algas que protege as superfícies das rochas subjacentes gerando uma inversão (do relevo), convertendo-se em protuberâncias de aspecto acanalado.

2º.) As características morfológicas similares podem estar bem desenvolvidas em um contexto de alteração por corrosão química em meios litológicos diferentes do granito; em particular as rochas ainda que sejam muito distintas nos aspectos químico, mineralógico e geneticamente aos granitos, no entanto, possuem características físicas similares, tais como, baixa permeabilidade e uma penetrabilidade bem desenvolvida - no que se refere a disposição do sistema de fraturamento. Desse modo, rochas compostas por arenitos, conglomerados, carbonáticas e toda uma ampla série de rochas vulcânicas e plutônicas podem vir a apresentar formas de relevo desenvolvidas a partir de processos de corrosão química.

3º.) As formas de corrosão química evoluem subsuperficialmente, abaixo do regolito, que pode possuir desde alguns poucos centímetros de espessura até mesmo alcançar uma profundidade de várias dezenas e, por vezes, a centena, de metros (OLLIER, 1965, 1984; THOMAS, 1966, 1978). Qualquer que seja o meio superficial, e em particular o clima atmosférico, é tido como secundário em relação a alteração diferencial do substrato rochoso situado na base do regolito. A estrutura, o clima do solo e o tempo são fatores importantes. Os primeiros porque produzem a alteração diferencial e o relevo em subsuperfície, porém, se a alteração se prolonga durante muito tempo, todas as formas, até os mais pronunciados contrastes estruturais são eliminados, de maneira que em geral resultam nas superfícies aplainadas (lajedos) ou plataformas graníticas. O clima e a vegetação influenciam de modo incontestável na natureza das reações químicas que tem lugar na frente de alteração, assim como a natureza do substrato rochoso, no entanto, os produtos finais são similares. Assim, as formas de corrosão química ou formas *etch* tendem a apresentar um caráter de azonalidade. Por exemplo, a ampla distribuição de *inselbergs*, *boulders* e superfícies aplainadas (lajedos) em terrenos graníticos; o desenvolvimento de torres e cúpulas cársticas em zonas calcárias de climas tropicais e frias, de pilares em arenitos e conglomerados, de matacões, depressões naturais e caneluras nos três tipos de rochas (sedimentar, magmática e metamórfica); e, por fim, de formas do tipo *flared slopes* em arenitos, conglomerados e rochas vulcânicas.

4º.) As formas de corrosão química têm duas idades, uma relacionada ao período de desenvolvimento subsuperficial e a outra referente ao período de denudação ou de exposição. Os dois podem ser muito próximos, no sentido temporal, ou podem estar separados por milhões de anos. Por exemplo, a superfície lateritizada e sua frente de alteração associado ao lineamento do Monte Lofty, na Austrália, é tido de uma suposta

idade Triássica, mas a denudação do regolito e a exposição da frente de alteração tem início somente no cenozoico, sendo decorrente de processos de soerguimento do horst regional. Por outro lado, a laterita de Yilgan, também localizado na Austrália, se desenvolveu entre o Cretáceo e o Eoceno, porém no final do período eocênico sofreu uma rápida e expressiva denudação em razão da eficiente e bem estabelecida sistema de drenagem.

5°.) Algumas formas de corrosão química ou formas *etch* são poligenéticas. Todas iniciaram abaixo da superfície continental e muitas foram expostas a partir do trabalho remontante da erosão fluvial, no entanto, em outros casos as formas foram expostas pela atuação das massas de gelo glacial (Platô do Labrador, no Canadá), por ondas do oceano, em um contexto costeiro (TWIDALE, 1977), e ainda pelo trabalho eólico (PEEL, 1966).

Assim, as formas de corrosão química detêm características distintas e implicações no meio acadêmico, entre elas a que se destaca é justamente por se tratar de formas do relevo que ocorrem de modo azonal, questionando de modo incisivo a geomorfologia climática como base preponderante na interpretação do desenvolvimento das paisagens e destacando a importância do controle estrutural.

Maia *et al.* (2020) mencionam que o modelo de evolução das paisagens proposto por Büdel, teoria da *etchplanação* ou duplo estágio, tem como base a estabilidade tectônica e a existência de condições climáticas tropicais semiúmidas, demonstrando a importância dos fatores estruturais e climáticos no processo de intemperismo, e deste na diferenciação morfológica das paisagens. No entanto, há um destaque em relação a importância das fases úmidas ocorridas no Cenozoico, durante o Paleógeno/Neógeno e o Quaternário (LIMA, 2008; LIMA *et al.*, 2011; LIMA, 2018, RODRIGUES *et al.*, 2019; SANTOS *et al.*, 2022). Ainda segundo os autores, o nordeste brasileiro constitui um recorte espacial onde as variações climáticas quaternárias permitem uma interpretação da sua geomorfogênese a partir da teoria da *etchplanação* (SANTOS; SALGADO, 2010; PEULVAST; BETÁRD, 2015) e evidências são observadas nas paisagens graníticas. O registro de alterações climáticas corresponde ao conjunto de levantamentos realizados em diferentes setores do atual núcleo semiárido nordestino, evidenciando a predominância de condições de semiaridez intercalado por períodos de maior umidade (OLIVEIRA *et al.*, 1999; WANG *et al.*, 2004; BEHLING *et al.*, 2000; LIMA, 2008; LIMA *et al.*, 2011) que podem ter viabilizado os processos de *etchplanação* ou duplo estágio de *aplainamento*.

De acordo com Lima (2008), a datação de minerais supergênicos precipitados em diversos perfis de intemperismo, fornece a idade mínima de exposição das diferentes superfícies presentes na Província Borborema. Ao utilizar de modo integrado os métodos de datação $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ e (U-Th)/He foi possível obter informações sobre as idades a partir de amostras coletadas em perfis de intemperismo nos três principais domínios geomorfológicos: o Planalto Borborema, a Depressão Sertaneja¹⁵ e os Tabuleiros Costeiros.

Lima (2008) demonstra que um número expressivo de amostras denota a presença de períodos mais pronunciados de intemperismo. Em relação aos óxidos de manganês, analisados através do método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, os principais picos apresentam idades de 28, 15, 10, 5.5 e 1.5 Ma; já os períodos obtidos a partir do método (U-Th)/He em geotitas, as idades são de 17, 10 e 3.5 Ma. Os picos nos ideogramas sugerem que um intenso enriquecimento de óxidos de manganês e óxidos/hidróxidos de ferro ocorreu no perfil, indicando que parte do Nordeste do Brasil estava provavelmente submetida a condições quentes e úmidas naquelas épocas. A maior parte dos eventos climáticos globais são bem correlacionados com este intemperismo intenso e eventos de precipitação mineral.

Durante o período de 16 a 7 Ma, perfis de intemperismo ocorreram de modo simultâneo nos domínios do Planalto da Borborema e Planícies e Tabuleiros Costeiros, indicando a presença de uma história climática semelhante, para ambos domínios. O intenso intemperismo e enriquecimento de óxidos/hidróxidos de manganês e ferro durante esse período sugerem que a região do interior (Planalto da Borborema) e do litoral (Planícies e Tabuleiros Costeiros) estavam sob um clima quente e úmido, neste intervalo de tempo durante o Mioceno.

Um significativo número de amostras presentes no domínio do Planalto da Borborema, mostra uma idade de 1.5 Ma, semelhante as idades obtidas no domínio da Depressão Sertaneja, indicando a ocorrência de intemperismo tanto no Planalto da Borborema (altas cotas topográficas) quanto no domínio da Depressão Sertaneja (baixas cotas topográficas), durante o Pleistoceno. Este intemperismo mais recente também foi

¹⁵ O termo Depressão Sertaneja foi largamente utilizado na literatura clássica ao referir-se as superfícies topograficamente mais baixas da porção interiorana do Nordeste do Brasil. No entanto, o presente estudo baseia-se na proposta de classificação de Costa *et al.* (2020), o qual divide a partir de critérios altimétricos, de dissecação e localização, caracterizando a morfologia associada a cada compartimento de relevo, em diferentes unidades de superfícies sertanejas. Na área de estudo, por exemplo, os tanques naturais fossilíferos encontram-se distribuídos sobre a Superfície Sertaneja 1 (SS1).

identificado no domínio das Planícies e Tabuleiros Costeiros a partir de análises (U-Th)/He.

Os resultados $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de amostras de óxidos de manganês, oriundos de perfis de intemperismo desenvolvidos na Superfície da Borborema, apresentaram idades de até 31 Ma, caracterizando uma idade mínima Oligocênica para a formação desta superfície. A idade de 43 Ma obtida para os pisólitos detríticos presentes na Formação Barreiras, material interpretado como proveniente do desmantelamento dos perfis de intemperismo presente na Superfície Borborema, pode indiretamente fornecer uma idade mínima de formação desta superfície mais antiga, reportando ao Eoceno.

Os perfis de intemperismo na Depressão Sertaneja fornecem idades patamar ou patamar-forçado que variam de 3.1 ± 0.5 a 0.8 ± 0.4 Ma, indicando uma história de intemperismo mais recente para esta superfície. Os perfis de intemperismo rasos e incipientes da Depressão Sertaneja, todos mais jovens que 3 Ma, indicam uma história mais ativa de erosão em relação a esta superfície, o que impediu a formação ou, principalmente, na preservação de perfis de intemperismo mais antigos. Os perfis de intemperismo incipientes e rasos da Depressão Sertaneja, datados em torno de 1.5 Ma, caracterizam o contínuo retrabalhamento desta superfície.

Os óxidos de manganês analisados e provenientes do intemperismo da Formação Barreiras forneceram idades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ que variam entre 13.1 ± 0.9 a 7.7 ± 0.4 Ma. As idades (U-Th)/He obtidas para as goethitas que ocorrem cimentando o material sedimentar da Formação Barreiras variam de 17.7 ± 1.8 a 13.6 ± 1.4 Ma. Os resultados obtidos nas diferentes bandas de crescimento dos pisólitos interpretados como formados durante o intemperismo da Formação Barreiras, indicam idades que variam de 17.8 ± 1.8 a 7.5 ± 0.8 Ma. Estes resultados indicam que a Formação Barreiras possui idade mínima de 17 Ma. A idade do material detrítico, previamente intemperizado, indica que a fonte foi total ou parcialmente erodida e depositada como detrito pelo menos no início do Mioceno inferior.

No contexto da estratigrafia e profundidade dos perfis de intemperismo desenvolvidos em cada um dos três domínios geomorfológicos, é possível observar que os perfis que ocorrem em cotas altimétricas elevadas no interior do continente, capeando a chamada Superfície Borborema, são mais profundos, alcançando os 100 m, sendo caracterizados como perfis lateríticos; nas áreas topograficamente mais baixas e que constituem a Superfície Sertaneja ocorrem perfis mais rasos e incipientes com 2 a 5

metros de profundidade; e os perfis de intemperismo que ocorrem na zona litorânea são moderadamente desenvolvidos, podendo alcançar até os 25 m de profundidade, sendo caracterizados, principalmente, por espessos saprolitos e zonas mosqueadas. Os resultados mais antigos referem-se aos perfis de intemperismo profundos e complexos presentes nas regiões de cota altimétrica mais elevada. Idades mais novas representam processos de intemperismo mais recente atuantes em porções elevadas da Borborema.

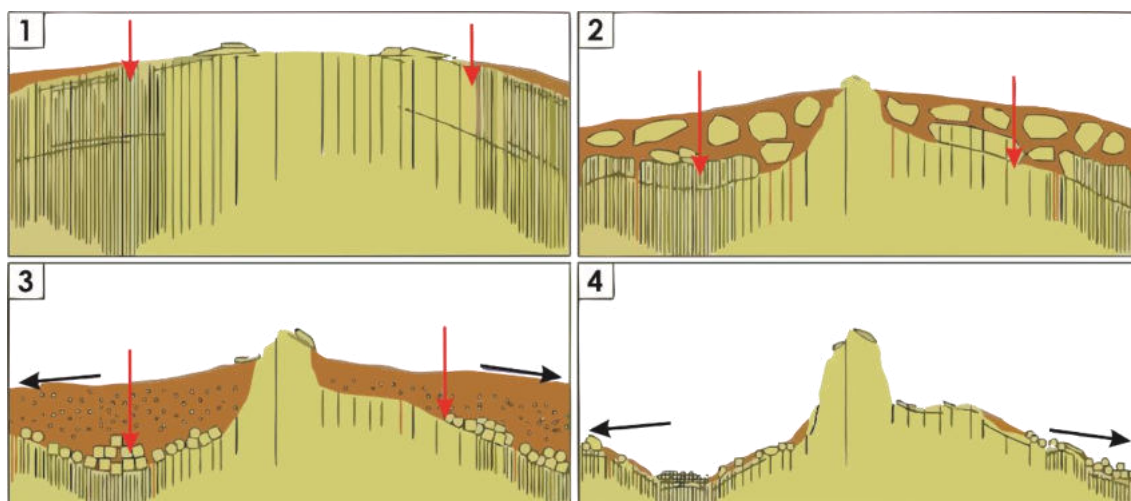
A preservação de espessos perfis de intemperismo nas regiões elevadas da Borborema indica que a região do Planalto da Borborema apresenta taxas de erosão bem menores do que as observadas na região da Depressão Sertaneja. A presença de perfil laterítico desenvolvido nas partes rebaixadas do relevo que compõem as Planícies e Tabuleiros Costeiros sugere que desde o Mioceno Médio a região sofreu uma erosão atenuada, o que justifica sua posição topográfica mais elevada em relação aos limites norte e leste da Superfície Sertaneja (LIMA, 2008; LIMA *et al.*, 2011). Cabe destacar que levantamentos palinológicos sugerem alterações climáticas bruscas a partir do Pleistoceno, indicando intensas precipitações e maior concentração de umidade (OLIVEIRA *et al.*, 1999; BEHLING *et al.*, 2000).

Para Maia; Nascimento (2018), nas áreas interioranas constituídas por terrenos granítico-metamórficos do Nordeste Setentrional, é comum encontrar formas de relevo saprolítico. Nesse contexto, uma série de formas residuais derivadas de um paleomanto de alteração ou *grus*¹⁶ evidenciam fases erosivas que as fases erosivas desencadeadas em períodos de morfogênese ativa removeram parcialmente os detritos friáveis resultantes da meteorização inicial. Ainda de acordo com os autores, entre as ocorrências destacam-se lajedos, matacões, matacões e *tors* que em conjunto resguardam em suas formas, indicadores geomorfológicos que sugerem a diferentes graus de formação de *grus*. Em momento posterior, a remoção de detritos friáveis resultou na permanência dos blocos de maior tamanho pela incapacidade de sua remoção através de agentes erosivos. Desse modo, constituem formas associadas a um paleoambiente epigênico provavelmente vinculada a sistemas meteóricos derivados de climas tropicais mais úmidos (MAIA; NASCIMENTO, 2018).

¹⁶ O primeiro produto resultante da decomposição do granito é uma massa arenosa constituída predominantemente por quartzo, e outros fenocristais de feldspato com pequenas quantidades de argila, sendo denominado "*grus*" ou saprolito. O termo *grus* é oriundo do alemão e significa "cascalho" em português. O *grus* constitui o material granítico alterado e não mobilizado, correspondente na literatura geomorfológica a denominada "*arena in situ*", sendo bastante vulnerável a remoção e ao transporte através da erosão fluvial e pluvial (HUBP, 2011).

Uma série de pesquisas recentes sobre a morfogênese de *inselbergs* e a diversidade de formas maiores e menores em terrenos graníticos no estado do Ceará têm destacado a atuação de processos de duplo estágio de aplainamento e os indícios de existência de paleomantos intempéricos no desenvolvimento de relevo nordestino. Ao destacar o condicionamento morfoestrutural do *inselberg* Pedra da Andorinha, no distrito de Taparuaba (município de Sobral), Rodrigues *et al.* (2019) comenta que a densidade de fraturas primárias beneficiou a atuação do intemperismo químico, de modo que os compartimentos deformados intrínsecos a estrutura do monólito foram convertidos em planos de percolação, aumentando a permeabilidade do granitoide. A partir da coesão litológica diminuída, os processos de decomposição mineral puderam atuar com maior eficiência, aprofundando de modo mais incisivo o *front* de alteração (Figura 31).

Figura 31 - Etapa evolutiva da Pedra da Andorinha, no distrito de Taparuaba (CE). Os processos de aprofundamento intempérico podem ser observados no quadro 1 e 2, enquanto que a erosão diferencial é evidenciada nos quadros 3 e 4. Modificado de: RODRIGUES *et al.* (2019).



De acordo com Rodrigues *et al.* (2019), o granitoide passou por intensas fases pedogenéticas, resultante da atuação de condições climáticas úmidas e associadas a períodos de estabilidade tectônica. Após esse estágio isovolumétrico, a exumação dos relevos basais foi impulsionada por etapas de lavagem. As condições secas, intensificaram a ação do escoamento superficial, alcançando as feições saprolíticas, resultando no rebaixamento do nível de base local.

Rodrigues *et al.* (2019) comenta que na fase isovolumétrica do aplainamento, o bloco que corresponde a Pedra da Andorinha sofreu um efeito menor do intemperismo epigênico em virtude da baixa concentração de juntas. Desse modo, o *inselberg* foi

exumado como um núcleo de resistência em relação aos processos químicos e mecânicos diferenciais (Figura 32). A denudação e o rebaixamento do nível de base influenciaram a preservação da morfologia atualmente exposta. Assim, o monolito da Pedra da Andorinha foi alçado em detrimento do entorno que era caracterizado pela alta densidade de fraturas e maior constância do intemperismo químico.

Figura 32 - Pedra da Andorinha, distrito de Taparuaba, no município de Sobral (CE). Foto: Rubson Pinheiro Maia, 2018.



Ao analisar a geomorfologia granítica do Maciço de Uruburetama, Lima (2018) comenta igualmente sobre a importância das mudanças climáticas no Nordeste Brasileiro, em especial as fases úmidas durante o Quaternário, em especial no Pleistoceno, que alteraram através do intemperismo químico o substrato rochoso sob o manto regolítico (Figura 33). O controle estrutural e litológico foi o responsável pela disposição e aprofundamento da frente de intemperismo sobre o maciço granítico em subsuperfície, constituindo um processo de meteorização seletiva e a formação de mantos de alteração com diferentes espessuras. Em fases secas, o manto de alteração seria removido de modo a expor a feição granítica, evidenciando estruturas mais profundas. No entanto, uma vez expostas, as Formas Maiores e Menores tenderiam a continuar sua evolução, desenvolvendo inclusive outros tipos de feições (fraturamento e/ou dissolução).

Figura 33 - Vertente dissecada úmida do Maciço de Uruburetama e a superfície aplainada que compreende a Superfície Sertaneja 1, município de Itapipoca (CE). Foto: Henrique de Castro Sampaio, Dez./2021.



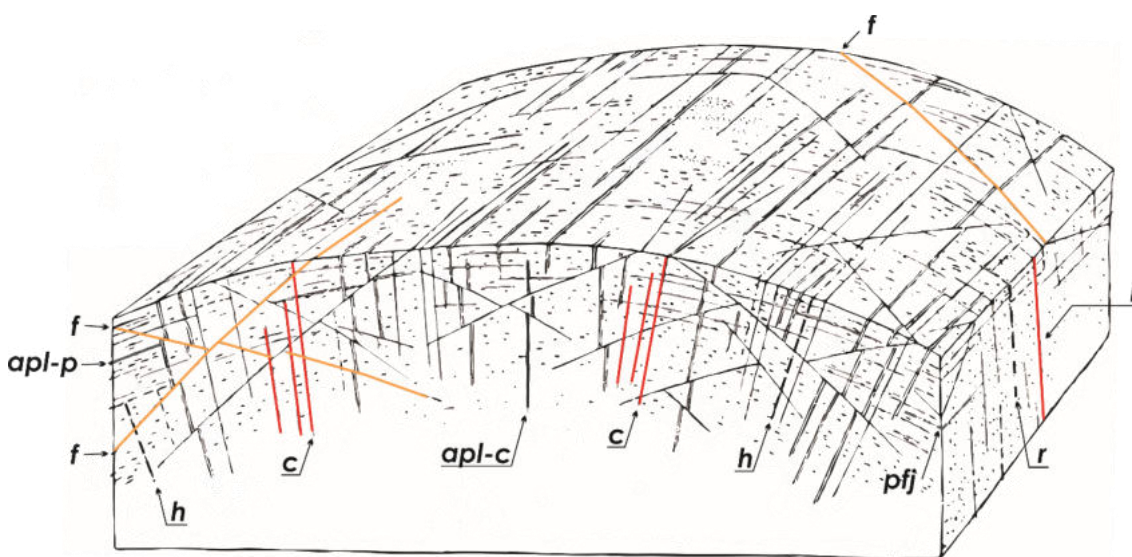
É importante destacar que Lima (2018) baseia-se na teoria de etchplanação para interpretação geomorfológica do desenvolvimento do Maciço de Uruburetama e área do entorno, considerando os conceitos de *backwearing* (alargamento dos vales fluviais e o recuo lateral das vertentes) e, principalmente, de etchplanação (*downwearing* - rebaixamento gradual das vertentes) como os processos responsáveis pela gênese e desenvolvimento das formas de relevo graníticas.

3.1.3 Controle litológico e estrutural

O controle estrutural consiste em um dos fatores mais importantes na discussão sobre a origem de tanques naturais em terrenos graníticos no semiárido brasileiro. O debate sobre o controle litológico-estrutural foi ampliado no meio acadêmico nacional a partir da década de 1990, recebendo notoriedade em uma série de publicações científicas.

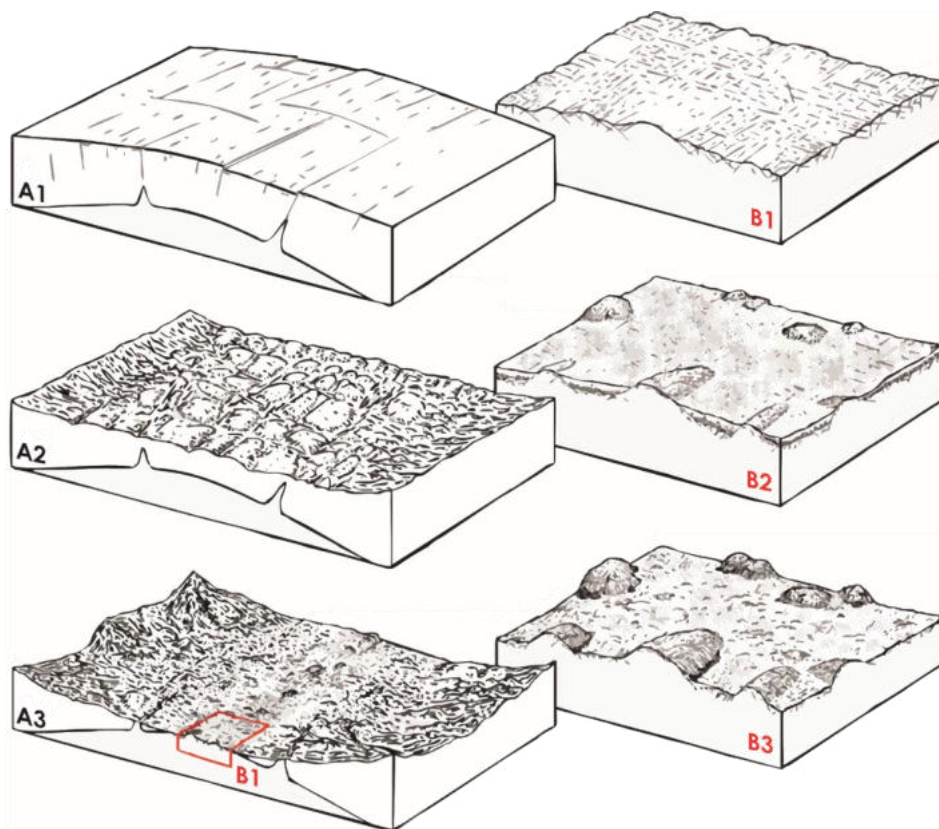
O granito é uma rocha que dá origem a ampla variedade de formas de relevo e se apresenta na paisagem tanto como uma rocha resistente, mas também como uma rocha friável (DERRUAU, 1983). Tais variações são controladas pela presença de domínios rochosos maciços e de domínios fraturados vulneráveis ao intemperismo químico em ambientes subedáficos (AMARAL, 1973, 1974; PEDRAZA, 1994, 1996; PEDRAZA et al., 1989; TWIDALE, 1982, 1989, 1998, 2002; TWIDALE; VIDAL-ROMANÍ, 2005; VIDAL-ROMANÍ, 1989; VIDAL-ROMANÍ; TWIDALE, 1998; DEMANGEOT, 2000; MIGOÑ, 2006, 2010; MAYOR RODRIGUEZ, 2011; MAIA; NASCIMENTO, 2018; MAIA *et al.*, 2015, 2018; LIMA, 2018; LIMA *et al.*, 2019) sob atuação de paleoclimas distintos. A densidade dos sistemas de fraturas/diáclases é fator preponderante no curso do intemperismo (Figura 34), prevalecendo sobre propriedades intrínsecas, como textura e mineralogia do granito (TWIDALE, 1982, 1986a, 1986b, 1989, 1998).

Figura 34 - Diagrama de fraturas de Hans Cloos em um batólito: (C) Juntas conjugadas; (I) Juntas longitudinais; (f) Juntas sub-horizontais, sendo que algumas constituem planos de estiramento; (r) Superfície - Rife plane; (h) Superfície - Hardway plane; (apl-p) diques aplíticos (sill); (apl-c) diques apolíticos conjugados; (pfj) são planos sub-horizontais; e linhas e traços são estruturas de fluxos lineares. Modificado de: CLOSS (1923).



Segundo Vidal-Romaní e Twidale (1998) as fraturas são principais vias de acesso para a água meteórica penetrar ao longo do substrato rochoso. Twidale (1986a) indica que o granito apresenta baixa porosidade com valores representativos menores que 1%, correspondendo normalmente à ordem de 0.1%, e, portanto, uma baixa permeabilidade ou deficiência na capacidade de transmitir água através do corpo rochoso. No entanto, algumas massas de granito são altamente permeáveis devido ao conjunto e densidade de fraturas/diáclases. Ao longo das fraturas e em contato permanente com a água (regolito umedecido) o substrato rochoso é rapidamente alterado. A frente de intemperismo avança por processos de dissolução, hidratação, hidrólise e oxidação pelos planos de fratura, além de bactérias que podem facilitar a penetração de água em escala granulométrica levando à formação de matacões, convertendo-se em blocos angulares em núcleos arredondados (Figura 35) (TWIDALE; VIDAL-ROMANÍ, 2005).

Figura 35 - Evolução esquemática da relação entre erosão diferencial e exumação de batólitos. **A1** - O magma sobe e exerce pressão sobre a crosta sobrejacente produzindo fraturas. **A2** - As fraturas condicionam os processos erosivos intensificando a dissecação. **A3** - Formação de uma depressão circundada por relevos residuais que possibilitaram o afloramento do batólito. **B1** - Superfície do Batólito exumada. **B2** - As fraturas facilitam o processo de intemperismo superficial resultando em alteração do manto. **B3** - Em uma fase erosiva, o manto de alteração é removido expondo as irregularidades do embasamento, expondo os inselbergs. Modificado de: MAIA; BEZERRA (2020).



De acordo com Twidale (1986a) a frente de intemperismo é irregular, uma vez que existe uma tendência para que qualquer posição do substrato rochoso seja atacada e alterada, preferencialmente nas áreas consideradas suscetíveis ao intemperismo químico, por exemplo, sobre os sistemas (intersecção) de fraturas/diáclases e bandamentos composicionais do corpo intrusivo. De acordo com o autor, algumas das frentes de intemperismo quando expostas são notavelmente lisas. No entanto, em outros casos o intemperismo diferencial atua, através da corrosão química, diretamente sobre os minerais de mica e feldspato, poupando os cristais de quartzo¹⁷, e reafeição em microrelevo os fenocristais de ortoclásio e microclina. O efeito da corrosão química preferencial sobre os diferentes minerais que compõem o granito resulta em uma superfície picoteada, denominada também, em língua inglesa, de "*pitting*". Esse tipo de efeito corrosivo pode ser observado sobre a superfície dos lajedos e no interior dos tanques naturais (Figura 36).

A ação da água meteórica resulta em alterações, a biotita, por exemplo, é convertida para hidrobiotita, vermiculita e argilas, as reações são acompanhadas pela liberação de óxido de ferro (TWIDALE, 1986a). O feldspato também é alterado em argila, geralmente em caulinita, enquanto que o quartzo, apesar de ser corroído, resiste por muito mais tempo devido à sua dureza na escala de Mohs que os minerais de feldspato e mica. O primeiro produto resultante da decomposição do granito é uma massa arenosa constituída predominantemente por quartzo, em outros fenocristais de feldspato, com pequenas quantidades de argila, sendo denominado como "*grus*", termo alemão que significa "cascalho" em português. Posteriormente, o material é alterado em uma massa de argila com fragmentos de quartzo. Os óxidos de ferro e a sílica também são mobilizados e concentrados próximos da base do regolito e na frente de intemperismo, onde a concentração de ferro, por exemplo, pode ser 2 a 3 vezes maior do que na rocha fresca.

¹⁷ Ao estimar o tempo de alteração dos principais minerais que compõe as rochas graníticas, Twidale (1989) destaca que as micas e os feldspatos se alteram rapidamente, o primeiro em questão de décadas, enquanto que o segundo dura o intervalo de poucos séculos. O quartzo, por sua vez, também é atacado, principalmente por processos de dissolução, no entanto, de um modo muito mais lento (10^{5-6} anos) em relação aos outros dois componentes primários do granito.

Figura 36 - Registro da superfície picoteada no interior de um tanque natural localizado no Sítio Paleontológico João Cativo - município de Itapipoca (CE). É possível observar o recuo lateral (*flared slope*), recentemente escavado, no contato solo-rocha. Foto: Felipe Waldherr, Jul./2019.



O granito alterado difere marcadamente da rocha sã não apenas no aspecto mineralógico e químico, mas também em suas características físicas. Segundo Twidale (1986a) a permeabilidade aumenta drasticamente a capacidade do granito alterado, sendo até 60 vezes maior em comparação com a rocha inalterada. Os blocos de rocha fresca, conhecidos na região Sudeste do Brasil como matacões, podem resistir envolvidos pelo material inconsolidado que constitui o regolito. Ainda segundo o autor australiano os blocos são delimitados por fraturas e constituem núcleos que ainda não foram consumidos ou alterados pelo ataque químico das águas vadasas. De maneira geral os blocos ocorrem com maior frequência na base do regolito, mas isso não é recorrente em todos os lugares, em alguns casos os matacões podem ser ingeridos pelo regolito como resultado do ataque de umidade prolongado. O regolito, portanto, constitui uma camada que varia em espessura e que de certa maneira acaba por mascarar o embasamento cristalino.

Outro mecanismo que pode ser observado nas paredes laterais dos tanques é a desagregação em placas (lascas de descamação ou descamação interna - *flaking*) e a desagregação granular (Figura 37). Segundo Mayor Rodríguez (2011) as placas podem ter a espessura entre 1 a 10 mm, podendo ser mais grossas, ainda, de ordem de 1 a 15 cm,

e para estas tem sido utilizado o termo em inglês "*scaling*". Assim, a descamação pode ocorrer de maneira simples ou múltipla. Já a desagregação granular, de etapas menos avançadas, tem início na desagregação a partir de grão e, posteriormente, o mecanismo se propaga centrifugamente a partir da unidade removida.

Figura 37 - Registro do interior do Tanque Natural Criminoso, localizado no Sítio Paleontológico Lajinhas - município de Itapipoca (CE). Na superfície rochosa é possível observar o recuo lateral (*flared slope*) e o processo de desagregação em placas. Foto: Felipe Waldherr, Jan./2020.



Segundo Pedraza (1996), os relevos graníticos procedem de modelados diferenciais, oriundos de intemperismo e erosão seletiva. O primeiro define os traços característicos, sendo o resultado da alteração química e decomposição sobre o substrato rochoso, predominantemente, através da corrosão química; enquanto o segundo é responsável pela remoção do material alterado. De acordo com o autor espanhol a dinâmica entre as três variáveis (composição, textura e fraturamento) podem resultar na ocorrência de porções ou zonas arenosas próximas a áreas de afloramentos graníticos. As áreas em questão são denominadas, como já citadas anteriormente, como "*grus*". O "*grus*" constitui o material granítico alterado e não mobilizado, correspondente na literatura geomorfológica a denominada "*arena in situ*", sendo bastante vulnerável a remoção e ao transporte através da erosão fluvial e pluvial.

De acordo com Twidale (1986b) o efeito mais importante do intemperismo, no contexto geomorfológico, é dado pela formação de duas zonas com propriedades físicas e químicas contrastantes, onde anteriormente existia somente uma. O intemperismo possui aspectos construtivos e destrutivos, por exemplo, as duricrostas têm sua origem no regolito, enquanto o processo de meteorização (alteração) converte o granito resistente e coeso em um regolito fraco e friável. Assim o primeiro é considerado estável e o último, constituído por material inconsolidado, é rapidamente erodido. O regolito uma vez situado acima do nível de base se torna particularmente vulnerável à erosão de agentes exógenos, resultando na exposição das formas *etch* e da frente de intemperismo como uma superfície moldada/esculpida sobre a rocha sã.

3.2 Hipóteses sobre a origem de tanques naturais (monofásico e polifásico) e caldeirões e/ou marmitas

Segundo Mayor Rodríguez (2011), os modelos elaborados para a origem de feições análogas aos tanques naturais no maciço granítico de O Pindo, no noroeste da Espanha, podem ser analisados em dois grupos distintos, os modelos monofásicos e os polifásicos (Quadro 01). O primeiro propõe uma origem estritamente subaérea para as cavidades. O modelo polifásico, por sua vez, propõe uma origem em subsuperfície para essas feições, podendo ser subedáficos ou gerados por concentração de cargas; posteriormente, essas depressões iniciadas em subsuperfície são condicionadas aos mesmos controles exógenos indicados abaixo para os tanques de origem monofásica.

Quadro 1 - Os tipos genéticos de gnammas (*sensu* Mayor Rodríguez, 2011), os quais podem ser aplicados aos tanques naturais do semiárido brasileiro. Modificado de: MAYOR RODRÍGUEZ (2011).

Monofásicos	Polifásicos	
<i>Controle estrutural</i>	<i>Subedáficos</i>	
<i>Controle litológico</i>	<i>Concentração de cargas</i>	<i>Via gravitacional</i>
<i>Controle climático</i>		<i>Via tectônica</i>
<i>Controle biológico</i>		
<i>Controle dinâmico</i>		

3.2.1 Os tanques naturais monofásicos

Os tanques monofásicos possuem origem subaérea ou epigênico; são desenvolvidos pelo contato direto da água sobre a superfície rochosa, permanecendo estagnado em uma depressão preexistente. As feições expostas estariam associadas ao conjunto de fraturas expostas ou à distribuição de xenólitos no embasamento cristalino que são retrabalhados, de maneira contínua, pelo intemperismo físico, químico e/ou biológico.

De acordo com Mayor Rodríguez (2011) as cavidades analisadas no maciço granítico de O Pindo, geralmente, possuem tamanho menor (centimétricos) de forma circular, não apresentam exutórios na maior parte das vezes e ocorrem em agrupamentos. O mesmo autor define os fatores que condicionam a origem de tanques monofásicos, entre eles os controles estrutural, litológico, climático, biológico e dinâmico:

- i) **Controle estrutural:** planos de foliação, sistema de diáclases ou pontos de interseção de fraturas;
- ii) **Controle litológico:** enclaves na superfície rochosa (por exemplo, os xenólitos);
- iii) **Controle climático:** processo de haloclastia, concentração de sais, ou mesmo pela umidade como fator predominante;
- iv) **Controle biológico:** denominado de *micropitting*, são cavidades elaboradas por microfauna e flora, nos quais líquens possuem papel predominante;
- v) **Controle dinâmico:** cavidades resultantes do processo de transporte e atrito de clastos carregados ao longo do leito fluvial (efeito de evorsão). O trabalho eólico também é considerado como agente dinâmico.

Desde o século XIX, os modelos propostos para a origem de tanques naturais no semiárido brasileiro (CAPANEMA, 1866; BRANNER, 1915; MORAES, 1924, 1928; MORAES RÊGO, 1926; DOMINGUES, 1952; ROLIM, 1974, 1982; PAULA COUTO, 1980; SANTOS, 1982; OLIVEIRA, 1989; OLIVEIRA *et al.*, 1989; OLIVEIRA; HACKSPACHER, 1989; MABESOONE; CASTRO, 1975; MABESOONE *et al.*, 1990) podem ser entendidos a partir do quadro apresentado por Mayor Rodríguez (2011) em três situações monofásicas: (i) processo de evorsão: o efeito seria o responsável pela corrosão sobre as rochas de leito do rio, sendo provocada por movimentos turbilhonares. Segundo alguns autores a abrasão física contínua, realizada por sedimentos arenosos e mobilizada por vórtices de água, resultaria em depressões conhecidas como marmitas, de formas cilíndricas; e (ii) fator composicional do embasamento cristalino.

A ideia de homogeneidade atribuída aos granitos pode levar o pesquisador a uma interpretação equivocada e parcial dos processos de formação dos tanques naturais. A presença de xenólitos, ricos em biotita ou xenólitos melanocráticos de composição básica, pode induzir, por intemperismo diferencial, a formação de pequenas concavidades arredondadas na superfície. Esses pequenos enclaves podem, posteriormente, se desenvolver até formar depressões equivalentes a tanques rasos com fundo côncavo; iii) Influência do sistema de fraturas e diáclases: no nordeste brasileiro as regiões no entorno de *inselbergs* são áreas caracterizadas pelo intenso fraturamento e a presença de grandes descontinuidades. As zonas de debilidade litológica-estrutural tendem também a concentrar a maior parte do registro e/ou ocorrência de tanques naturais fossilíferos distribuídos na depressão sertaneja. Em trabalhos anteriores, a gênese desses tanques foi associada ao trabalho intempérico que percorre as linhas ou zonas de maior suscetibilidade ou fraqueza do terreno, no caso, o sistema de fraturas e diáclases. Em todos os modelos apresentados a atuação da água, envolvida nos processos de solução, hidratação e hidrólise, é a responsável pela meteorização diferencial na frente de intemperismo, além do alargamento e aprofundamento, o reafeiçoamento em subsuperfície tende a diferenciar as depressões após a exposição subaérea (TWIDALE; VIDAL-ROMANÍ, 2005).

3.2.2 Os tanques naturais polifásicos

Um outro processo tem sido considerado no meio internacional para a origem de formas semelhantes aos tanques naturais brasileiros, sendo denominado como migração e concentração de cargas. Este processo, em ambientes subedáficos, configurou-se como base para um modelo que fundamentado na aplicação de força (tensão), induzida pela migração e concentração de cargas, em áreas específicas do embasamento cristalino. A força (tensão) exercida em determinados pontos, por exemplo, entre o conjunto de fraturas/diáclases resultaria em deformações elásticas internas que, ao longo do tempo, podem se tornar permanentes (VIDAL-ROMANÍ, 1984, 1985, 1989, 1990, 2008; VIDAL-ROMANÍ *et al.*, 2014a, 2014b, 2018; MAYOR RODRÍGUEZ, 2011). Esses pontos específicos de contato se configuram em zonas suscetíveis e preferenciais ao ataque intempérico tanto em subsuperfície, inclusive demonstrados a partir de evidências geofísicas (ROQUÉ *et al.*, 2013), como em condições subaéreas (MAYOR RODRÍGUEZ, 2011; VIDAL-ROMANÍ *et al.*, 2014a, 2014b, 2018).

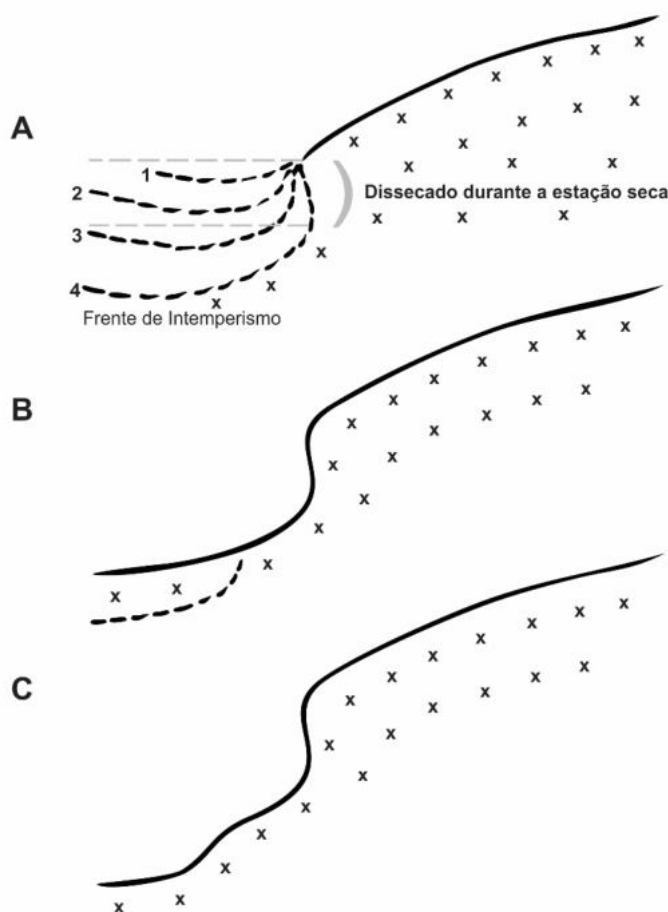
Os tanques polifásicos subedáficos desenvolvem-se sob um perfil edáfico, sendo o resultado do avanço irregular da frente de alteração e do acúmulo de umidade na base do material inconsolidado que constitui o regolito (TWIDALE, 1989, 2002; VIDAL-ROMANÍ, 1989; VIDAL-ROMANÍ; TWIDALE, 1998). As águas que percolam em subsuperfície tendem a aproveitar as zonas de debilidade presentes no embasamento cristalino sob o manto de intemperismo (TWIDALE, 1989). Geralmente as zonas preferenciais ao ataque intempérico e corrosão química possuem composição mineralógica diferenciada, por exemplo, os xenólitos ou autólitos (enclaves) e em diques. As variações texturais da rocha também representam um outro fator condicionante, juntamente com os sistemas de juntas e fraturas existentes no arcabouço geológico. Ao remover a cobertura sedimentar, o material que foi retrabalhado em subsuperfície tende a ser exumado e as formas, resultantes da corrosão química, são denominadas como formas *etch*. Entre as inúmeras formas desenvolvidas, destacam-se os tanques naturais sobre o embasamento cristalino.

Assim, o processo de corrosão química responsável pela formação dos tanques polifásicos subedáficos evoluem em duas etapas. A primeira refere-se ao modelado da frente de alteração segundo os fatores referidos anteriormente: o controle litológico e/ou estrutural em subsuperfície. Segundo Twidale (1989), essa etapa sempre tem lugar em condições subterrâneas, ou seja, por debaixo da superfície e livre das condições atmosféricas. A segunda etapa implica na denudação do regolito e a exposição da frente de alteração. Geralmente o trabalho remontante da drenagem tende a remover o regolito; no entanto, a denudação pode ser realizada, com resultados semelhantes, por exemplo, pela ação direta de ondas, próximo ao ambiente costeiro, e por ação do vento, em um ambiente de deflação (TWIDALE, 1989). Na maior parte das vezes quando a forma, no caso o tanque natural, é exposto à superfície, o material rochoso perde o contato com o regolito, ou seja, o tanque deixa de manter uma área umedecida onde atua a frente de alteração na rocha e permanece relativamente seco e estável.

De modo geral, os tanques naturais de grandes dimensões apresentam em seu perfil interno a forma de rampas e/ou patamares que definem um aspecto escalonado na cavidade. Nas áreas mais elevadas da feição os tanques tendem a apresentar topos de geometria convexa seguido de recuos da parede lateral (reentrâncias de superfícies íngremes) que seguem até a parte inferior, conformadas por rampas graníticas que coalescem no eixo principal. Segundo Twidale (1968) essas características de

reentrâncias, denominados *flared slopes* (na língua inglesa) ou *zapatas* (em espanhol), e de patamares bem definidos no perfil sinalizam a ideia de que as formas em questão estão associadas ao trabalho contínuo da frente de intemperismo em subsuperfície e da exposição episódica (Figura 38). As zonas de recuo do perfil no afloramento rochoso delimitam as antigas superfícies de contato solo-rocha do tanque natural, já a exposição episódica está associada aos processos de remoção do material regolítico sobre o embasamento cristalino. Geralmente a remoção do material sobrejacente está associada ao rebaixamento do nível de base local ou ao soerguimento regional.

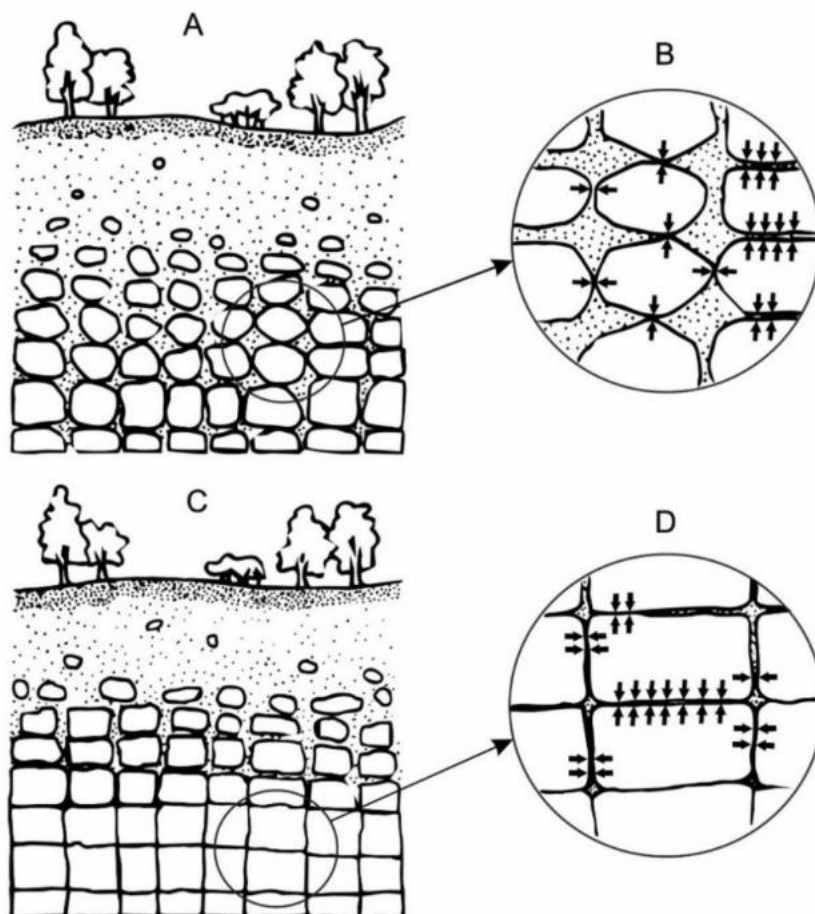
Figura 38 - Evolução do *flared slope* por intemperismo na base da escarpa e erosão subsequente. **A)** Intemperismo intenso resultante do *runoff* na margem inferior da vertente; o número de linhas, 1 a 4, representa os estágios do avanço da frente de intemperismo; **B)** Rebaixamento do nível de base, erosão de detritos alterados e exposição da frente intempérica como *flared slope* ou *zapata*; é possível observar a nova linha da frente intempérica e abaixo o novo plano de superfície; **C)** O desenvolvimento do duplo *flared slope* pela repetição do processo de duplo estágio. Modificado de: TWIDALE (1968); TWIDALE; VIDAL-ROMANÍ (2005) e WALDHERR et al. (2017a).



Os tanques polifásicos gerados por concentração de cargas também são formados em condições subedáficas. No entanto, o modelo baseia-se na aplicação de força, induzida pela migração e concentração de cargas, em áreas específicas do embasamento cristalino. A força exercida em determinados pontos resulta em deformações elásticas internas que, ao longo do tempo geológico, podem se tornar permanentes (VIDAL-ROMANÍ, 1989). Esses pontos específicos de contato se configuram em zonas suscetíveis e preferenciais ao ataque intempérico, tanto em subsuperfície como em condições subaéreas. Os tanques gerados por concentração de cargas são formados por duas vias distintas, mas levam ao mesmo tipo de efeito. São chamadas: via gravitacional e a via tectônica (VIDAL-ROMANÍ, 1989; VIDAL-ROMANÍ; TWIDALE, 1998; VIDAL-ROMANÍ; YEPES TERMIÑO, 2004; TWIDALE; VIDAL-ROMANÍ, 2005).

A via gravitacional coincide com o processo de alteração de um determinado maciço rochoso segundo o sistema ortogonal de fraturas e descontinuidades. Esse efeito contínuo de espessamento do material intemperizado, ou desenvolvimento do regolito, resulta no processo denominado migração de cargas (VIDAL-ROMANÍ, 1989; VIDAL-ROMANÍ; TWIDALE, 1998; VIDAL-ROMANÍ; YEPES TERMIÑO, 2004; TWIDALE; VIDAL ROMANÍ, 2005). O processo baseia-se em uma troca no sistema de apoio entre os blocos graníticos subjacentes, separados por uma descontinuidade ao longo da qual a percolação da água tenha produzido a alteração da rocha. Segundo Vidal Romaní (1989), esse processo de meteorização não é homogêneo, mas desigual no plano de descontinuidade. O contato entre os blocos pode variar, incluindo contatos através de um material intemperizado de maior ou menor espessura, ou contatos diretos entre a rocha sã com a rocha sobrejacente (Figura 39). Deste modo, o peso que inicialmente se encontrava distribuído ao longo de toda a superfície entre os dois blocos, vai de maneira contínua concentrando nos pontos onde ainda segue o contato entre rochas.

Figura 39 - Processo de migração e concentração de cargas. É possível visualizar o desenvolvimento do regolito entre os diferentes planos de descontinuidade. **A** e **B** - Distribuição concentrada de cargas litostáticas entre blocos e matacões; e **C** e **D** - Distribuição de cargas litostáticas entre os planos horizontais de fraturas. Modificado de: VIDAL-ROMANÍ; YEPES TERMIÑO (2004) e WALDHERR *et al.* (2017a).



De acordo com Vidal-Romaní; Yepes Termiño (2004), a migração de cargas pode ser entendida melhor em comparação a figura do *faquir indiano* em seu catre ou leito constituído por pregos. Compreende-se perfeitamente como aumenta o desconforto do faquir à medida que progressivamente se remove os pregos de seu "colchão", incrementando o peso que gravita sobre os pregos remanescentes. O mesmo tipo de efeito ocorre com o maciço rochoso quando as rochas se meteorizam em seu entorno, aplicando a migração de cargas sobre os blocos definidos pelo sistema de descontinuidades. O chamado "*efeito faquir*" faz com que o peso do bloco e de sua reação varia desde uma distribuição homogênea em todo contorno até que, com o avanço e aprofundamento do

intemperismo, se concentre em alguns poucos pontos onde a rocha ainda continue intacta (VIDAL-ROMANÍ, 1989; VIDAL-ROMANÍ; TWIDALE, 1998).

Segundo Twidale; Vidal-Romaní (2005) esse efeito de migração e concentração de cargas pode produzir um aumento de até 100 ou 1000 vezes na magnitude da carga suportada pela rocha. Em trabalhos anteriores (VIDAL-ROMANÍ, 1989; VIDAL-ROMANÍ; YEPES TERMINO, 2004) calculou-se que a uma profundidade de cerca de 300 m se pode alcançar as condições para que a rocha se plastifique nas imediações desses pontos de contato. A consequência imediata desse efeito é uma distorção na estrutura mineral da rocha e da própria desagregação interna do bloco, convertendo esses pontos em áreas mais suscetíveis ao ataque intempérico (Figura 40). A partir das formas côncavas definidas pela deformação elástica, tanques podem vir a serem desenvolvidos em planos de contatos horizontais. Entretanto, se os planos de contato forem verticais a subverticais, ou a desagregação do material ocorrer no bloco superior, as formas resultantes podem ser os *tafoni* (Figuras 41 e 42) (VIDAL-ROMANÍ; TWIDALE, 1998).

Figura 40 - Esquete da zona deformada internamente sob a concentração de tensões P . O domínio inclui a linha contínua 0, que corresponde à área onde localiza-se a compressão. O restante da rocha, entre as linhas 0,05 e 0,35, corresponde à área onde eventualmente se desenvolve as cavidades tafone ou gnamma. Modificado de: TWIDALE; VIDAL-ROMANÍ (2005) e WALDHERR *et al.* (2017a).

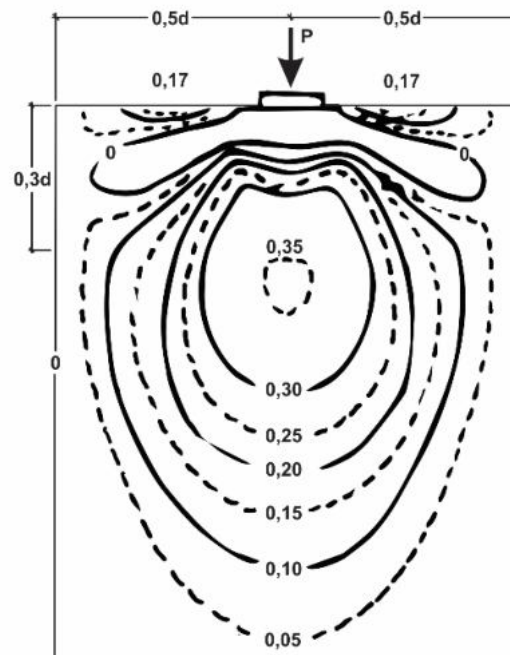


Figura 41 - Evolução esquemática do tanque natural e tafone. **A** - Zona de contato entre dois blocos ao longo de uma fratura (vertical ou horizontal); **B** - Processo de concentração de cargas - bulbos de tensões; **C** - formas resultantes. As linhas concêntricas indicam as possíveis superfícies de ruptura. Modificado de: VIDAL-ROMANÍ; TWIDALE (1998) e WALDHERR *et al.* (2017a).

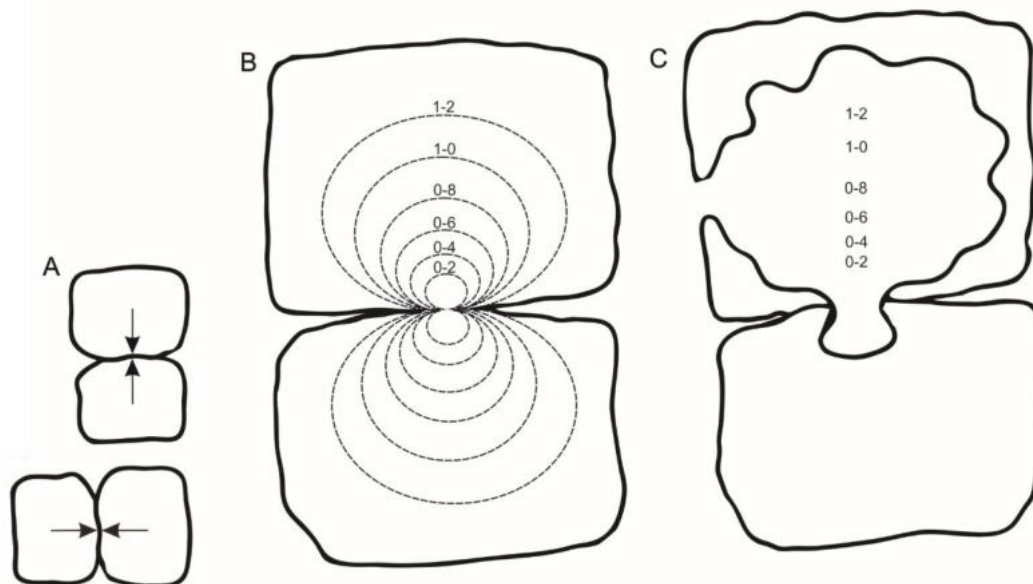
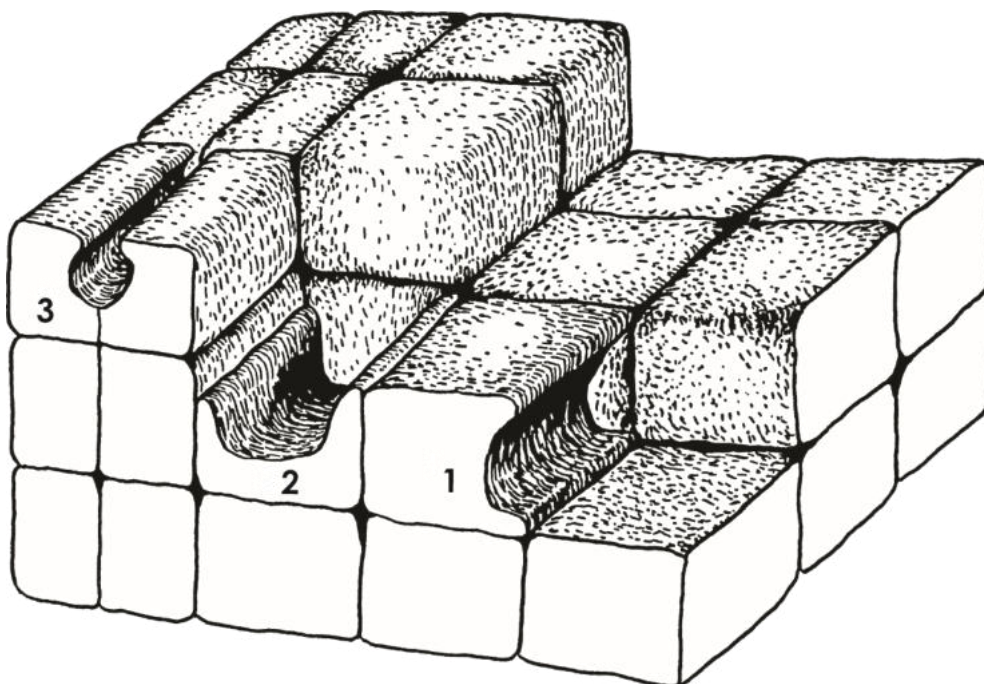
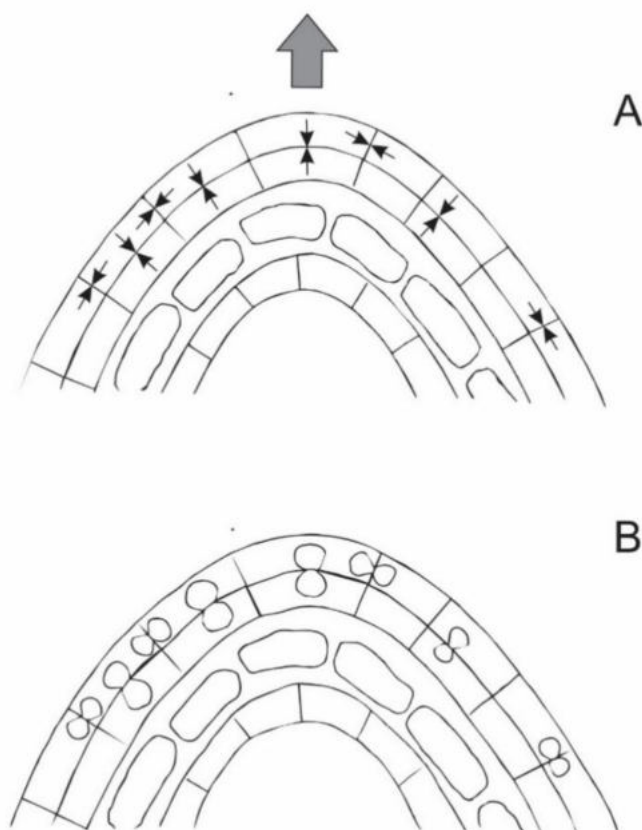


Figura 42 - Relação entre as discontinuidades, alteração e as formas menores do relevo granítico. **1** - Recuo lateral (*flared slope*); **2** - Poltrona; e **3** - Seteira. Modificado de: VIDAL-ROMANÍ (1989).



A via tectônica é considerada o segundo meio de formação de cavidades gerados pelo processo de concentração de cargas (TWIDALE; VIDAL-ROMANÍ, 2005). Neste caso, o tectonismo tem função dominante sobre o maciço granítico fraturado e no processo de concentração de cargas. Os movimentos resultantes de soerguimentos e abaulamentos regionais podem gerar ou restabelecer o contato entre superfícies rochosas, por exemplo, entre os blocos pré-estabelecidos pertencentes ao sistema de descontinuidades do maciço (Figura 43). Ao redor dos pontos de contato, entre os blocos rochosos ou das descontinuidades são estabelecidos os novos pontos de deformação elástica. O efeito é novamente uma distorção na estrutura mineral da rocha e desagregação interna do bloco, convertendo esses pontos em zonas preferenciais de meteorização. De acordo com Vidal-Romaní; Twidale (1998), é necessário a existência de um sistema prévio de descontinuidades e fraturas para que esse tipo de processo ocorra.

Figura 43 - Esquema de processo de concentração de cargas em pontos definidos a partir do contato entre as lascas de descamação ou *sheet structure* (A), formação de espaços lacunares (B) e a definição dos *tafoni* ou tanques naturais. Modificado de: VIDAL-ROMANÍ (2008) e WALDHERR *et al.* (2019).



Em resumo, a fase inicial é associada ao processo de concentração de cargas em subsuperfície o qual seria responsável por definir uma série de zonas de debilidade, deformadas elasticamente e suscetíveis à alteração intempérica. A feição geomorfológica tem a sua forma incipiente ao controle estrutural em condições subedáficas. O contato solo-rocha mantém o trabalho de corrosão química atuando sobre as zonas débeis do embasamento, por exemplo, os sistemas de fraturas, espaços lacunares, xenólitos. A fase seguinte é entendida através da remoção do regolito (material sobrejacente) e exposição dos tanques naturais reafeiçoados em subsuperfície, cada tanque denota um próprio grau de desenvolvimento (distintos formatos e tamanhos), controlados pela estrutura pré-estabelecida, por exemplo, profundidade e extensão das fraturas, sendo submetidos as condições subaéreas e aos domínios morfoclimáticos vigentes.

Em estudos recentes sobre o desempenho do manto regolítico no desenvolvimento de tanques (*lato sensu*) com aspecto dimensional menor (escala centimétrica), Wang *et al.* (2020) sugerem que a utilização de modelo 3D pode contribuir no que se refere a uma compreensão aprofundada do processo inicial de formação de depressões de intemperismo em condições atuais. Cabe ressaltar igualmente que o estudo é conferido na Província de Fujian, na China, e sob um ambiente de clima subtropical úmido com altas taxas de precipitação (monções) e ampla atuação do intemperismo químico. Assim, os resultados obtidos por Wang *et al.* (2020) indicam que: (1) a taxa média de um poço de intemperismo é de $10,8 \pm 0,49$ cm Ka; (2) as depressões de intemperismo são geralmente formadas por água parada em depressões em uma superfície rochosa plana e quase horizontal devido a ações de intemperismo envolvendo água; (3) a taxa de aprofundamento na área central do manto intempérico é cerca de quatro vezes maior do que a da área circundante; (4) o crescimento de um poço de intemperismo pode começar em algumas pequenas concavidades na superfície plana da rocha, sem a presença de depressões pré-existentes e se expandir gradualmente; (5) um poço de intemperismo é geralmente mais largo do que profundo ou com fundo plano devido à expansão com uma taxa de intemperismo lateral maior que a vertical, não sendo necessária a laminação da rocha encaixante para a formação de superfícies planas de depressões de intemperismo. É interessante colocar igualmente que estudos de depressões localizadas em regiões áridas e semiáridas, por exemplo, em distintas partes do Egito, a estimativa de taxa de intemperismo sobre as feições graníticas expostas é de 1 a 5 cm em 5.000 anos (BARTON, 1916).

3.2.3 Formas fluviais: caldeirões e marmitas

No contexto histórico, é possível que as primeiras menções sobre marmitas no nordeste brasileiro sejam encontradas no relato intitulado "Diálogos de Grandeza do Brasil". No texto descritivo, datado do final do século XVI, de autoria de Ambrósio Fernandes Brandão, há o registro da descoberta de um importante sítio arqueológico, acompanhado de uma breve descrição geomorfológica. O comunicado da descoberta às margens do rio Araçaji é datado de 29 de dezembro de 1598, sendo realizado pelo então Capitão-Mor da Província da Paraíba, o militar Feliciano Coelho de Carvalho, enquanto percorria o interior (atual município de Pilões, no estado da Paraíba). De acordo com Almeida (1980), para Rodolfo Garcia, estudioso da obra citada, a descrição constitui a referência mais antiga de um sítio rupestre no Brasil.

O comunicado sobre a descoberta e a breve descrição do sítio arqueológico, em linguagem antiga, é dado pelo então Capitão-Mor Feliciano Coelho de Carvalho da seguinte maneira:

"Ao descer o rio (Araçaji) que, por ir então seco, demonstrava somente alguns poços de água, que o calor do verão não tinha ainda gastado, e que alguns soldados, que foram por ele abaixo, toparam nas suas fraldas com uma cova, da banda do poente, composta de três pedras, que estavam conjuntas umas com outras, capaz de se poderem recolher dentro quinze homens; a qual cova tinha de alto, para a banda do nascente, de sete a oito palmos, e da banda do poente, treze até quatorze palmos; e ali por toda a redondeza que fazia na face da pedra, se achavam umas molduras, que demonstravam na sua composição serem feitas artificialmente [...]" (SOBREIRA, 2019, p. 49).

Segundo Almeida (1980), o sítio arqueológico corresponde a uma marmita ou caldeirão escavada no leito do rio, de forma ovalada, cujo o eixo longitudinal mede aproximadamente 6 metros e o transversal 2,5 metros. Nas paredes internas da marmita está gravada a maior parte dos desenhos visíveis. Ainda de acordo com a autora, outras gravuras situam-se na parede externa da marmita, na borda do lado do Nascente (ALMEIDA, 1980). Embora as dimensões descritas não correspondam a uma típica feição de marmita ou caldeirão, é possível que o desenvolvimento de cavidades do tipo não fluvial tenha sido captado a partir do trabalho remontante dos sistemas de drenagem ao longo do tempo geológico, reafeiçãoando a porção interiorana e as paredes laterais.

Assim, a forma menor do relevo granítico em questão poderia ser compreendida como uma feição geomorfológica mista ou composta, com gênese inicial do tipo não fluvial (corrosão química em condições subedáficas) e, posteriormente, sendo exposta e reafeiçoada pela ação fluvial em condições subaéreas (subaquosas).

Na literatura acadêmica, por exemplo, os processos erosivos fluviais têm sido comumente agrupados em três tipos de categorias, a saber: corrosão, abrasão (corrasão) e cavitação (CHRISTOFOLETTI 1980, 1981; LIMA, 2010). A corrosão abrange todos os processos químicos associados à reação com as rochas do leito. De modo geral, o termo corrosão é simplificado nos trabalhos acadêmicos, sendo adequado ao sentido de dissolução.

Para Lima (2010), a corrosão, ao distinguir-se de um processo erosivo, deve ser considerada de maneira mais apropriada como um conjunto de processos que facilitam a erosão pela abrasão, cavitação e arranque, embora o intemperismo possa liberar soluções que reduzem a massa das rochas. Ainda de acordo com o autor, mesmo uma ação de fluxo fluvial com energia cinética desprezível poderia reduzir o volume da rocha, removendo o componente solubilizado e aproximando a corrosão a um processo erosivo (LIMA, 2010). A abrasão, por sua vez, é um dos processos de erosão mais comuns em rios de leitos rochosos, sendo caracterizado a partir do atrito de partículas de sedimentos em trânsito, atuando diretamente sobre as margens e as rochas do leito. Segundo Lima (2010), uma vez comparada à erosão por arranque, outro processo importante de erosão fluvial, a abrasão atua de modo mais contínuo. Nesse contexto, tanto a carga do leito quanto a carga em suspensão podem agir como ferramentas abrasivas.

Ao distinguir a resistência à abrasão em diferentes tipos de rocha, Sklar; Dietrich (2001) chegaram à conclusão de que a abrasão fluvial é aproximadamente inversa ao quadrado da resistência a tração. No experimento, as rochas pouco fraturadas, espaçamento maior que um metro, favoreceram a erosão abrasiva em detrimento da erosão por arranque. Nesses tipos de rochas, especialmente em relação aos granitos e quartzitos, é comum a ocorrência de feições esculpidas como as marmitas, as depressões *curvi* ou retilineares (*furrows*) e *flutes*.

Segundo Lima (2010), o fluxo turbulento propicia a formação de vórtices de eixos verticais ou horizontais. Os turbilhões ao conduzir grânulos, seixos e blocos como material abrasivo, são responsáveis pela esculturação de diversas formas erosivas nos leitos rochosos. Ainda de acordo com o autor, as marmitas são formas erosivas mais

conhecidas e são atribuídas a vórtices verticais e estacionárias, surgidas em função de irregularidades do leito (LIMA, 2010). Nesse sentido, a cavitação pode ter uma participação importante na origem dessas incipientes irregularidades em ambiente subaquoso. A ocorrência de grandes blocos, relativamente imóveis e dispostos no leito, podem viabilizar a formação de turbilhonamento à jusante dos mesmos, resultando ocasionalmente o desenvolvimento de marmitas (LIMA, 2010). O avanço no processo erosivo pode resultar na coalescência de marmitas e formar um canal interno. De acordo com Wohl (1993), a progressão das formas erosivas, ocorrem preferencialmente em substratos maciços, dado que a presença de planos acamamento e uma ampla rede de fraturas acaba por facilitar a erosão por arranque.

Para Christofolletti (1981), a cavitação ocorre sob condições de velocidade elevada da água, quando as variações de pressão sobre as paredes do canal facilitam a fragmentação das rochas. De acordo com o trabalho de Barnes (1956), ao haver uma redução no canal fluvial, a velocidade deve aumentar dado que a água não é compressível, e isso eleva o nível da energia cinética. Uma vez que o peso específico da água, densidade, altura e a energia total do curso de água permanecem constantes, a pressão exercida pela água deve diminuir. E se a pressão diminui até alcançar a pressão do vapor d'água, há formação de bolhas. Quando o canal volta a se alargar, entretanto, aumenta a pressão à medida que diminui a velocidade e a componente da energia cinética. As bolhas estouram e ondas de choque de força surpreendente podem atingir o leito e as margens, como "golpes de martelo" sobre as paredes do canal. As tensões muito fortes então geradas causam a fragmentação das rochas. Se a parede for muito lisa, há dificuldade para o atrito das bolhas e da sua explosão, junto a elas, o processo se torna mais ativo conforme a superfície do leito e das margens se tornam rugosas (Barnes, 1956 *apud* CHRISTOFOLETTI, 1981).

No trabalho de Whipple *et al.* (2000) é sugerido que o processo de cavitação pode contribuir de maneira significativa na formação de feições erosivas como as marmitas, dado que as condições de fluxo e aeração são facilmente constatadas em rios de leito rochoso. De acordo com Christofolletti (1981), o termo marmita (*pothole*) compreende toda depressão mais ou menos circular, escavada pela abrasão turbilhonar de seixos e blocos, rotacionados pela energia da água corrente. Em outro trabalho acadêmico de referência, o geógrafo português Ilídio do Amaral, descreve e analisa a presença de formas escavadas no leito do rio Curoca, em Moçâmedes/Angola. Segundo o geógrafo

português, é comum encontrar no interior das marmitas seixos, calhaus e blocos, indicando serem abrasivos. As paredes internas são lisas, polidas e, em geral, são observados sulcos helicoidais. O alargamento de marmitas, em uma área de concentração deste tipo de cavidade, pode levar a coalescência entre as feições geomórficas, resultando em formas complexas e, por vezes, lobuladas. A interconexão entre as marmitas, através de estreitas e sinuosas passagens, origina verdadeiros cânions na paisagem e constitui um dos modos mais eficientes de aprofundamento de canais em leitos rochosos (AMARAL, 1974).

Segundo Christofolletti (1980) a erosão fluvial, considerada como responsável pela origem e desenvolvimento das marmitas ou caldeirões, é realizada através de três processos erosivos, a saber: corrosão, corrasão e cavitação (Figura 44). A corrosão abrange todo e qualquer processo químico que se realiza como reação entre a água e as rochas superficiais em contato. A corrasão é o desgaste através do atrito mecânico, em geral a partir do impacto de partículas carregadas pela água. A abrasão da superfície sobre o qual a água escoar é caracterizada pelo polimento inerente das rochas aflorantes no canal. A evorsão representa um tipo especial de corrosão, oriunda do movimento turbilhonar sobre as rochas de fundo do leito. O terceiro processo, denominado como cavitação, ocorre somente sob condições de velocidades elevadas da água, quando variações de pressão sobre as paredes do canal facilitam a fragmentação das rochas. Ainda de acordo com o autor, as depressões de vários tamanhos podem ser escavadas, na maior parte das vezes com formato circular, tais como as conhecidas Marmitas de Gigante (CHRISTOFOLETTI, 1980).

Figura 44 - Disposição de feições erosivas fluviais sobre o leito rochoso no Rio Paraíba do Sul, no Rio de Janeiro. Foto: Felipe Fraifeld, Ago./2018.



Segundo Amaral (1974), a hipótese de moinho foi enunciada em 1841 pelo geólogo alemão-suíço Jean G. F. de Charpentier (1786 - 1855) para explicar a abertura de marmitas, sendo posteriormente aplicada a qualquer forma de cavidade escavada pelo movimento rotatório das águas e dos abrasivos transportados através do meio aquoso, por exemplo, areia, seixos e blocos, ao interior de uma incipiente depressão no leito rochoso (Figura 45). Dessa maneira, foi proposto à época que a origem das marmitas poderia estar vinculada a partir da hipótese de redemoinho nos seguintes ambientes, a saber: águas fluviais, águas de fusão de glaciares ou águas do mar. De acordo com Christofolletti (1981), o geólogo alemão Franz Eugen Geinitz (1856 - 1925) propôs em 1886 o termo evorsão em referência ao sentido de erosão mecânica ou corrosão, associada à ação das águas com abrasivos (processo de erosão turbilhonar). Ainda segundo o autor, o termo evorsão foi retomado pelo geógrafo sueco Olof Ängeby (1910 - 1984), em trabalho publicado no ano de 1951, o qual atribuiu condições favoráveis a formação de remoinhos e quedas de água a partir de aspectos estruturais da rocha, localização topográfica e de abastecimento de abrasivos (CHRISTOFOLETTI, 1981).

Figura 45 - Ocorrência de marmitas sobre o leito rochoso no rio Ingá, no município de Ingá - PB. O embasamento cristalino é constituído pela Suíte Intrusiva Dona Inês, sendo constituído rochas biotita granito-granodiorito leucocrático. Fonte: WALDHERR *et al.* (2017a).



O fluxo turbulento propicia a formação de vórtices de eixos verticais e/ou horizontais (LIMA, 2010). A turbulência promove diferentes vias no decurso e efeito dos turbilhonamentos, dos quais uma parte será móvel, com eixos verticais, deslocando-se com o fluxo, enquanto que a outra parte se mantém estacionária, associada as irregularidades do leito rochoso, com eixo vertical perto das margens e horizontal no fundo. A dinâmica atribuída a turbulência tende a proporcionar condições para o desenvolvimento de marmitas, o qual cada turbilhonamento, de eixo vertical ou horizontal, de componente helicoidal, pode ser constituído por turbilhões menores, de gênero semelhante ou distinto. Segundo o autor português, o movimento em conjunto acaba por constituir os redemoinhos (AMARAL, 1974).

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

4.1 Estrutura geral do trabalho

A fase inicial da presente tese de doutorado correspondeu ao levantamento preliminar de informações e dados secundários sobre os principais sítios paleontológicos com ocorrência de tanques naturais fossilíferos no município de Itapipoca (CE). As informações obtidas integram um amplo conjunto de trabalhos acadêmicos de âmbito multidisciplinar e que se encontram disponíveis em plataformas digitais administrados por instituições de pesquisa e/ou periódicos científicos. A linha de investigação em relação ao levantamento bibliográfico concentrou-se na organização de um acervo sobre as principais hipóteses de desenvolvimento dos tanques naturais no semiárido brasileiro. O conjunto de material cartográfico, em especial, os mapeamentos temáticos, por exemplo, planialtimétrico, geológico e geomorfológico, que integram as áreas de pesquisa foram igualmente priorizados.

O recorte espacial do município de Itapipoca (CE) foi elaborado a partir da base de dados (vetoriais e imagens raster) disponibilizada em ambiente digital pelo IBGE e CPRM. A elaboração de mapas de localização no presente trabalho utilizou-se de arquivos raster provenientes do sensor orbital de radar PALSAR (satélite ALOS) que apresenta resolução espacial de 12,5 metros. A partir do MDE foram geradas curvas de nível, com espaçamento de 10 metros, utilizando o programa *Global Mapper 15*. As curvas de nível foram elaboradas afim de verificar os diferentes níveis altimétricos, amplitude de relevo, distribuição de formas geomórficas e a orientação dos principais eixos de drenagem no município de Itapipoca (CE). A digitalização, georreferenciamento e integração dos dados em escala 1:30.000, dando prioridade as áreas com ocorrência de tanques naturais fossilíferos, foram posteriormente realizados a partir dos programas ArcGIS 10.3.1, QGIS 3.28 e *Global Mapper 15*.

O levantamento de informações primárias foi obtido através da realização de quatro incursões de campo, principalmente durante o período de estiagem, para uma melhor visualização dos condicionantes estruturais e litológicos das áreas de interesse e da morfologia dos tanques naturais fossilíferos. O primeiro trabalho de campo foi realizado no período de 18 a 26 de julho de 2019, sendo reservado ao reconhecimento no que se refere aos tipos de tanques (*latu senso*) localizados nos principais sítios paleontológicos no município cearense. Nesse momento, os tanques naturais encontravam-se

completamente inundados, impossibilitando uma avaliação e/ou verificação em detalhe da morfologia interna. No entanto, foi constatado o alcance máximo do nível de água dos principais tanques naturais fossilíferos. No período conhecido como inverno, o nível de água chega a ultrapassar o nível de base do tanque, em geral constituído pelas ombreiras graníticas que delimitam a feição geomorfológica, resultando em transbordamentos de modo recorrente entre os meses de fevereiro e abril (Figura 46).

Figura 46 - A sazonalidade climática propicia oscilações do nível de água no interior dos tanques naturais durante o ano, resultando no rebaixamento gradual do espelho d'água. **A** - O nível máximo de recarga de água no tanque natural fossilífero Jirau 01 em julho de 2019. **B** - Registro fotográfico do interior do tanque completamente seco no mês de dezembro de 2021. Fotos: Felipe Waldherr, Jul./2019 e Dez./2021.



Após o reconhecimento de campo, ficou nítido a importância de uma seleção prévia dos principais tanques naturais fossilíferos no município de Itapipoca para a elaboração de um cronograma de pesquisa. Uma série de fatores possibilitaram a predileção de três tanques naturais fossilíferos que estão localizados nos sítios paleontológicos Jirau, Lajinhas e João Cativo, sendo então adotados como áreas de referência no presente estudo. Entre os principais fatores de seleção, destacam-se a importância geocientífica e histórica dos tanques naturais; o conjunto prévio de trabalhos acadêmicos empreendidos nos sítios mencionados que permitiu a realização de uma série de comparações em relação aos estudos sobre os tanques naturais; a possibilidade de novas interpretações sobre dinâmica na deposição do material sedimentar e fossilífero nos depósitos de tanque; a observação de aspectos dimensionais das depressões em questão que sobressaem em relação ao tamanho, largura e profundidade em comparação aos tanques situados no entorno; e, por fim, na acessibilidade relativamente fácil aos pontos de interesse através de vias secundárias não pavimentadas.

Os trabalhos de campo subsequentes foram realizados no intuito de percorrer os pontos pré-estabelecidos no período de seca, junto a exposição da morfologia de fundo dos principais tanques naturais fossilíferos nos Sítios Paleontológicos Jirau, Lajinhas e João Cativo. As incursões de campo seguiram durante os períodos de 20 a 28 de janeiro de 2020; de 05 a 16 de dezembro de 2021; e de 10 a 23 de dezembro de 2022. Uma vez expostos durante os períodos de estiagem, os tanques naturais fossilíferos foram amplamente analisados. A descrição morfológica dos tanques naturais fossilíferos corresponde a uma das principais preocupações em campo, sendo igualmente observado a possível atuação do controle litológico-estrutural no reafeiçoamento interno do tanque e na distribuição geográfica dessas formas menores do relevo granítico. Durante o levantamento de campo foi realizado o reconhecimento dos diferentes aspectos morfométricos dos tanques naturais fossilíferos e das estruturas menores presentes no interior das cavidades, além de apontamentos sobre os condicionantes geoambientais responsáveis pela possível formação e desenvolvimento da depressão natural sobre o embasamento cristalino.

Além da análise morfológica e morfométrica dos tanques naturais, a utilização de drones ou RPA (*Remotely Piloted Aircraft* - Aeronaves Remotamente Pilotadas) em trabalho de campo se mostrou fundamental para a verificação do controle estrutural e a continuidade dos lineamentos e a amplitude dos *sets* de fraturas, que não são perceptíveis

em escala de campo, sendo então evidenciados através de imagens obtidas por sobrevoos nos terrenos graníticos. O emprego cada vez mais frequente de imagens de alta resolução, entre outros recursos de geotecnologia, aplicado às pesquisas geomorfológicas e paleontológicas têm se tornado uma importante ferramenta de análise e interpretação da dinâmica geoambiental. Nesse contexto, foi realizado durante a primeira semana do mês de janeiro de 2020 e na segunda semana do mês de dezembro de 2021, uma série de sobrevoos nas áreas de interesse. A aquisição de imagens aéreas no município de Itaipoca possibilitou, além de uma caracterização geomorfológica e geoestrutural dos três sítios paleontológicos, a investigação a partir de um amplo quadro de ortofotomosaicos georreferenciados com pixels de 2,7 cm e a elaboração de modelos digitais de elevação (MDE) com alta resolução espacial.

É importante enfatizar que as atividades de campo, junto a obtenção de dados primários e secundários da presente tese de doutorado, ocorreram devido ao suporte financeiro disponibilizado pelo Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGG-UFRJ) e dos recursos provenientes da Bolsa de Doutorado Nota 10, concedida pela Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ).

Em campo foi igualmente realizado a coleta de amostras petrográficas e, quando possível, do material sedimentar dos depósitos de tanque. Assim, nos casos das amostras associadas aos depósitos de tanque foi atribuída uma caracterização sedimentológica, concomitante a um rigoroso controle estratigráfico para identificação da proveniência do material sedimentar, buscando estabelecer de modo incipiente uma reconstituição da dinâmica paleoambiental que viabilizou a exposição e, posteriormente, o preenchimento sedimentar da cavidade (Figuras 47 e 48). Cabe ressaltar que todos os pontos de observação e coleta, considerados pertinentes ao presente trabalho, foram catalogados em uma ficha de controle de campo com dados de localização das coordenadas geográficas, realizados com o auxílio do aparelho GPS e, posteriormente, integrados ao ambiente digital. Uma série de anotações dos dados observados de diferentes aspectos apresentados pelas feições morfológicas, incluindo aspectos da porção interna do tanque, e dos possíveis condicionantes geoambientais associados a formação e ao desenvolvimento das cavidades naturais sobre o embasamento cristalino.

Figura 47 - Coleta de amostras em depósitos de tanque realizada a partir da utilização do Testemunhador Rotativo Portátil (TRB) no Sítio Paleontológico João Cativo, município de Itapipoca (CE). Fotos: Felipe Waldherr, Jan./2020.



Figura 48 - Análise estratigráfica e coleta de amostras em depósito de tanque no Sítio Paleontológico Jirau, município de Itapipoca (CE). É possível visualizar a camada de topo que é composta por material fossilífero da megafauna pré-histórica. Foto: Ricardo Machado, Dez./2021.



A descrição estratigráfica dos depósitos de tanque foi elaborada a partir de perfis sedimentográficos *in situ*, assim como a descrição sedimentológica. Uma vez coletado, a maior parte do material sedimentar foi encaminhado para análise em laboratório. No intuito de elaborar uma investigação detalhada dos sedimentos, foi utilizado microscópio

estereoscópio com ampliação de 40x. Os termos para classes de tamanhos de grãos foram empreendidos de acordo com a classificação de Blair e McPherson (1999) e Terry e Golf (2014). Cabe ressaltar que foi elaborado um levantamento prévio sobre os estudos acadêmicos realizados em tanques naturais fossilíferos no município de Itapipoca (CE) (XIMENES, 2003; 2009; ARAÚJO-JÚNIOR, 2012, 2015; ARAÚJO-JÚNIOR *et al.*, 2013a). Entre as pesquisas, têm destaque as análises tafonômicas sobre a camada fossilífera do depósito de tanque, o qual viabilizou uma discussão multidisciplinar em relação as condições paleoambientais e, conseqüentemente, da dinâmica da paisagem durante o período de exposição e, posteriormente, colmatação dos tanques naturais.

4.2 Materiais

No contexto geológico, o presente trabalho baseou-se no relatório de campo e mapeamento geológico da Folha Itapipoca (BRAGA; GOMES, 2018) e Folha Irauçuba (NALETO, 2018), ambos na escala 1:100.000, elaborado pelo Programa Geologia do Brasil (CPRM). A verificação em campo de distintas unidades litoestratigráficas, junto as suas especificidades em relação a características estruturais e litológicas, no município de Itapipoca é considerado um fator importante na análise da distribuição dos tanques naturais. Entre as principais unidades litológicas com ocorrência de tanques naturais fossilíferos, tem destaque o Leucogranito Penedos, pertencente a Suíte Magmática Tardi a Pós-orogênica de idade cambriano-ordoviciano (541 - 485 Ma) e o Granitoide Santa Quitéria, pertencente ao Complexo Tamboril-Santa Quitéria de idade criogênica-ediacariano (\cong 635 Ma).

Em relação aos produtos gerados a partir do drone, uma série de etapas foram elaboradas previamente no intuito de estabelecer uma malha organizacional e, conseqüentemente, de execução dos sobrevoos em pontos específicos. Para a utilização adequada dos recursos disponibilizados pelo RPA foi elaborado uma série de polígonos a partir das ferramentas do Programa *Google Earth Pro* com o propósito de selecionar as principais áreas de interesse no presente trabalho. Uma vez finalizado o mosaico de polígonos, contendo áreas de sítios paleontológicos e os tanques naturais fossilíferos, foi possível estabelecer os trajetos e/ou planos de sobrevoos ao RPA (Figuras 49 a 51). Assim, o trajeto foi configurado para o total de 10 voos no intuito de cobrir totalmente os alvos imageados, a somatória das superfícies totalizou 273,1 ha.

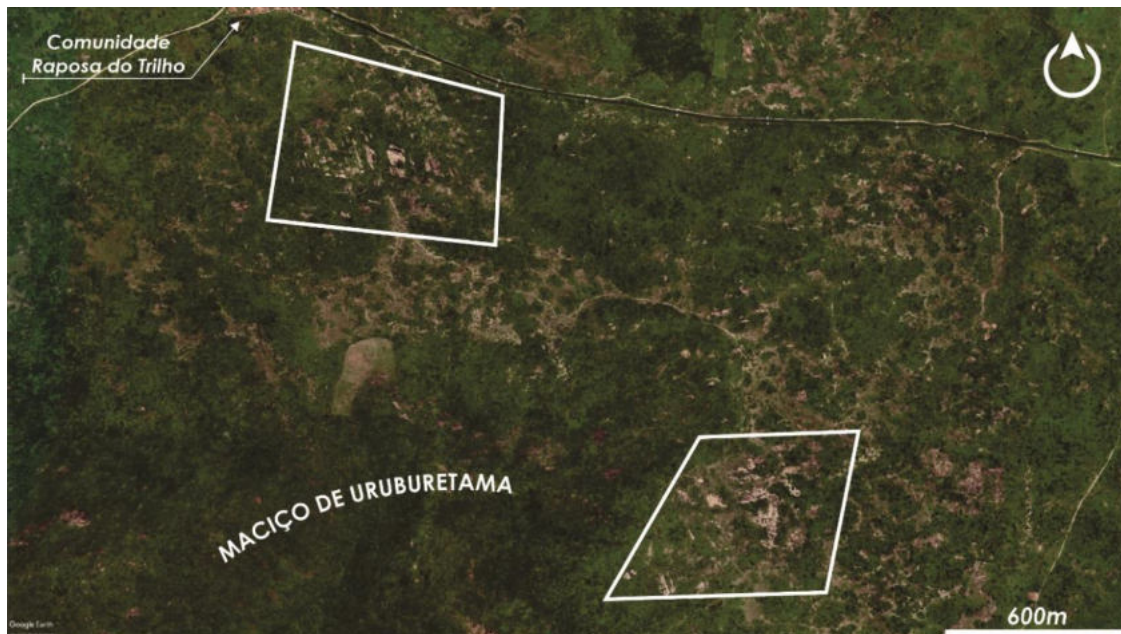
Figura 49 - Visualização geral dos polígonos na área do Sítio Paleontológico do Jirau. Os polígonos foram gerados no Programa Google Earth Pro e utilizados no trajeto de sobrevoo do drone. Fonte: Adaptado do Google Earth Pro (2020).



Figura 50 - Visualização geral dos polígonos na área do Sítio Paleontológico de Lajinhas. Os polígonos foram gerados no Programa Google Earth Pro e utilizados no trajeto de sobrevoo do drone. Fonte: Adaptado do Google Earth Pro (2020).



Figura 51 - Visualização geral dos polígonos na área do Sítio Paleontológico de João Cativo. Os polígonos foram gerados no Programa Google Earth Pro e utilizados no trajeto de sobrevoo de RPA. Fonte: Adaptado do Google Earth Pro (2020).



No mês de janeiro de 2020 e dezembro de 2021, foi possível realizar de modo sistemático uma série de sobrevoos com RPA no intuito de obter imagens de alta resolução dos principais tanques naturais nos sítios paleontológicos Jirau, Lajinhas e João Cativo, no município de Itapipoca, estado do Ceará (Figura 52). A empresa GAIATECH foi contratada pelo autor da presente tese de doutorado, com o apoio financeiro do Prof. Dr. Celso Ximenes (MUPHI) e pelo Prof. Dr. Hermínio Araújo-Júnior (UERJ), para realizar os sobrevoos, executar o processamento das imagens e confeccionar os modelos digitais de elevação (MDE) dos sítios paleontológicos de interesse. O recorte geográfico do município de Itapipoca, junto a distribuição dos sítios paleontológicos, foi inicialmente examinado através de imagens orbitais disponibilizadas pelo Programa *Google Earth Pro* (Image© 2020 Maxar Technologies) e da ALOS-PALSAR. Posteriormente, as áreas pré-estabelecidas foram selecionadas a partir do conjunto de referências bibliográficas vinculadas as áreas de estudo e com base na notificação de tanques naturais de maiores dimensões catalogados pela equipe do Museu de Pré-História de Itapipoca (MUPHI).

Figura 52 - Uma série de sobrevoos foram realizados através de RPA sobre os tanques naturais fossilíferos no município de Itapipoca (CE). Foto: Celso Ximenes, Jan./2020.



As imagens de alta resolução utilizadas foram obtidas através de uma RPA de classe 3, modelo *Phantom 4 Pro*, equipado com uma câmera de 20 megapixel de resolução acoplada. Os levantamentos aéreos foram feitos a partir de sobrevoos com 100 m de altura em relação ao solo, proporcionando um *Ground Sample Distance* (representação do pixel da imagem do terreno) de 2,73 cm. O aplicativo de sobrevoos utilizado foi o Pix4D Capture, instalado em um dispositivo móvel com sistema operacional IOS (*iPhone 6*). O processamento das imagens foi feito no programa de aerofotogrametria *Agsoft Photoscan*. Como produtos gerados, foram produzidos ortofotomosaicos georreferenciados, com pixels de 2,7 cm, e modelos digitais de elevação (MDE) com alta resolução espacial (Figuras 53 a 61).

Figura 53 - Visualização das seções Jirau 01, 02, 03 e 04 na área do Sítio Paleontológico Jirau, no município de Itapipoca (CE). Fonte: Henrique Sampaio, 2020.

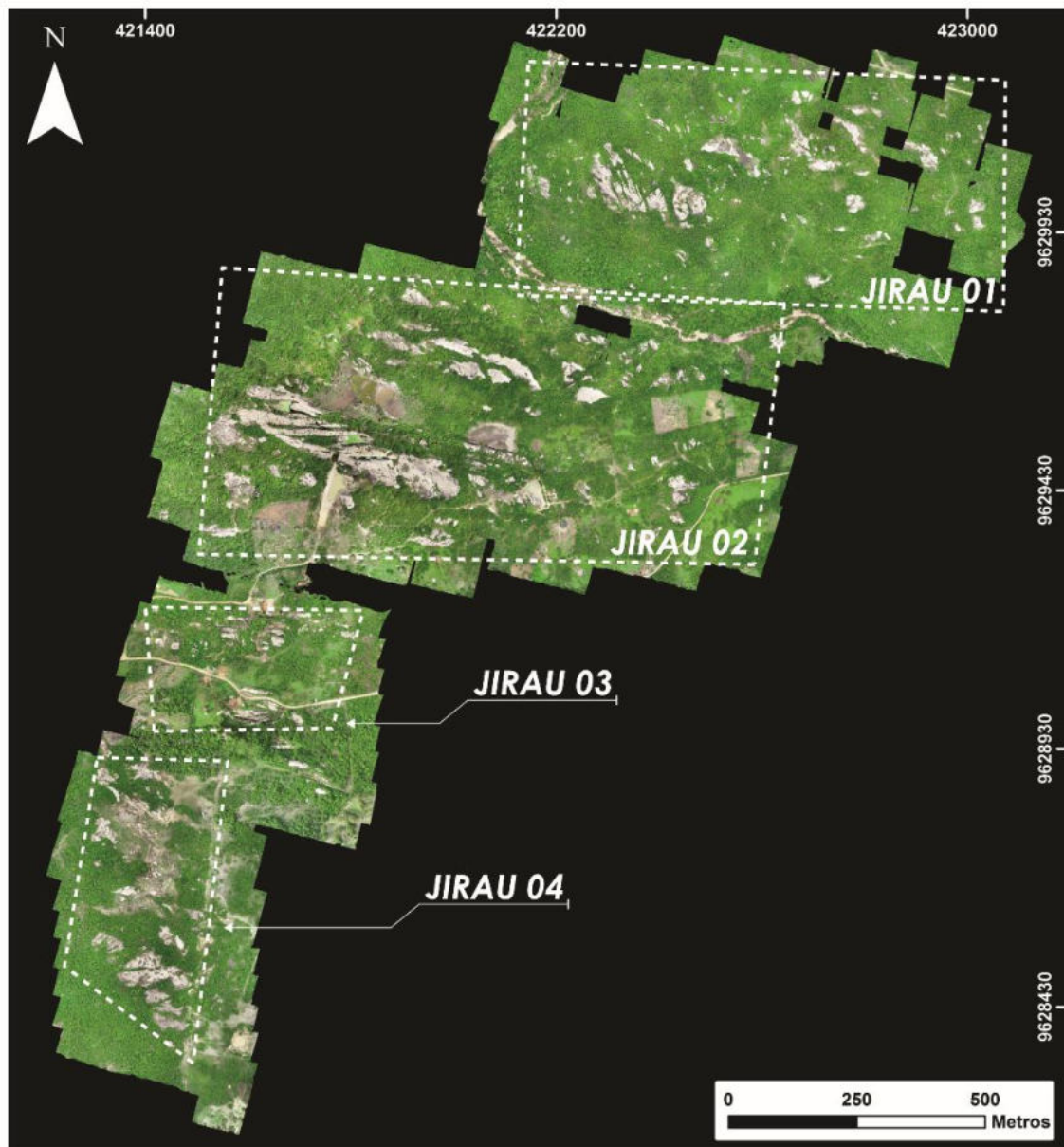


Figura 54 - Visualização da fotografia em alta resolução e do MDE sobre as seções Jirau 01 e 02 no Sítio Paleontológico Jirau, no município de Itapipoca (CE). Fonte: Henrique Sampaio, 2020.

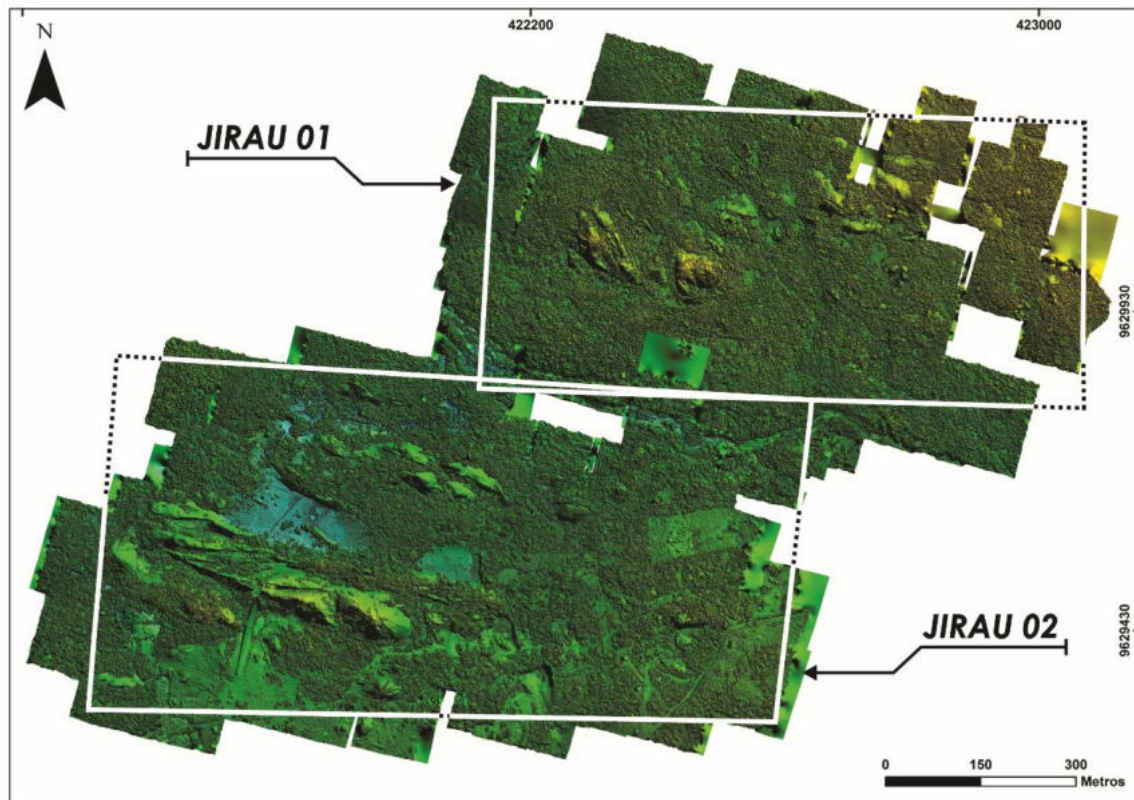


Figura 55 - Visualização da fotografia em alta resolução sobre as seções Jirau 03 e 04 no Sítio Paleontológico Jirau, no município de Itapipoca (CE). Fonte: Henrique Sampaio, 2020.

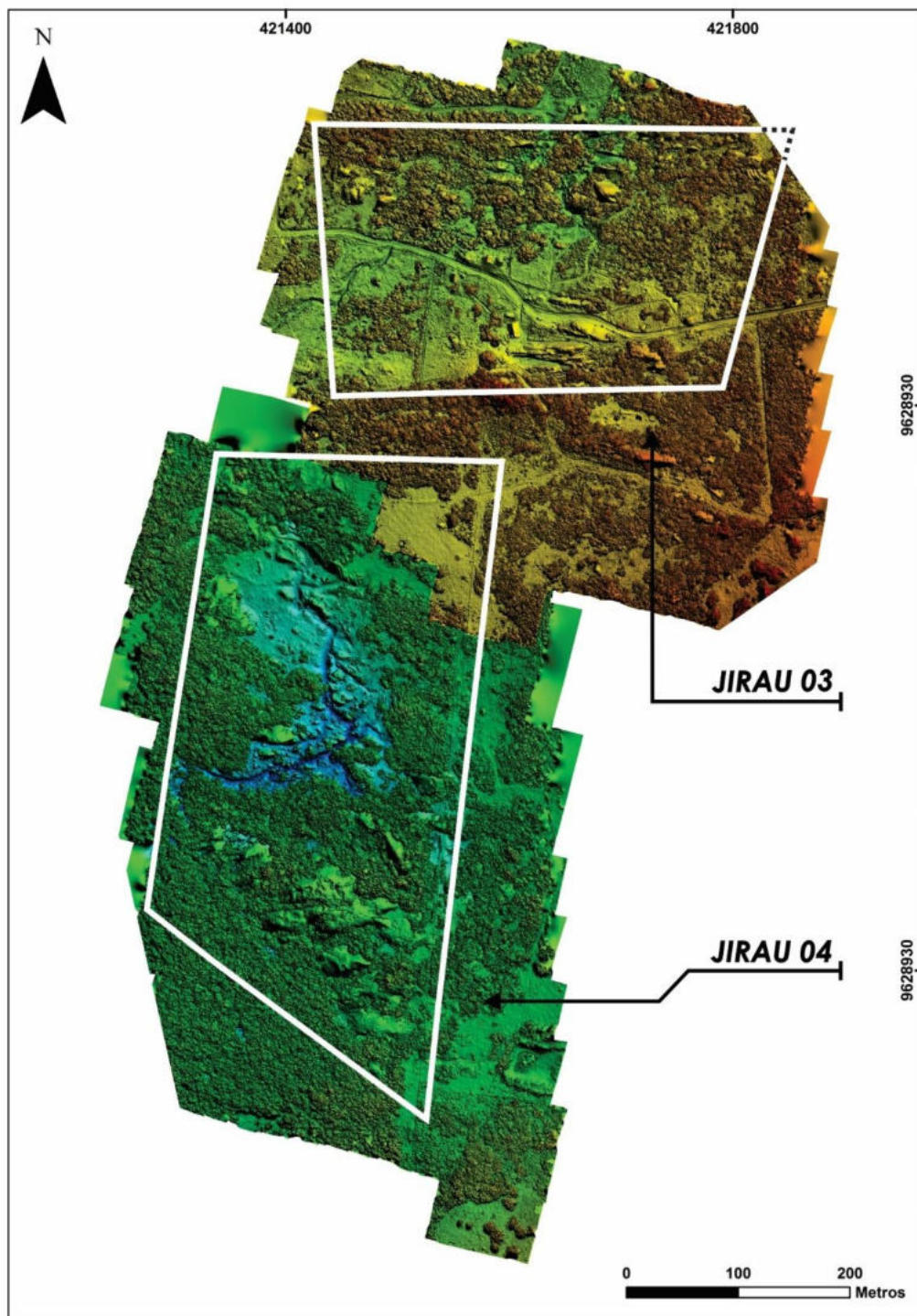


Figura 56 - Visualização da fotografia em alta resolução sobre as seções Lajinhas 01, 02 e 03 no Sítio Paleontológico Lajinhas, no município de Itapipoca (CE). Fonte: Henrique Sampaio, 2020.

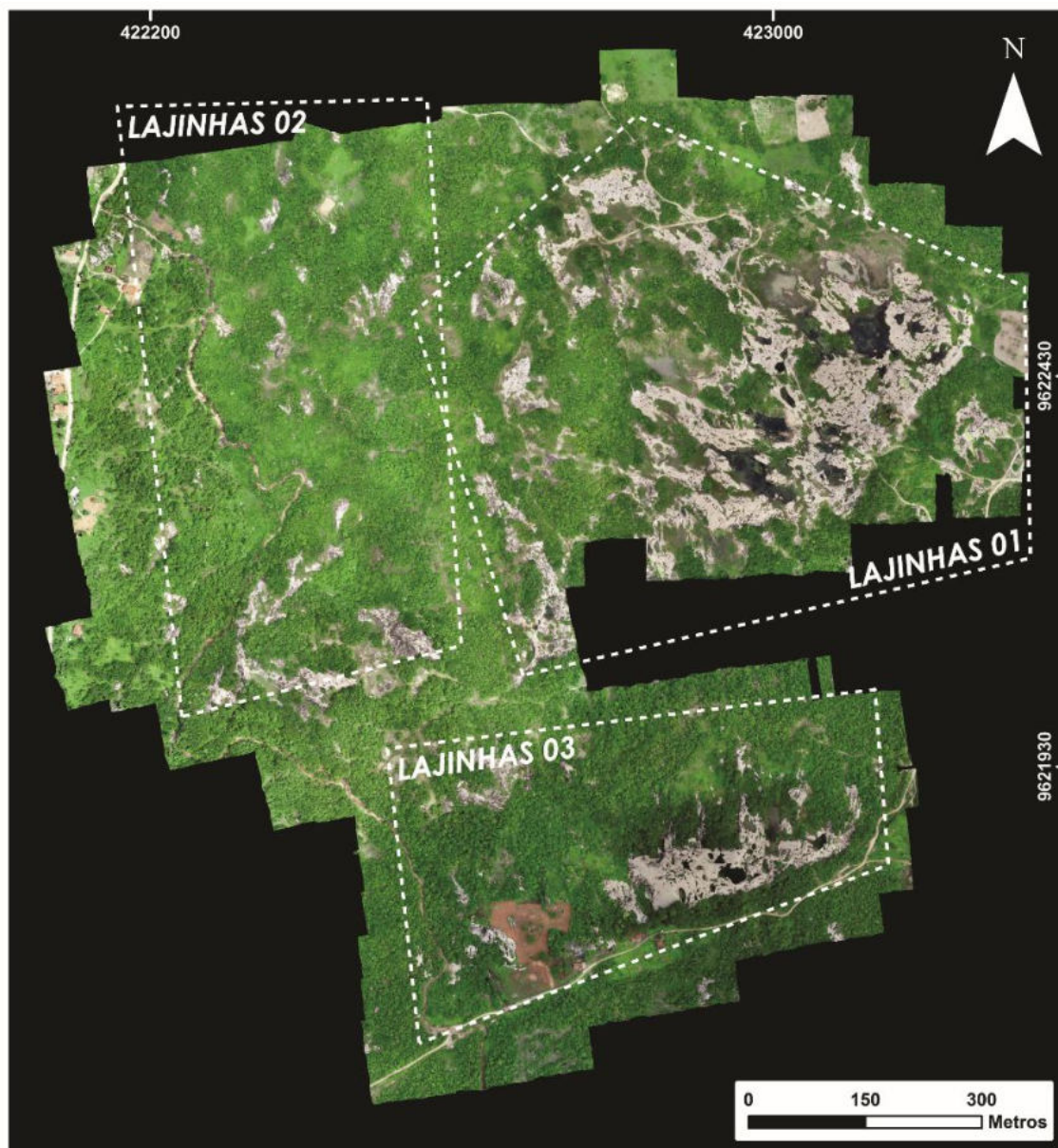


Figura 57 - Visualização do MDE gerado sobre as seções Lajinhas 01, 02 e 03 no Sítio Paleontológico Lajinhas, no município de Itapipoca (CE). Fonte: Henrique Sampaio, 2020.

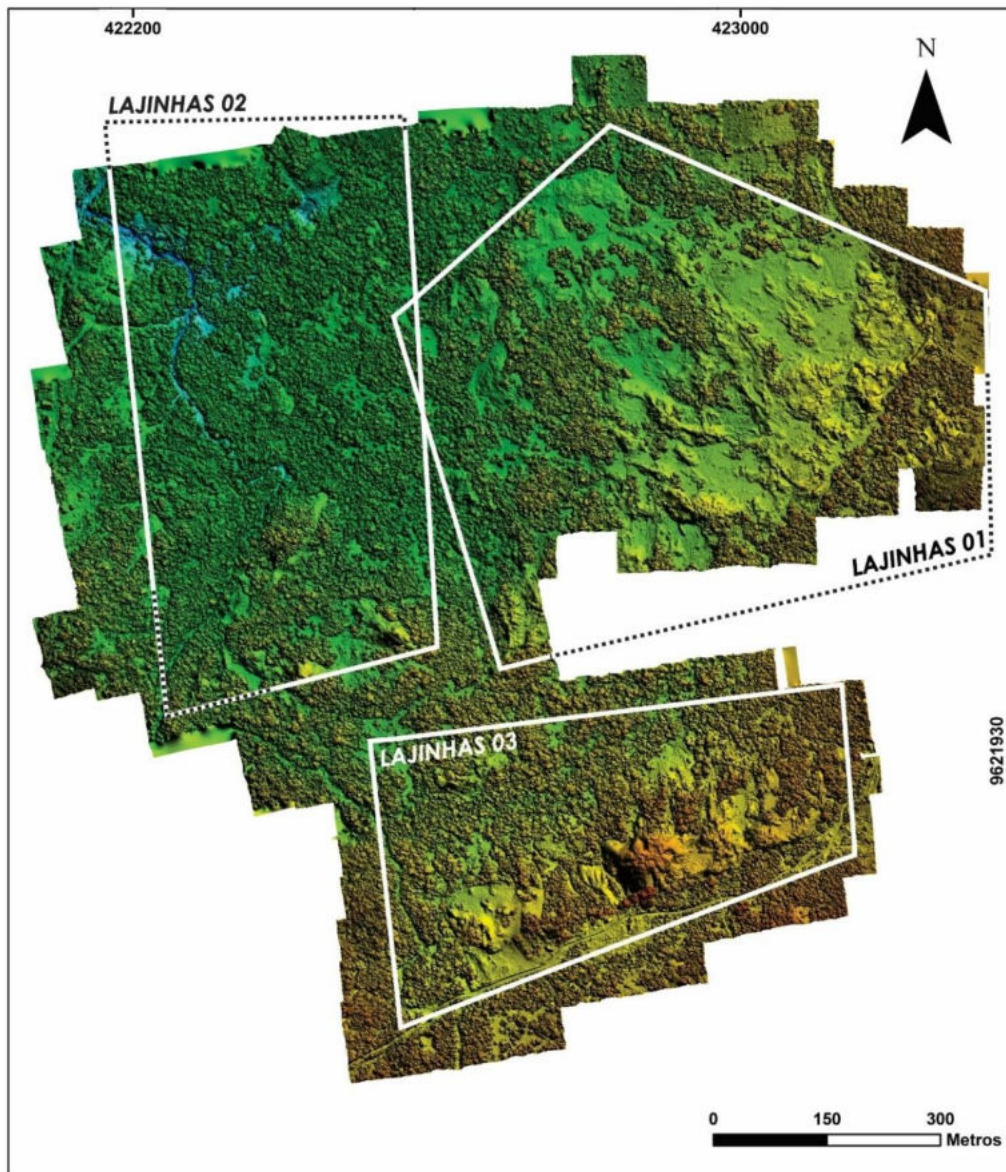


Figura 58 - Visualização da fotografia em alta resolução sobre a seção João Cativo 01 no Sítio Paleontológico João Cativo, no município de Itapipoca (CE). Fonte: Henrique Sampaio, 2020.

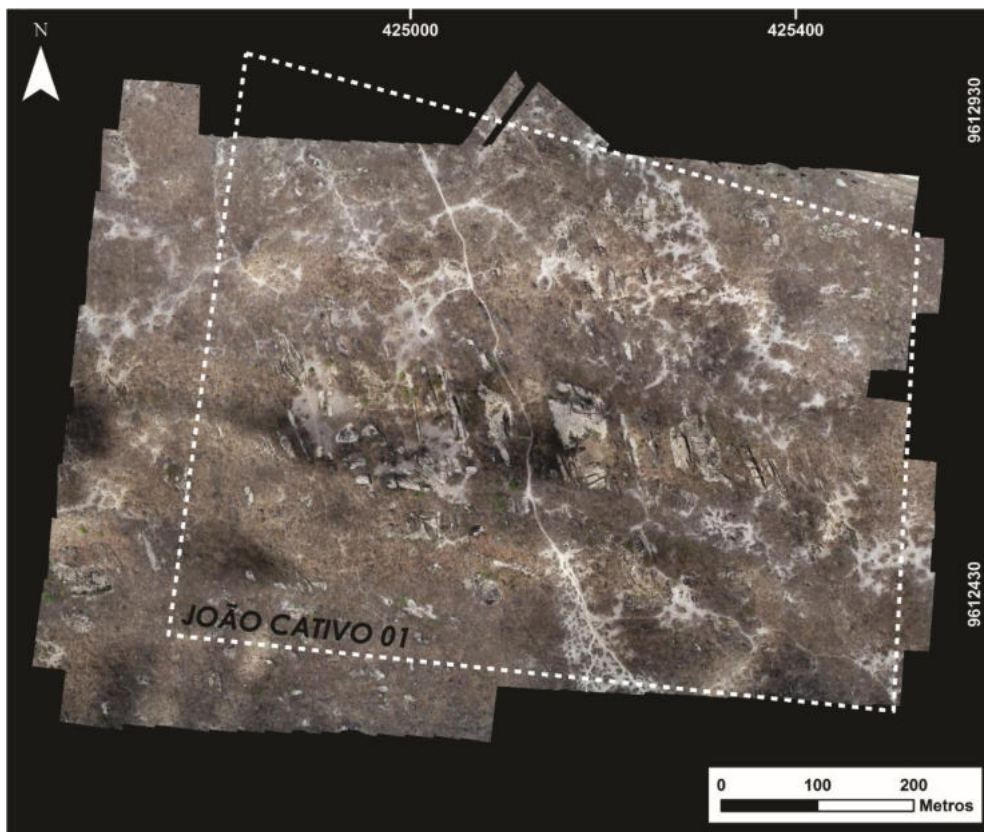


Figura 59 - Visualização do MDE sobre a seção João Cativo 01 no Sítio Paleontológico João Cativo, no município de Itapipoca (CE). Fonte: Henrique Sampaio, 2020.

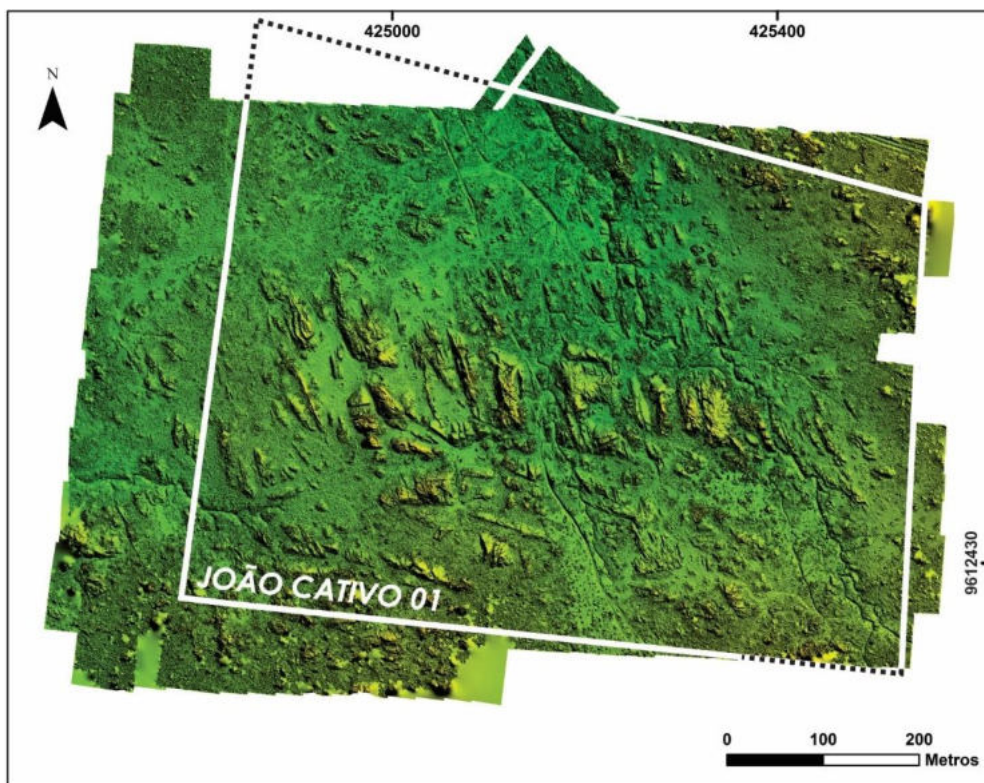


Figura 60 - Visualização da fotografia em alta resolução sobre a seção João Cativo 02 no Sítio Paleontológico João Cativo, no município de Itapipoca (CE). Fonte: Henrique Sampaio, 2020.

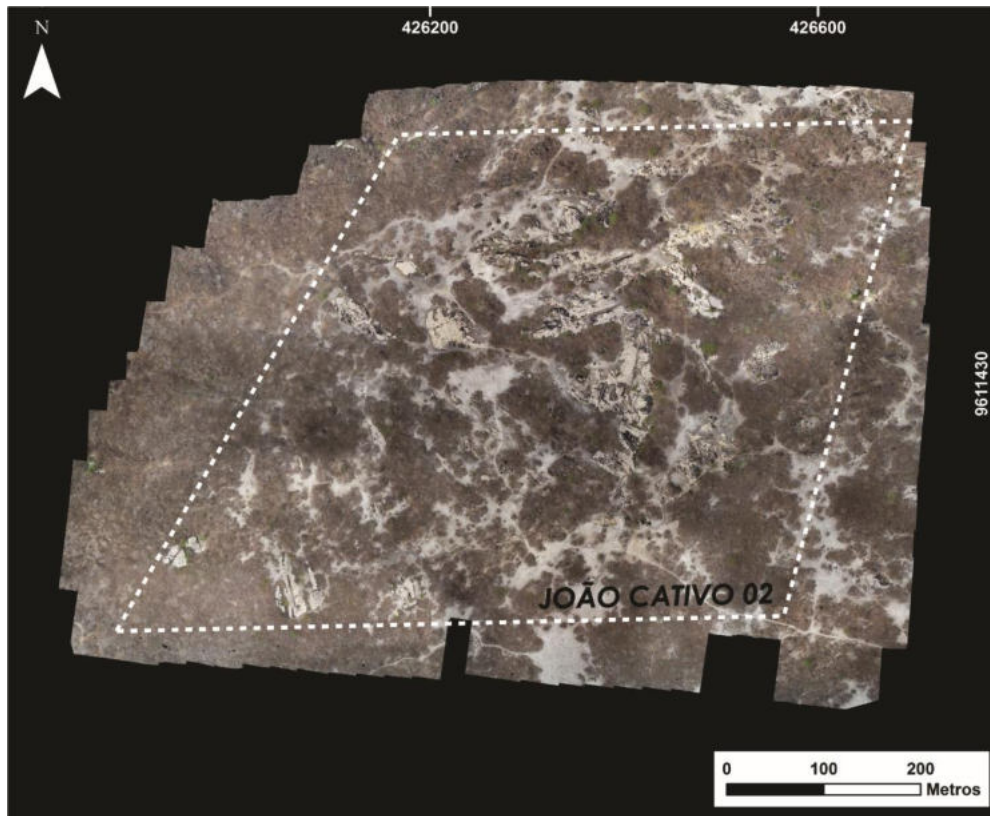
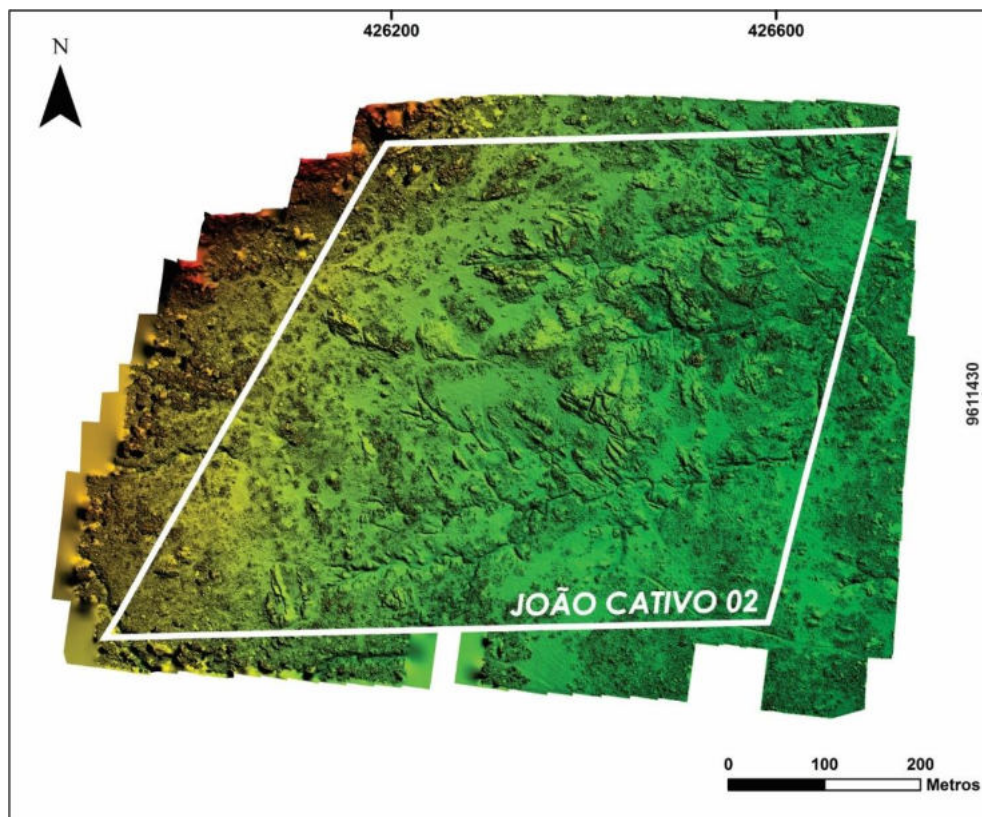


Figura 61 - Visualização do MDE sobre a seção João Cativo 02 no Sítio Paleontológico João Cativo, no município de Itapipoca (CE). Fonte: Henrique Sampaio, 2020.



Na imagem de alta resolução espacial obtida por RPA foi realizada a extração de lineamentos estruturais observados nos lajedos e domos graníticos onde ocorrem os tanques naturais. A técnica utilizada para a extração dos lineamentos é descrita em Goldstein; Marshak (1988). Os autores definem que a escala da extração dos lineamentos deve ser fixa. Na presente pesquisa foram utilizadas imagens de alta resolução espacial obtidas por RPA, obtendo-se dois tipos de produtos: imagem ótica colorida (cor verdadeira) e mapas de relevo sombreado confeccionadas a partir do MDE obtidos. Sendo utilizados quatro mapas de relevos sombreados, com iluminantes posicionados a N360°, N45°E, N90°E e N45°W, todos com inclinação de 45°. Os lineamentos extraídos nos mapas de relevo sombreados foram compilados e tratados conjuntamente, sendo deletados os lineamentos repetidos. As propriedades dos lineamentos (azimute, comprimento) foram obtidas automaticamente no programa ArcGIS 10.3.1 e os dados tratados com a extensão *Polar Plots* (JENNESS, 2014). Diagramas de rosáceas foram então gerados, utilizando a somatória dos comprimentos em intervalos azimutais de 10° e frequência de orientações dos lineamentos.

4.3 Procedimentos

4.3.1 Análise de parâmetros morfométricos

Nesta pesquisa, a classificação morfométrica, assim como o tipo genético, foi baseada nas características definidas por Mayor Rodriguez (2011) para feições análogas aos tanques naturais que ocorrem em lajedos e/ou domos graníticos, a saber: comprimento; largura; profundidade e a presença ou não, de exutório integrado a área da cavidade. Já a morfologia dos tipos de fundo é baseada na proposta de Twidale; Vidal-Romaní (2005) para formas análogas aos tanques na Europa e Oceania, sendo reinterpretada por Waldherr *et al.* (2017a) e Silva *et al.* (2017) para os tanques naturais localizados no Nordeste do Brasil, em especial na região do semiárido.

As cavidades naturais têm sido avaliadas com base em parâmetros morfométricos propostos por diversos autores e que tem estudado feições análogas aos tanques brasileiros em diferentes partes do mundo (PEDRAZA, 1996; PEDRAZA *et al.*, 1989; VIDAL-ROMANÍ; TWIDALE, 1998; TWIDALE; UÑA ALVAREZ; VIDAL-ROMANÍ, 2000; VIDAL-ROMANÍ, 2005; VILLAR, 2007; MAYOR RODRÍGUEZ, 2011). Os estudos de distintas formas do relevo granítico, em especial as depressões naturais, elaborado por Pedraza (1996), no Sistema Central Espanhol, e por Mayor

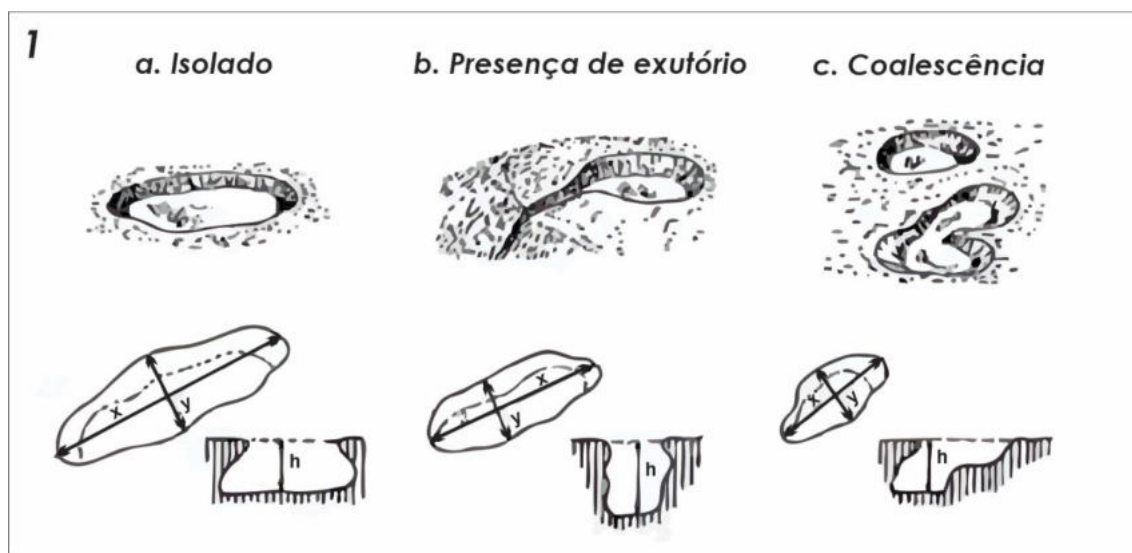
Rodríguez (2011), no maciço granítico de *O Pindo*, na região da Galícia - Província de Corunha (Espanha), fornecem uma estratégia metodológica apropriada em relação a análise dos tanques naturais no semiárido brasileiro. Segundo as propostas destes autores há um consenso das variáveis morfométricas que tendem a uma melhor caracterização das cavidades, a saber: comprimento (**C**); largura (**L**); profundidade (**P**); e, em alguns casos, altura do exutório (**E**). Em ambos os estudos citados, o parâmetro **P** foi considerado o mais relevante por ser o indicativo de desenvolvimento vertical da cavidade natural.

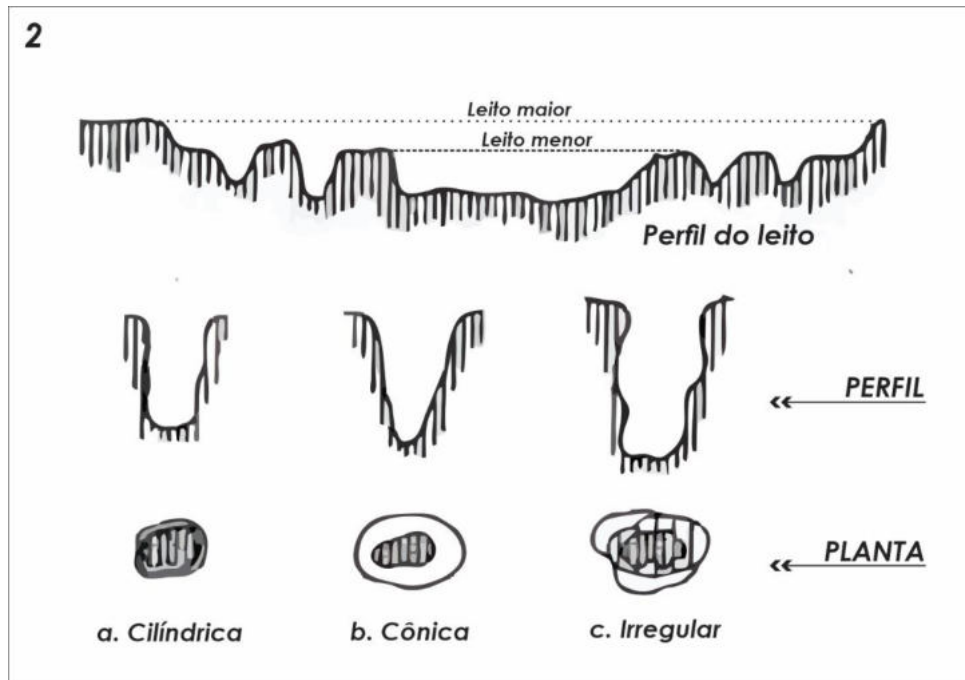
Pedraza (1996) evidencia uma importante diferenciação entre as cavidades naturais denominadas como "*Pila*" ou "*Pilancones*" (formas não fluviais) e as "*Marmitas Gigante*" (formas fluviais). É importante destacar neste ponto, a possibilidade de identificação em campo de formas menores de relevo devido ao tipo de forma (aspectos dimensionais e morfométricos) e, conseqüentemente, da atuação de distintos processos genéticos vinculados ao desenvolvimento das cavidades naturais, indicando a origem fluvial ou não. Em geral, a *Pila* ou *Pilancones* (não fluvial) apresentam dimensões de $C > L$ (por vezes, $C \cong L$), mas sempre $P \ll C$ ou L . No entanto, as feições geomórficas denominadas como *Marmitas Gigante* (fluvial) tenderiam um padrão de $C \cong L \cong P$ ou $P \gg C \cong L$.

É importante destacar que a classificação proposta pelos autores espanhóis em relação a *Pilas* ou *Pilancones*, ou seja, de formas análogas aos tanques naturais, é utilizada, na maior parte das vezes, em escala centimétrica. No Brasil, em especial no semiárido brasileiro, os tanques naturais são de grandes dimensões chegando a exceder 20 metros de comprimento e, por vezes, alcançando 50 metros. A largura máxima chega a 5 metros e a profundidade, ocasionalmente, supera os 10 metros. Assim, a presente pesquisa propõe uma classificação diferenciada para os tanques naturais fossilíferos de Itapipoca, baseando-se em formas menores do relevo granítico observadas nos sítios paleontológicos, principalmente no que se refere aos aspectos dimensionais dos tanques (Figura 62). Já as *Marmitas Gigantes* (formas fluviais), corresponderiam aos "Caldeirões" e/ou "Marmitas" no Brasil, sendo encontrados em leitos (ou antigos leitos) de canais fluviais que drenam o semiárido nordestino, conformando características morfológicas e morfométricas muito semelhantes aos analisados no estudo espanhol.

Figura 62 - Proposta de classificação para as formas menores do relevo granítico do Sistema Central Espanhol. Modificado de: PEDRAZA *et al.* (1996).

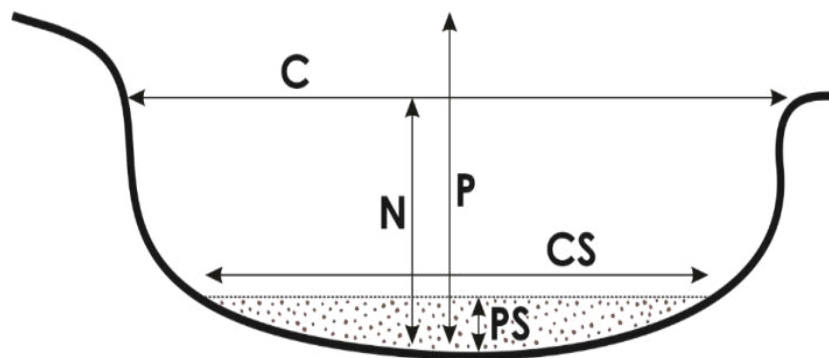
DENOMINAÇÃO	CARACTERÍSTICAS	GEOMETRIA
<p>Pila ou Pilancones não fluvial</p> <p>Chamadas também: gnamma e rock basin na Austrália; cadolle ou cassolete na Catalunha; pias na Galícia.</p>	<p>Depressões sobre lajedos graníticos horizontais ou sub-horizontais. Podem ser pouco profundas, com característica ovoide ou esférica, raramente cônicas; de dimensões centimétricas, podem chegar a métricas em seu eixo maior. Se formam por retenção de água em irregularidades da rocha que implicam uma meteorização-desagregação concentrada. A origem destas irregularidades está nos processos de carga diferencial; a evolução posterior é uma desagregação granular e esvaziado (incluindo os sedimentos mais finos) por transbordamento da água, o qual favorece o aprofundamento. Em geral $X > Y$, no entanto X pode ser Y, mas sempre $H \ll X$ ou Y.</p>	1
<p>Marmitas de Gigante</p> <p>Chamadas também de pilas ou pilancones fluviais..</p>	<p>Apresentam geometria similar as pilas ou pilancones não fluviais, embora estas estejam situados em leitos fluviais. Têm sua origem na geração de fluxos helicoidais durante as cheias e no conseqüente desgaste abrasivo da parede, produzido pela remobilização do material que se encontra no leito da depressão; também podem estar associadas a cavitação. Sua morfologia tende a ser cônica ou cilíndrica e de maior profundidade que os pilancones não fluviais. Em geral $X = Y = h$ ou $h \gg X = Y$</p>	2





De acordo com Mayor Rodríguez (2011), o levantamento de dados a respeito dos parâmetros morfométricos de *Pias* (termo utilizado na Galícia para *Pilas* ou *Pilancones*) pode fornecer informações que viabilizem em campo a identificação mais assertiva das formas menores de relevo. Além dos aspectos morfométricos, é igualmente relevante a visão em planta, junto a descrição da morfologia básica do tanque natural, na ideia de estabelecer uma classificação dos tanques naturais, em especial os fossilíferos, de Itapipoca (CE) (Figura 63).

Figura 63 - Parâmetros fundamentais para mensuração de cavidades que podem ser aplicados aos tanques naturais brasileiros. P ou h = Profundidade máxima; N = Nível de inundação máxima ou altura do exutório; CS = Comprimento transversal da área de acumulação de sedimentos; PS = Profundidade do pacote de sedimentos. Modificado de: MAYOR RODRÍGUEZ (2011).



Para distinção da forma da cavidade natural em planta é necessário comparar os parâmetros de comprimento (**C**) e Largura (**L**), a saber:

Se $C = L$, a morfologia é circular;

Se $C > L$, a morfologia é elíptica ou ovalada.

É importante destacar que na análise morfométrica foi igualmente utilizado o produto gerado a partir do sobrevoo de drone e/ou RPA sobre os tanques naturais fossilíferos. Os arquivos raster correspondem aos quadros de ortofotomosaicos georreferenciados com pixels de 2,7 cm e os arquivos de base para a confecção de modelos digitais de elevação (MDE) com alta resolução espacial. A conformação de ortofotomosaicos e os modelos digitais de elevação em ambiente digital têm permitido a utilização de programas GIS (ArcGIS 10.3.1, QGIS 3.28 e *Global Mapper 15*) para verificação e no detalhamento de aspectos morfométricos e morfológicos do interior dos tanques naturais fossilíferos de Itapipoca (CE).

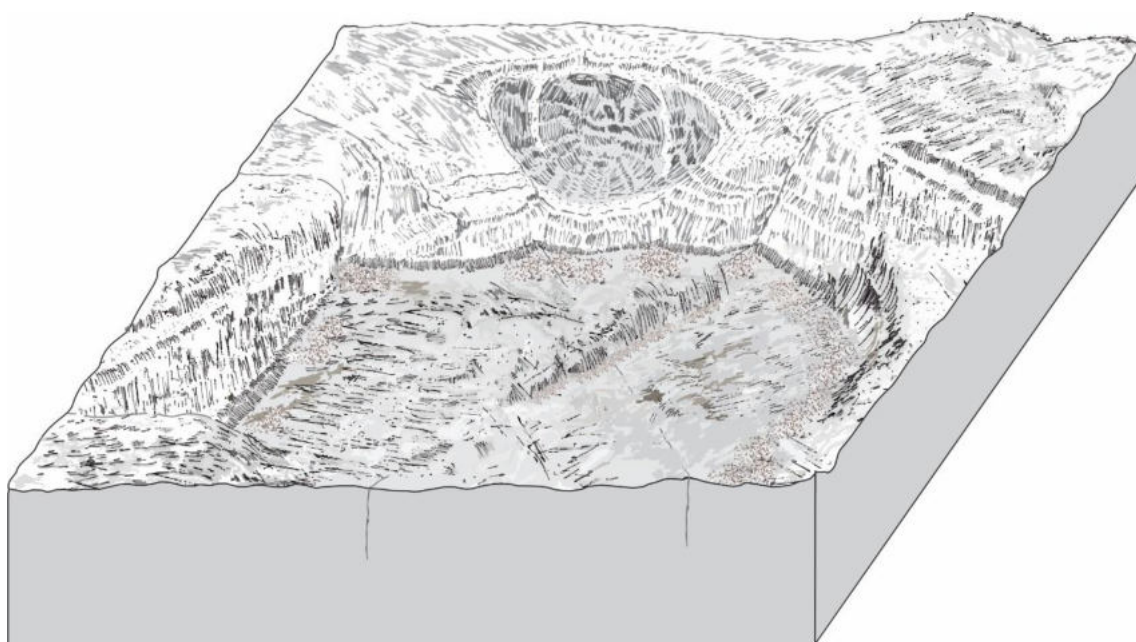
4.3.2 Classificação morfológica de fundo

A classificação da morfologia de tipos de fundo é baseada nas propostas de Twidale; Vidal-Romaní (2005) e de Mayor Rodríguez (2011) para as formas menores do relevo granítico análogas aos tanques naturais e que se encontram distribuídos principalmente na Europa e na Oceania. A proposta estabelece de maneira simplificada os diferentes tipos de morfologias que podem se desenvolver e caracterizar o fundo das cavidades, sendo do tipo côncavo, plano ou em forma de "poltrona". É importante recordar que as formas análogas aos tanques naturais são dimensionadas, na maior parte das vezes, em escala centimétrica.

No caso dos tanques naturais localizados no semiárido brasileiro, é necessário realizar uma série de apontamentos no intuito de adequar em relação a proposta de classificação morfológica. A adequação é dada principalmente em relação as diferenças de aspectos dimensionais e os atributos morfológicos. Desse modo, a classificação proposta para a presente pesquisa tem como fundamentação básica os tanques naturais (fossilíferos ou não) observados em trabalhos de campo no município de Itapipoca (CE). É apresentado o total de quatro tipos de morfologia de fundo para os tanques naturais, a saber: (i) fundo côncavo de seção hemisférica; (ii) fundo plano; (iii) fundo em forma de poltrona; e, por fim, (iv) fundo do tipo cunha (Anexo K).

i) Fundo côncavo de seção hemisférica - em muitos casos não possui exutório definido ou quando existe geralmente é estreito. O transbordamento da água se produz ao longo de todo o contorno da concavidade, constituído por ombreiras graníticas. Em alguns casos esses tipos de tanques estão unidos em sequência por aberturas em arco (concavidade para cima), resultando em um tanque com aspecto lobulado (Figura 64).

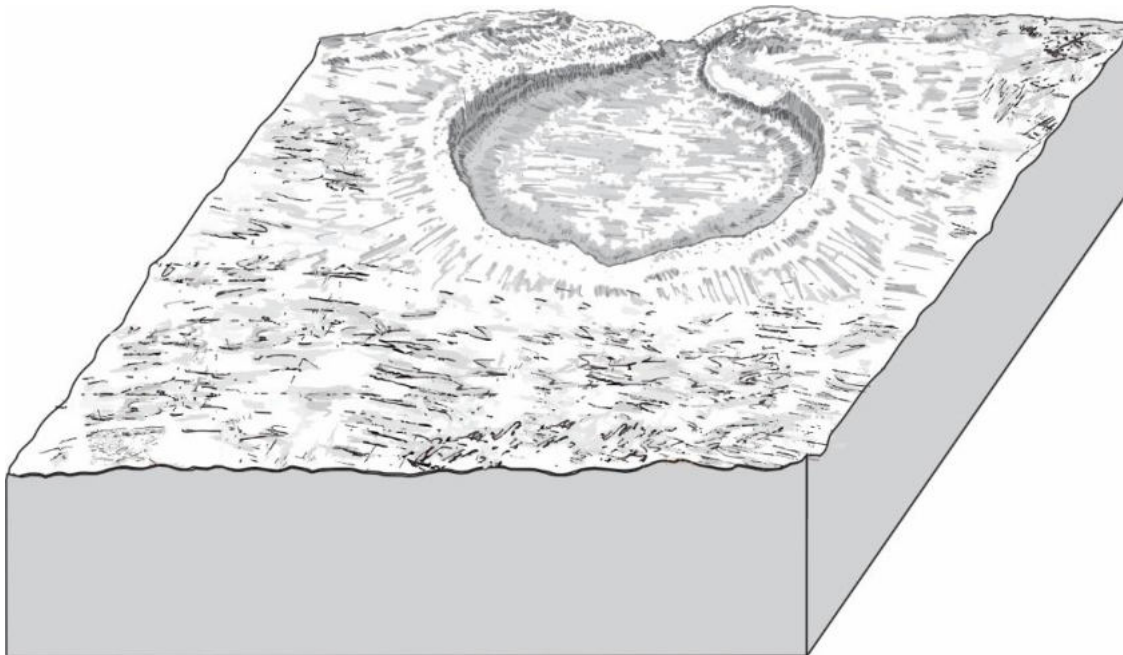
Figura 64 - Exemplo de tanque natural com tipo de fundo côncavo. É possível visualizar que a cavidade foi unida com outro tanque de maiores dimensões (na porção inferior), sendo segmentado por uma ombreira granítica em forma de septo. A depressão na porção superior do lajedo possui largura máxima de 3,8 m e profundidade até 2 m.



Elaborado por: Felipe Waldherr, 2023.

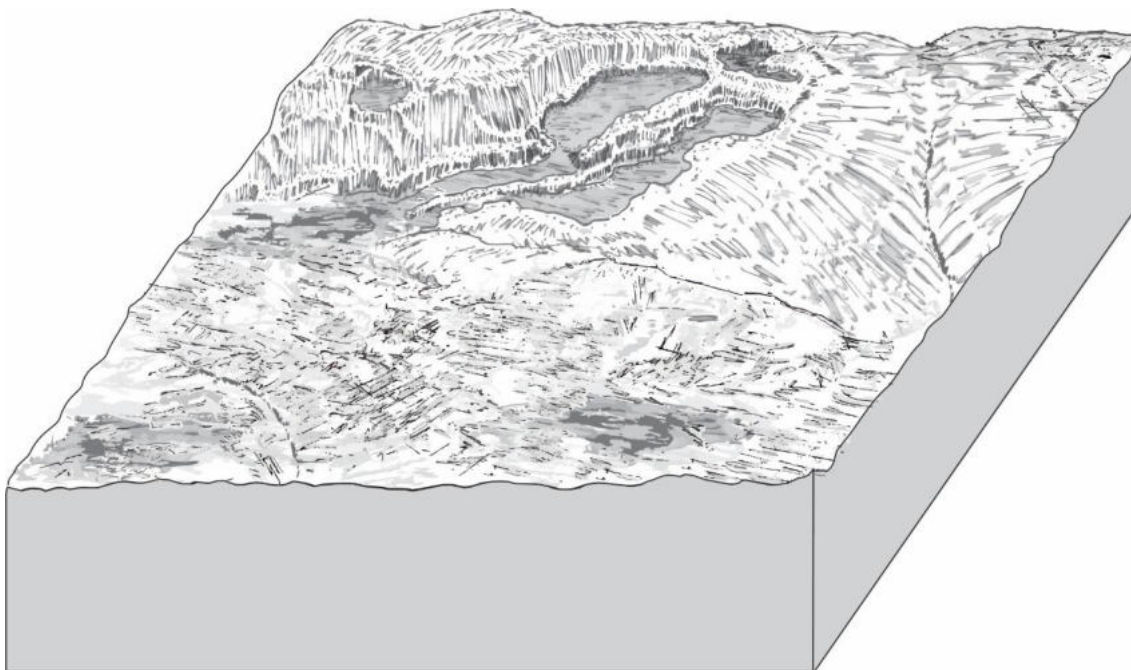
ii) Fundo plano - em comparação com o anterior, é menos profundo e têm forma de fundo plano. Em geral, o fluxo de água é direcionado ao exutório. A ocorrência da estrutura plana no fundo do tanque indica igualmente a interceptação entre fraturas de descamação, ou seja, a exposição do topo de um nível de fratura sub-horizontal (*sheet structure*) que ocorre comumente em lajedos e domos graníticos. Em alguns casos esses tipos de tanques estão unidos por aberturas estreitas com fundo plano, constituindo parte de uma incipiente rede de drenagem (Figuras 65 e 66).

Figura 65 - Exemplo de tanque natural com tipo de fundo plano. É possível visualizar que a cavidade possui um exutório (ou abertura) com fundo plano. A depressão possui largura máxima de 2 m.



Elaborado por: Felipe Waldherr, 2023.

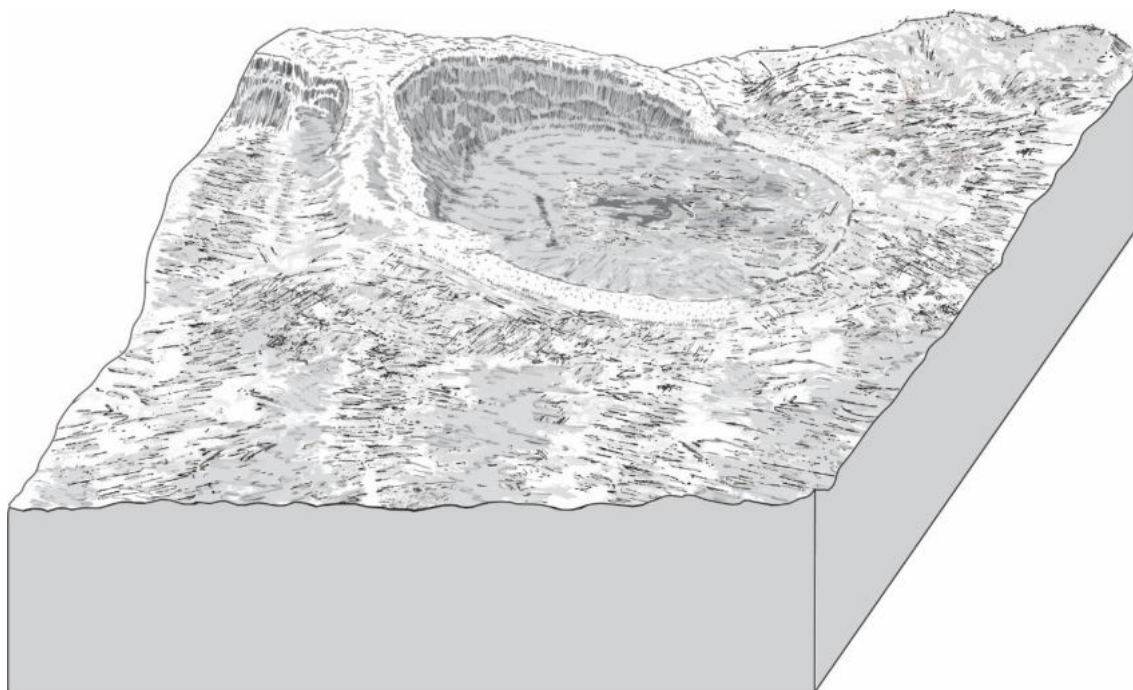
Figura 66 - Conjunto de tanques naturais com tipo de fundo plano. Os tanques naturais interconectados por estreitas aberturas e segmentados por uma série de septos graníticos, constitui uma efêmera rede de drenagem sobre o lajedo granítico durante as intensas precipitações, abastecendo os tanques de maiores dimensões no entorno. As depressões possuem comprimento que variam de 3 a 4 m; enquanto a largura máxima alcança 1,80 m.



Elaborado por: Felipe Waldherr, 2023.

iii) Fundo em forma de poltrona - este tipo possui uma seção transversal assimétrica à linha de máxima pendente. Na parte superior, as paredes do tanque têm maior altura que na inferior, onde se localiza o exutório ou abertura. Normalmente a área de escape prossegue como uma ampla abertura e rebaixamento das ombreiras graníticas. Estas formas são típicas de superfícies moderadamente inclinadas que seguem descendo desde as zonas planas da cimeira até as paredes inclinadas e áreas de planície nas adjacências (Figura 67).

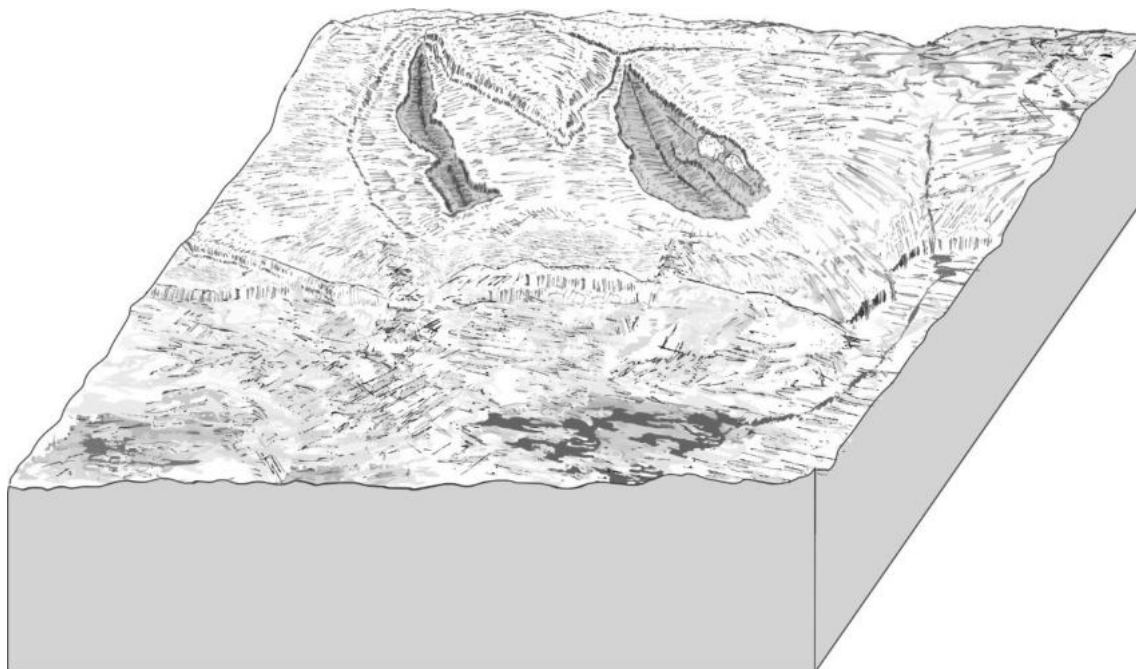
Figura 67 - Exemplo de tanque natural com fundo em forma de "poltrona". É possível visualizar o aspecto hemi-esférico e o rebaixamento gradual das ombreiras graníticas. A depressão possui comprimento de 7,5 m.



Elaborado por: Felipe Waldherr, 2023.

iv) Fundo do tipo cunha - corresponde ao fundo plano inclinado de formato triangular. Na maior parte das vezes, o tanque possui o exutório granítico, seguindo o lineamento estrutural que conforma a feição geomorfológica. O transbordamento do nível de água do tanque natural ocorre, comumente, ao longo de todo o contorno da estreita cavidade. No município de Itapipoca, os tanques com fundo do tipo cunha são encontrados sobre os lajedos graníticos, sendo caracterizados pela disposição paralela (Figura 68).

Figura 68 - Exemplo de tanques naturais com fundo em forma de cunha. Na maior parte das vezes ocorrem de forma paralela e possuem um aspecto estreito e alongado, seguindo o lineamento estrutural que conforma a feição geomorfológica. As depressões possuem comprimento que variam de 3 a 5 m, enquanto a profundidade encontra-se em escala centimétrica (< 20 cm).



Elaborado por: Felipe Waldherr, 2023.

Embora seja possível, na maior parte das vezes, reconhecer em trabalho de campo um dos tipos de fundo definidos, existem casos onde a cavidade natural pode apresentar mais de um tipo de fundo. A caracterização de um tanque poderia ser atribuída, por exemplo, pode reunir tipos de fundo côncavo, plano, poltrona e/ou cunha. Em casos assim é proposto a classificação denominada como "tipo de fundo composto ou complexo", sendo detalhado no interior do tanque as distintas morfologias de fundo. No município de Itapipoca (CE) foi possível observar, até o momento, os cinco tipos de fundo de tanque natural.

5 RESULTADOS

5.1 Sítio Paleontológico Jirau e o tanque natural fossilífero Jirau 01

5.1.1 Importância geocientífica do Sítio Paleontológico Jirau

O Sítio Paleontológico Jirau foi descoberto no ano de 1993 a partir de uma prospecção paleontológica, financiada pelo programa de iniciação científica do CNPq da Universidade Federal do Ceará (XIMENES, 2003). O trabalho inicial ficou restrito ao reconhecimento dos tanques naturais, documentação fotográfica e coleta de amostras fósseis. De acordo com Ximenes (2003), no interior do tanque haviam cacimbas escavadas pelos moradores locais, sobre os depósitos para retenção de água, resultando na exposição de níveis fossilíferos e, conseqüentemente, a perda de muitos fragmentos ósseos. Na ocasião foi realizado um acordo com os proprietários da área, recebendo também o apoio institucional da Prefeitura de Itapipoca. É importante enfatizar, além de resguardar a memória científica, que durante a Expedição João Cativo, empreendida no ano de 1961, o tanque natural que viria a ser denominado Jirau 01 foi mencionado em anotações de campo como uma área promissora de investigação paleontológica (Figura 69). Os apontamentos foram realizados pelos professores Carlos de Paula Couto e Fausto Luiz de Souza Cunha.

Figura 69 - Registro fotográfico do tanque natural Jirau 01 realizado durante a Expedição João Cativo em janeiro de 1961. É possível visualizar que uma parte do depósito de tanque foi parcialmente desentulhado, dando lugar a cacimbas para o armazenamento de água durante o período de estiagem. Fonte: SOUZA-CUNHA (1966).



Uma série de levantamentos, principalmente no âmbito paleontológico, foram realizados nos tanques do Sítio Paleontológico Jirau durante os anos de 2001, 2003, 2006, 2009, 2012 e 2015, resultando em novas escavações e importantes contribuições no que se refere aos estudos tafonômicos a partir da análise de fósseis coletados em depósitos de tanque (ARAÚJO-JÚNIOR, 2012, 2015, 2016; ARAÚJO-JÚNIOR *et al.*, 2011a, 2011b, 2012, 2013a, 2013b). À medida que o depósito sedimentar era gradualmente removido do interior dos tanques naturais, a morfologia de fundo e o conjunto de estruturas menores nas paredes laterais foram sendo expostos na antiga área de contato solo-rocha (Figuras 70 e 71). De acordo com Araújo-Júnior (2015) foi possível resgatar, através das escavações realizadas sobre os depósitos de tanque no Sítio Paleontológico Jirau, em especial do tanque natural fossilífero Jirau 01, o total de 1.405 fósseis até o presente momento (Figura 72). O material fossilífero coletado foi encaminhado, posteriormente, ao acervo do Museu de Pré-história de Itapipoca (MUPHI).

Figura 70 - Registro fotográfico da primeira escavação científica realizada no tanque natural fossilífero Jirau 01. É possível visualizar que a porção que compreende o eixo central e o exutório encontrava-se completamente colmatada. Foto: Celso Ximenes, 2001.



Figura 71 - Registro fotográfico da primeira escavação científica realizada no tanque natural fossilífero Jirau 01. No interior do tanque, é possível visualizar o resquício do antigo nível de sedimentação acumulada no interior do tanque. O contato é impresso na parede lateral a partir da linha horizontal de cor clara. Atualmente, a linha caracteriza o nível máximo de água no tanque. Foto: Celso Ximenes, 2001.



Figura 72 - Restos fósseis (fêmur e tíbia) de uma preguiça-gigante (*Eremotherium laurillardii*) coletados a partir da escavação do depósito de tanque no Jirau 01. O conteúdo fossilífero foi resgatado no ano de 2006 pelo Professor Celso Lira Ximenes. Foto: Celso Ximenes, 2006.



O Sítio Paleontológico Jirau situa-se a cerca de 21 km a noroeste da sede do município de Itapipoca (CE). O sítio compreende o total de sete tanques naturais de grandes dimensões que ocorrem sobre os lajedos e domos rochosos, além de outras formas menores que compõe o relevo granítico, por exemplo, matacões, *tors* e *castle koppies*. O Sítio Paleontológico compreende duas áreas de concentração de tanques naturais, a saber: o setor norte e o setor sul (Figura 73). No setor norte, os tanques naturais (Jirau 02 ao 07) encontram-se nivelados a 45 metros de altura em um extenso domo granítico. Os tanques se apresentam de modo paralelo, seguindo a orientação do sistema de fraturas conjugadas WNW-ESE. No setor sul, o tanque natural Jirau 01 ocorre do modo isolado, seguindo a orientação dos tanques situados ao norte, mas encontra-se nivelado numa cota altimétrica de 75 metros. O tanque Jirau 01 corresponde ao tanque natural de maior dimensão no setor sul.

Figura 73 - Distribuição geográfica dos sete tanques naturais, sendo três fossilíferos, no Sítio Paleontológico Jirau, município de Itapipoca (CE). Foto: Henrique Sampaio, Dez./2021.



No Sítio Paleontológico Jirau, os tanques naturais de maiores dimensões (tanques Jirau 01 - 07) correspondem a formas estreitas e alongadas, alcançando em média os 50 metros de comprimento. A morfologia que define o tipo de conjunto de tanques naturais

expostos acima são feições que seguem lineamentos estruturais pré-existent, configurando as ombreiras graníticas. As ombreiras graníticas, por sua vez, delimitam as formas menores do relevo que seguem de modo paralelo e contínuo o eixo principal. Um outro aspecto interessante é o tipo de fundo dos tanques naturais de grandes dimensões que varia entre o formato côncavo e/ou em cunha. Na paisagem interiorana de Itapipoca, a distribuição dos tanques naturais com esse tipo de morfologia específica tem fomentado a utilização cada vez mais frequente do termo *Itaigara*, da família linguística tupi e que tem o significado de "Canoa de Pedra" em português (Figura 74).

Figura 74 - Tanques naturais sobre domo granítico no setor norte do Sítio Paleontológico Jirau. Na foto visualiza-se o tanque natural fossilífero Jirau 03. Foto: Celso Ximenes, Dez./2021.



O tanque natural Jirau 01 constitui o principal foco de investigação no Sítio Paleontológico Jirau em virtude do conjunto de aspectos morfológicos da depressão e da disposição de condicionantes geoambientais, em especial no que se refere ao controle estrutural e o acesso ao material sedimentar remanescente do depósito de tanque. A análise da morfologia de fundo do tanque e das camadas que constituem o depósito de tanque tem evidenciado uma série de apontamentos sobre a possível evolução desta forma menor do relevo granítico e da dinâmica da paisagem no seu entorno. O lajedo, o qual se encontra o tanque natural Jirau 01, é constituído por leucogranito e abrange uma área de 5.260 m². O lajedo se mantém nivelado em uma altitude de 75 metros. As coordenadas geográficas do tanque Jirau 01 ¹⁸ são: 3°21'23.22"S e 39°42'19.81"O. Os principais pontos de acesso ao Sítio Paleontológico Jirau são por vias secundárias não pavimentadas através das localidades da Barra do Macaco e da Lagoa do Juá.

5.1.2 Contexto geológico e geomorfológico do Sítio Paleontológico Jirau

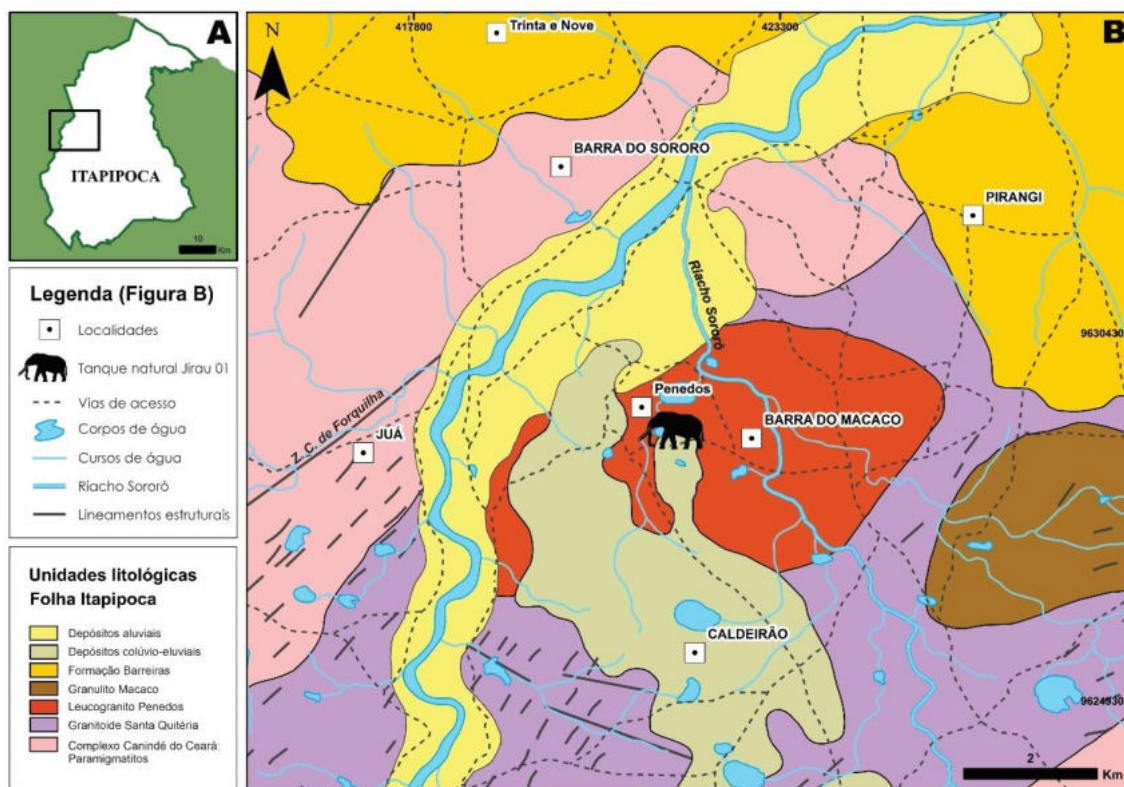
De acordo com o mapeamento geológico, em escala 1:100.000, elaborado pelo CPRM (BRAGA; GOMES, 2018), o Sítio Paleontológico Jirau está localizado sobre a unidade litológica Leucogranito Penedos (Figura 75), pertencente a Suíte Magmática Tardi a Pós-orogênica, de idade Cambriano-ordoviciano. Ainda de acordo com o mapeamento geológico o entorno da área dos tanques naturais é constituído por depósitos aluvionares, depósitos colúvio-eluviais, ambos de idade cenozoica, e pelo Granitoide Santa Quitéria, pertencente ao Complexo Tamboril-Santa Quitéria, de idade neoproterozoica. É importante destacar que o conjunto da área é drenado pelo Riacho Sororô e afluentes, de regime intermitente (SOUSA, 2009).

A unidade litológica Leucogranito Penedos corresponde aos afloramentos de granitoides esbranquiçados a rosados que são encontrados nas localidades de Penedo e Barra do Macaco. De acordo com Braga; Gomes (2018) a unidade é constituída, predominantemente, por sienogranitos, isotrópicos, de granulação grossa, com baixo grau de alteração e raramente fraturados. Macroscopicamente são formados por feldspatos, quartzo, tendo como máficos biotita, anfibólio, além de granadas que variam de 0,4 a 1,0 cm. Ainda segundo os autores a unidade aflora como lajedos, na maior parte das vezes de grande extensão, envolto de coberturas inconsolidadas (BRAGA; GOMES, 2018). Em relação ao aspecto estrutural e a tectônica, a unidade litológica Leucogranito Penedos que

¹⁸ As coordenadas UTM do tanque natural Jirau 01 são: Zona 24M - 421627.00 m E / 9628979.00 m S.

compõem o embasamento cristalino na área de estudo apresenta um arranjo estrutural assinalado por um *trend* principal NE-SW, que condiciona a forma da Suíte Magmática Tardi a Pós Orogênica (BRAGA; GOMES, 2018).

Figura 75 - Mapa geológico da Folha Itapipoca. **A** - Localização do tanque natural fossilífero Jirau 01; **B** - Recorte do mapeamento geológico no município de Itapipoca (CE). O tanque situa-se integralmente sobre a unidade litológica Leucogranito Penedos e próximo ao contato com os depósitos colúvio-eluviais. Modificado de: BRAGA; GOMES (2018).



De acordo com a proposta de classificação geomorfológica do nordeste setentrional brasileiro, elaborado por Costa *et al.* (2020), o Sítio Paleontológico Jirau encontra-se inserido na "Superfície Sertaneja 1" (SS1). Ainda segundo os autores, a Superfície Sertaneja 1 corresponde aos terrenos mais baixos, constituindo-se nas áreas onde os processos de aplainamento são mais evidentes. Em relação a variação altimétrica, esse compartimento do relevo situa-se entre as cotas de 50 e 250 metros, com topografias planas ou levemente onduladas (COSTA *et al.*, 2020).

No setor norte, os tanques naturais (Jirau 02 - 07) ocorrem de modo paralelo sobre o domo granítico, seguindo a direção WNW-ESE. A monotonia da Superfície Sertaneja 1 é interrompida por uma série de lajedos e domos graníticos que sobressaem a horizontalidade da paisagem interiorana do município de Itapipoca (Figura 76). No setor

sul, o tanque natural Jirau 01 segue igualmente a direção WNW-ESE, no entanto, a depressão de referência na presente investigação ocorre de forma isolada e sobre um lajedo granítico (Figura 77).

Figura 76 - Setor norte do Sítio Paleontológico Jirau compreende os tanques naturais (Jirau 02 - 07) nivelados em uma altitude de 45 metros. Foto: Henrique Sampaio, Jan./2020.



Figura 77 - Tanque Jirau 01 correspondente a maior depressão natural situada no setor sul do Sítio Paleontológico Jirau. Foto: Henrique Sampaio, Jan./2020.



A Superfície Sertaneja 1, drenada pelo Riacho Sororó, afluente do Rio Cruxati, corresponde a uma morfologia de ampla expressão local que varia topograficamente de plana a suavemente ondulada, com altitudes que variam entre 40 e 80 metros. Nessa extensa superfície arrasada, encontra-se setores com ocorrência de depósitos coluviais e, de lajedos e domos graníticos. No setor de afloramento granítico é possível visualizar a ocorrência de "Formas Menores" ou "Microformas". Em geral, a presença deste tipo de formas do relevo, por exemplo, matacões, *tors*, *castle koppies*, *tafoni*, *flared slopes* e alvéolos, denota a ação de processos de duplo estágio ou de etchplanação (Figuras 78 a 80). No caso, as formas menores citadas acima possuem sua origem atribuída a ação do intemperismo químico-físico em subsuperfície e, posteriormente, são alçados a superfície através do trabalho remontante da drenagem que remove a cobertura constituída pelo manto regolítico (TWIDALE; VIDAL-ROMANÍ, 2005; BASTOS, 2018; MAIA; NASCIMENTO, 2018; MAIA *et al.*, 2018).

Figura 78 - Matacão (*boulder*) seccionado sobre lajedo granítico de topo nivelado. Esses matacões tem sido associados ao amplo controle estrutural, sob orientação de fraturas ortogonais, e reafeiçoados em subsuperfície a partir do intemperismo químico em matriz regolítica. Foto: Felipe Waldherr, Jul./2019.



Figura 79 - Ocorrência de matacão no entorno do tanque Jirau 02. Foto: Felipe Waldherr, Jul./2019.



Figura 80 - Ocorrência de *castle koppies* em afloramentos graníticos no entorno do tanque natural Jirau 01, no Sítio Paleontológico Jirau. Foto: Felipe Waldherr, Dez./2022.



5.1.2 Tanque natural Jirau 01: aspectos morfológicos

O tanque natural fossilífero Jirau 01 constitui uma das depressões que ocorrem sobre os lajedos e domos graníticos no Sítio Paleontológico Jirau. Embora outros tanques do tipo *Itaigara* ou *Canoa de Pedra* tenham se desenvolvido igualmente no setor sul, o tanque natural Jirau 01 acaba por sobressair em comparação a largura, comprimento e profundidade (Figura 81). É importante destacar que a denominação utilizada no presente trabalho segue *a priori* a denominação estabelecida por uma série de trabalhos científicos e que utilizaram o termo "Tanque Jirau 01" (XIMENES, 2003, 2009; ARAÚJO-JÚNIOR, 2012, 2015). O tanque, além de ainda prover material de estudo estratigráfico e paleontológico, tem sido utilizado como reservatório de água para períodos de estiagem.

O levantamento dos aspectos morfológicos do tanque natural Jirau 01, na parte do entorno da área de investigação e no interior da depressão, consistiu em obter dados e informações de diferentes perspectivas de análise a partir dos trabalhos de campo e, posteriormente, com o auxílio de imagens obtidas pelo RPA. Os sobrevoos efetuados através da utilização de RPA no Sítio Paleontológico Jirau concentraram-se no período de pós "inverno" (Figura 82) e durante a estiagem (Figura 83), facilitando desse modo a visualização dos afloramentos rochosos e, conseqüentemente, os possíveis condicionantes estruturais que viabilizaram o desenvolvimento do tanque Jirau 01.

Figura 81 - Imagem de sobrevoos de drone sobre o tanque natural fossilífero Jirau 01. Visada na direção leste. Foto: Henrique Sampaio, Jan./2020.



Figura 82 - Imagens obtidas do tanque natural fossilífero Jirau 01 através do sobrevoo com RPA. Foto: Henrique Sampaio, Jan./2020.



Figura 83 - Imagens obtidas do tanque natural fossilífero Jirau 01 através do sobrevoo com RPA. Foto: Henrique Sampaio, Dez./2021.



O tanque natural Jirau 01 corresponde a uma das feições geomorfológicas mais importantes do município de Itapipoca (CE), integrando uma série de investigações no âmbito multidisciplinar e que possibilitou ampliar o entendimento sobre as condições paleoambientais e paleoecológicas durante o Quaternário do Brasil, em especial no semiárido nordestino. O tanque natural Jirau 01 resguarda em seu interior, de modo sequencial, uma janela do tempo geológico que compreende um conjunto de eventos erosivos e deposicionais que ocorreram na área durante o Pleistoceno final e Holoceno tardio. No entanto, o depósito sedimentar no interior da depressão é somente uma pequena fração da complexa história que desencadeia uma série de apontamentos que busca esclarecer a gênese da depressão natural. A ocorrência de formas e estruturas menores do relevo granítico no entorno do Sítio Paleontológico Jirau, assim como o notório controle estrutural e litológico que delimita os aspectos morfológicos dos tanques, indica a importante função do conjunto de condicionantes geoambientais que podem ter viabilizado o desenvolvimento do tanque natural Jirau 01.

De acordo com as observações elaboradas em campo e, posteriormente, com o auxílio do mosaico de imagens obtido a partir do sobrevoo de RPA, é possível indicar que o desenvolvimento do tanque natural Jirau 01 encontra-se aparentemente vinculado ao sistema de estruturas rúpteis/dúcteis que caracterizam o lajedo granítico. O grau de aprofundamento vinculado ao intemperismo físico-químico sobre a disposição de lineamentos estruturais, em especial o conjunto de *sets* de fraturas conjugadas e juntas sub-verticais (vide Figura 34), tende a refletir na exposição e o rearranjo das formas maiores e menores do relevo granítico que compõe o cenário paisagístico, incluindo o sítio paleontológico. Segundo a classificação inicial para as distintas formas de tanques naturais no semiárido nordestino do Brasil (WALDHERR *et al.*, 2017a, 2019), o tanque natural Jirau 01 seria posicionado e/ou interpretado como um tanque natural escarpado de grandes dimensões e com morfologia de fundo do tipo côncavo e/ou cunha.

Ao estabelecer o contorno atual do tanque natural Jirau 01, verifica-se que o plano de desenvolvimento ou eixo principal da depressão pode ser analisado, em separado, através de duas seções pré-estabelecidas, a saber: a primeira seção posicionada a montante e a segunda seção a jusante, em direção ao exutório (Figura 84). O eixo principal do tanque natural Jirau 01 apresenta direção WNW-ESE (N80W). A segmentação entre as seções do tanque natural é dada a partir de uma fratura posicionada de forma oblíqua ao eixo longitudinal da depressão. A fratura mencionada acima possui direção N30W, tendo

a extensão de 3,50 metros de comprimento. A forma citada acima, responsável por sectionar o tanque natural é denominado como septo granítico.

Figura 84 - Seções do tanque natural Jirau 01. Foto: Henrique Sampaio, Jan./2020.



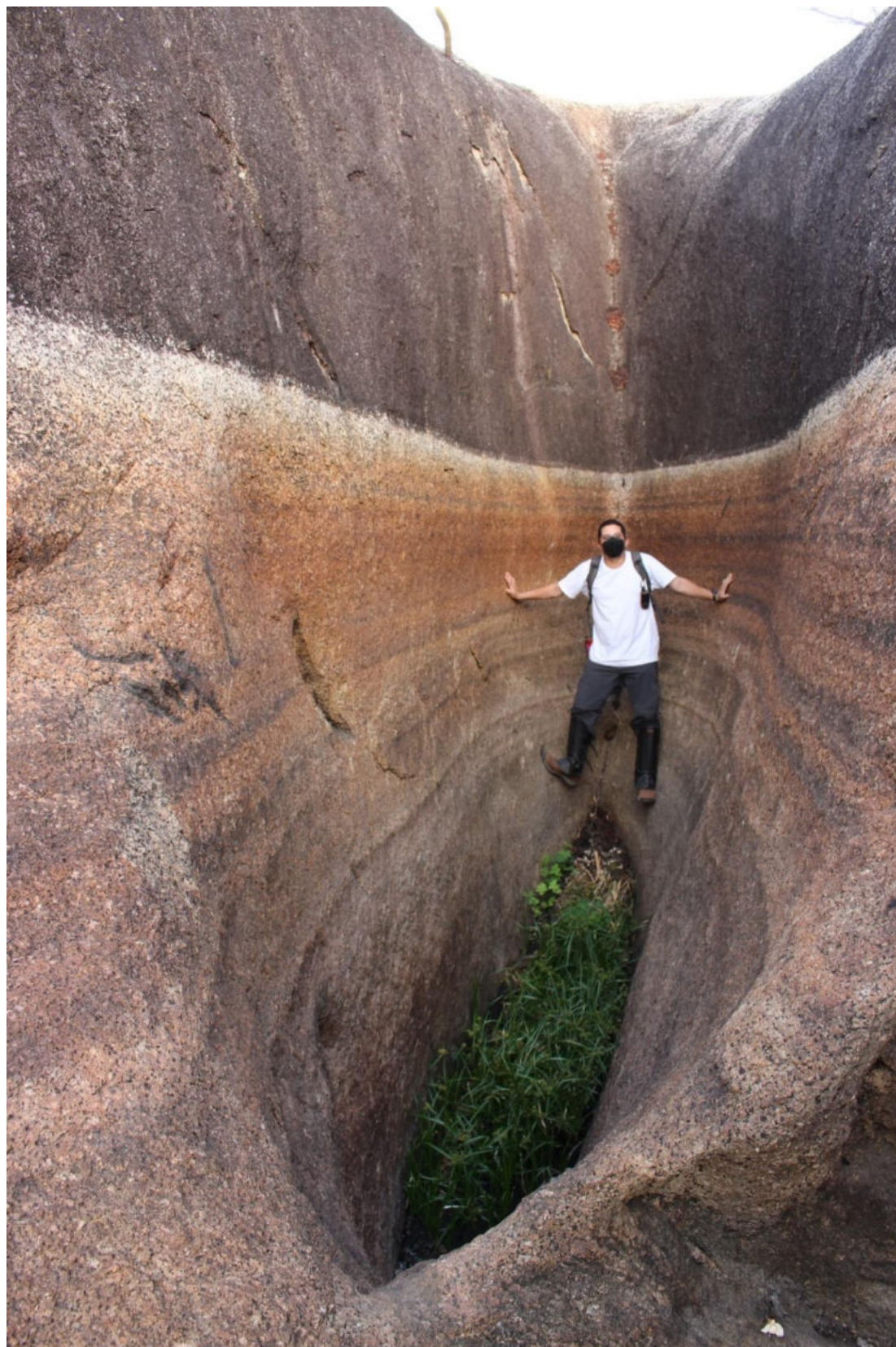
A conformação do tanque natural Jirau 01 é limitada lateralmente por duas ombreiras graníticas que se prolongam de forma quase ininterrupta até o exutório, a jusante. O perfil longitudinal do tanque natural apresenta uma extensão total de 53 metros de comprimento. A largura máxima entre as ombreiras apresenta 5,30 metros e varia de acordo com a seção analisada. Na primeira seção, o tanque é simétrico e estreito, enquanto na segunda seção torna-se disforme, espaçado e assimétrico. Já o fundo da depressão, embora mantenha um padrão côncavo e em cunha, apresenta distintos níveis de aprofundamento, alcançando entre os 5 e 6 metros de profundidade (Figura 85).

Figura 85 - Aspectos morfológicos do tanque natural fossilífero Jirau 01. Foto: Felipe Waldherr, Dez./2021.



A primeira seção do tanque natural Jirau 01 está situada à montante do tanque natural e apresenta os seguintes parâmetros dimensionais: 8 metros de comprimento, com largura máxima de 1,50 metros, e profundidade que alcança 5 metros. As paredes laterais do tanque natural são muito íngremes, com mergulhos superiores a 75° , e apresentam, além da textura de *pitting* (característica associada a corrosão química), o mecanismo ativo de desagregação em placas (*flaking*) na porção superior e média da cavidade. A morfologia de fundo, onde o material sedimentar foi removido por completo, tem formato côncavo e em cunha, sendo possível identificar a fratura (eixo principal) como o fator estrutural preponderante no desenvolvimento do tanque natural (Figura 86).

Figura 86 - A primeira seção do tanque natural fossilífero Jirau 01. É possível observar a morfologia de fundo escavada e o mecanismo de desagregação de placas (*flaking*) e a textura picoteada (*pitting*) nas laterais das ombreiras graníticas. Foto: Celso Ximenes, Dez./2021.



A segunda seção corresponde ao segmento situado à jusante do tanque natural Jirau 01. Desse modo, a continuidade da depressão possui aproximadamente 45 metros de comprimento, com largura máxima de 5,30 metros e profundidades de até 5 metros. O tanque natural mantém a direção WNW-ESE do eixo principal. A parte superior e média do flanco que constitui a ombreira granítica tende a ser rebaixada e suavizada. Este trecho em questão é considerado assimétrico pela disposição dos lineamentos (ver Figura 87).

Figura 87 - Segunda seção do tanque natural Jirau 01. É possível visualizar a importância na disposição das fraturas conjugadas que viabilizaram o desenvolvimento do tanque natural e o aspecto assimétrico entre as laterais do tanque natural, revelando a possível atuação/concentração do intemperismo sobre planos de fraturas verticais e sub-horizontais no eixo principal do tanque. Fonte: Felipe Waldherr, Dez./2021.



É importante destacar que na área de interseção entre as fraturas ocorre também um agrupamento de cavidades menores, semelhante à feição de "favo de mel". Em geral, são comumente encontrados em abrigos ou cavidades do tipo *tafone*, e que podem ser resultantes de esforços pontuais sobre o embasamento cristalino (VIDAL-ROMANÍ, 2008; VIDAL-ROMANÍ *et al.*, 2014a, 2018). O processo em questão pode ter favorecido o desenvolvimento de feições pré-estabelecidas que foram modificadas pela frente intempérica e, posteriormente, sob condições subaéreas. Nas laterais também é visível a atuação do mecanismo de desagregação em placas, além da textura associada ao *pitting*

(Figura 88). À medida que avança à jusante, o tanque natural tende a alargar até conformar uma ampla abertura. Ao utilizar termos específicos em trabalhos que envolvem a geomorfologia granítica, a "abertura" na porção inferior da segunda seção do tanque natural pode ser igualmente denominada como exutório.

Figura 88 - Ocorrência de estruturas menores semelhantes a tafoni e favos de mel na lateral das ombreiras graníticas. As estruturas encontram-se posicionadas de modo oblíquo ao eixo principal do tanque natural. Foto: Felipe Waldherr, Dez./2021.



5.1.3 Distribuição dos lineamentos estruturais no Sítio Paleontológico Jirau

A partir dos modelos de relevo sombreado foram compilados 283 lineamentos estruturais. O diagrama de rosáceas, resultante da somatória de frequência de orientação de lineamentos versus orientação, demonstrou que a área de estudo, e entorno, evidencia duas orientações principais de lineamentos, as direções WNW-ESE e NW-SE, indicando uma pequena diferença aos lineamentos interpretados na imagem ótica (cor verdadeira) (Figuras 89 a 91). A direção WNW-ESE reflete de maneira significativa a maior parte dos lineamentos observados tanto naqueles evidenciados na imagem ótica (cor verdadeira), quanto nos mapas de relevo sombreado. A direção também indica a orientação principal analisada nos lajedos graníticos delimitados.

Uma observação interessante é disposição das estruturas secundárias ou tardias, em especial as juntas e fraturas, em relação ao *trend* NW-SE do Leucogranito Penedos. De modo geral, os lineamentos estruturais WNW-ESE, tanto no setor norte quanto sul, definem os tanques naturais de maiores dimensões, enquanto os lineamentos estruturais de direção NW-SE, posicionados conforme a orientação (*fabric*) do afloramento granítico, reaproveitam a direção preferencial. No entanto, os tanques desenvolvidos na direção NW-SE, são aparentemente menos profundos. Cabe destacar igualmente que em campo, as estruturas de direção NW-SE tendem a delimitar e/ou seccionar os tanques de maiores dimensões.

Figura 89 - Disposição dos lineamentos estruturais sobre a área do tanque natural fossilífero Jirau 01 e entorno. Sobreposição entre os lineamentos e os afloramentos de leucogranito (lajedos) obtidos a partir da imagem ótica em cor natural.

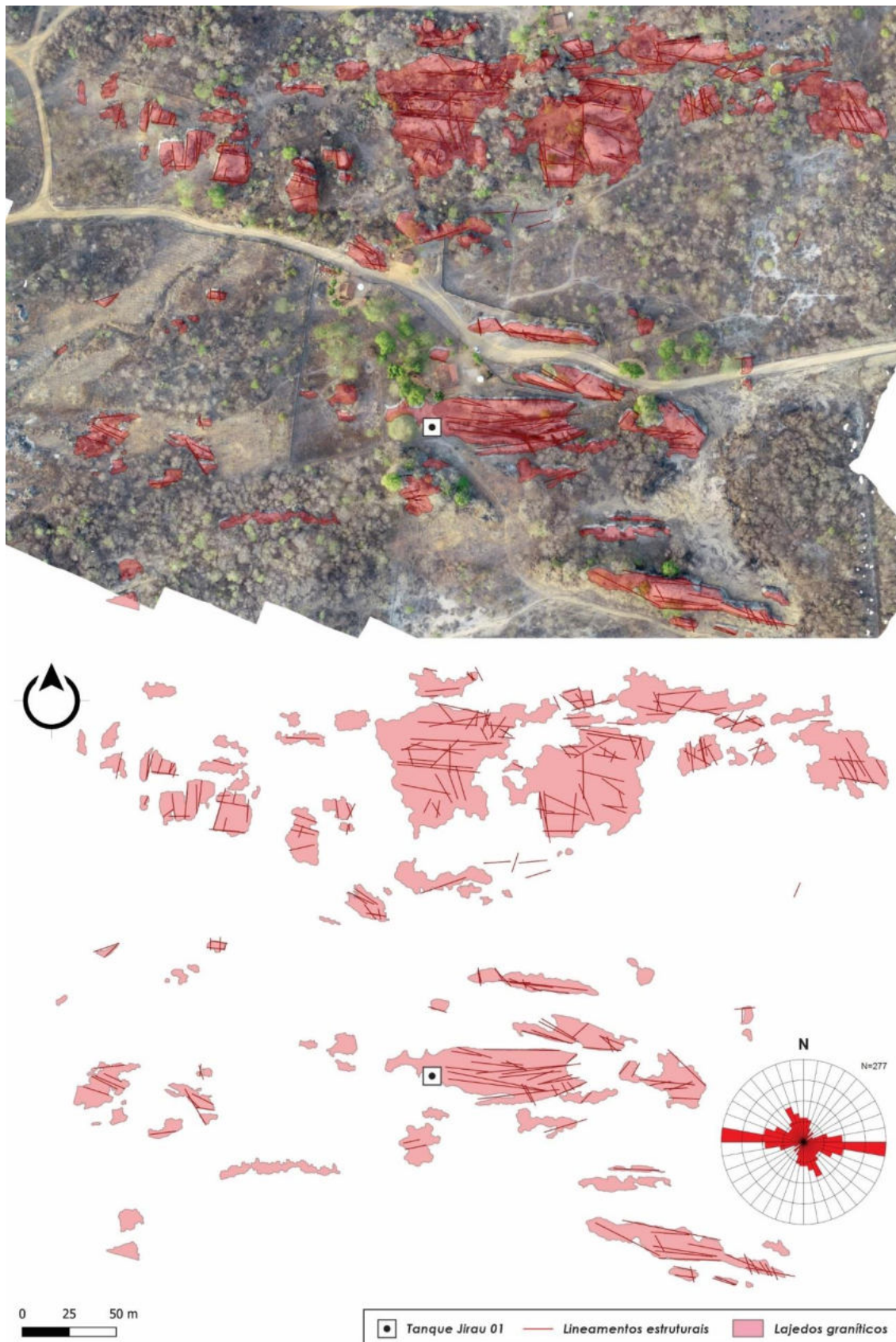


Figura 90 - Disposição de lineamentos estruturais de direção NW-SE tendem a seguir a orientação geral (*fabric*) do afloramento granítico e, eventualmente, seccionam os tanques naturais de maiores dimensões. Foto: Felipe Waldherr, Dez./2021.

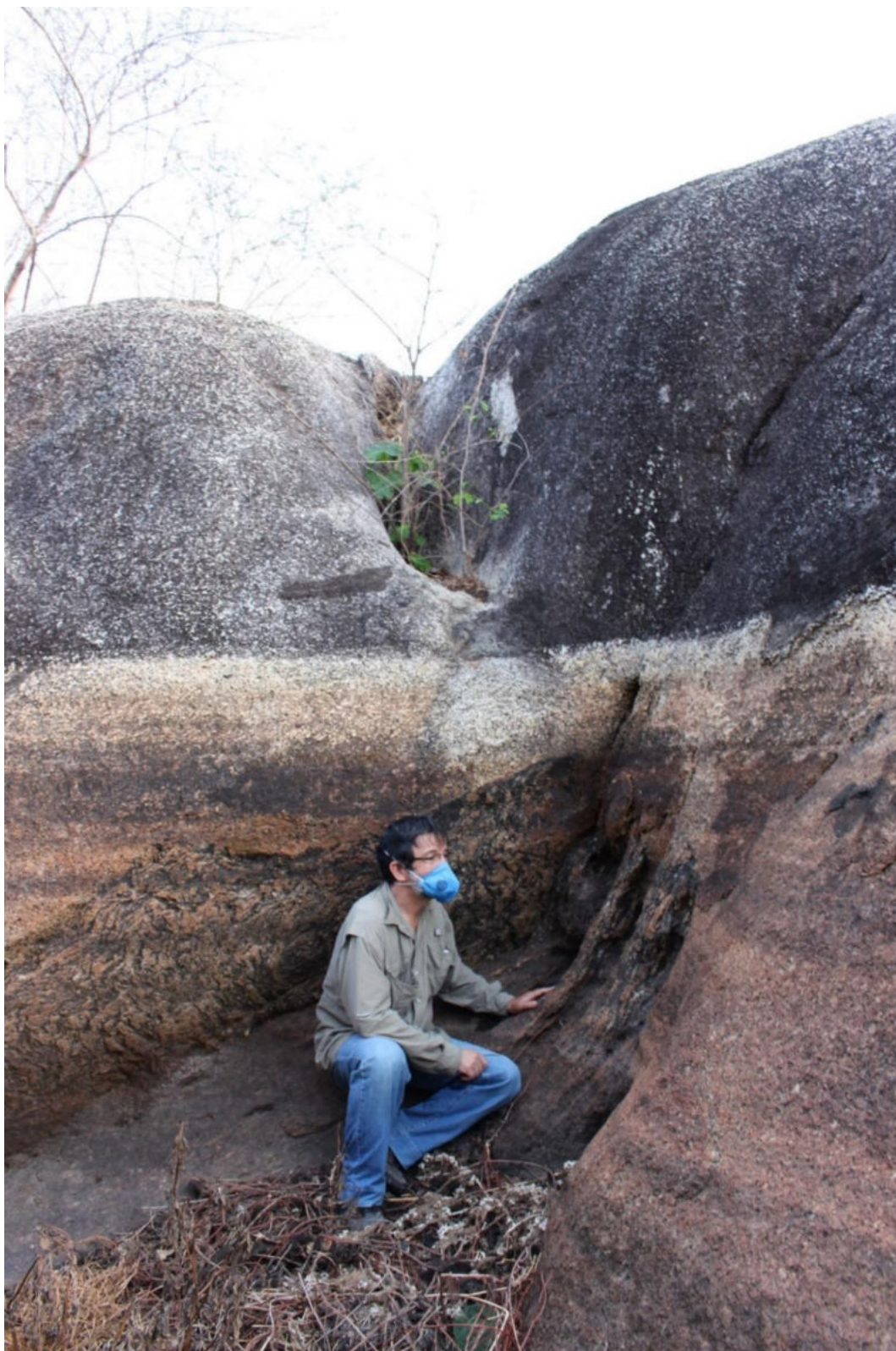


Figura 91 - Registro fotográfico realizado da porção mais elevada do tanque natural Jirau 01 em direção à jusante. É possível notar as ombreiras que seguem a direção WNW-ESE e a ocorrência de estruturas obliquas ao eixo central, de direção NW-SE (N30W), que divide as seções analisadas da depressão através do septo granítico. Foto: Felipe Waldherr, Dez./2021.



5.1.4 Depósito de tanque no Jirau 01

No interior do tanque natural Jirau 01, o acúmulo de material sedimentar que se estende do exutório, à jusante do tanque, até o septo granítico, no limite com a segunda seção, constitui o denominado depósito de tanque. De acordo com Ximenes (2003), Araújo-Júnior (2012, 2015) e Araújo-Júnior *et al.* (2013a), o depósito de tanque do Jirau 01 pode ser dividido em três fácies sedimentares da base para o topo, a saber: (a) O nível basal composto por arenito conglomerático (1,5 m de espessura), constituído por material intemperizado *in situ* da rocha matriz e sedimentos arenosos; (b) O nível médio constituído por conglomerados com matriz argilo-arenosa, onde se concentra os fósseis, depositado em contexto de fluxo de detritos (1 m de espessura); e (c) O nível superior corresponde aos sedimentos finos (1,5 m de espessura), composto por sedimentos argilosos e siltitos, com eventuais seixos de quartzo e abundância de material orgânico.

Na presente pesquisa, o depósito de tanque do Jirau 01 foi selecionado como um importante alvo de investigação no que se refere ao entendimento da evolução do tanque natural e na compreensão dos fatores que influenciaram no processo de deposição. Assim, o levantamento de dados foi feito a partir do registro estratigráfico do depósito de tanque. O preenchimento sedimentar, constituído por material siliciclástico e fossilífero, ainda se encontra resguardado no interior do tanque. Uma cacimba (poço) aberta na década de 1990 sobre o depósito de tanque expôs o perfil estratigráfico, junto as camadas assentadas sobre o embasamento granítico (Figura 92). A análise estratigráfica e sedimentológica do depósito de tanque Jirau 01 tem por objetivo compreender a dinâmica da paisagem responsável por seu preenchimento sedimentar.

Figura 92 - Registro sedimentar da cacimba (poço) com abertura e exposição do perfil estratigráfico. Foto: Henrique Sampaio, Dez./2021.



A presença de uma cacimba que foi escavada na zona central do tanque natural permitiu a visualização do perfil estratigráfico e, conseqüentemente, a análise do registro sedimentar do depósito de tanque (Figura 93). Os dados preservados no interior do tanque podem igualmente subsidiar parte da compreensão sobre a dinâmica local da paisagem durante o Quaternário.

Figura 93 - Exposição do registro sedimentar no interior do tanque natural Jirau 01. O contato entre as camadas siltico-argiloso e a fossilífera é apontado pelo Prof. Celso Ximenes. Foto: Felipe Waldherr, Dez./2021.



O perfil estratigráfico configura-se como um registro do quadro paleopaisagístico, sugerindo uma sequência de eventos, a saber: um período de exposição do tanque natural; o desenvolvimento de uma zona de acomodação a partir do esvaziamento do tanque, resultante de fluxos hidrodinâmicos e, posteriormente, com preenchimento por

sedimentos conglomeráticos e lamosos pleistocênicos. A cacimba segue a orientação estrutural WNW-ESE apresenta um formato retangular e possui profundidade máxima aproximada de 1,80 m.

É importante destacar que a escavação científica do depósito de tanque foi iniciada na década de 2000. De acordo com Ximenes (2003), há relatos locais de desentulhamentos realizados anteriormente com intuito de armazenar a água resultante das "precipitações de inverno". Assim, a camada sedimentar que anteriormente recobria a camada fossilífera, constituída por um material argilo-siltoso (lamoso) com abundância de matéria orgânica, foi completamente removida, expondo atualmente a camada fossilífera no topo do perfil estratigráfico.

Em trabalho de campo, foi reconhecido a presença de três camadas assentadas no interior do tanque natural, conforme o levantamento de estudos anteriores sobre o depósito sedimentar (XIMENES, 2003; ARAÚJO-JÚNIOR, 2012, 2015; ARAÚJO-JÚNIOR *et al.*, 2013a). De modo geral, as camadas sedimentares que constituem o depósito de tanque são interpretadas da seguinte maneira: conglomerados sustentados pelos clastos (porção basal); material siltico-argiloso / lamoso maciço (depósito colúvio-aluvial); e camada fossilífera.

A camada basal sobre o embasamento granítico é constituída por conglomerados polimíticos suportados pelos clastos em matriz argilosa de tonalidade esverdeada a cinza, principalmente no contato com o material saprolítico do embasamento cristalino. Há presença de seixos e calhaus finos arredondados com diâmetros que variam de 2 a 8 cm, compostos predominantemente por quartzos leitosos (Figuras 94 e 95). A camada possui uma espessura de aproximadamente 10 cm. O elevado grau de arredondamento tende a indicar atuação de transporte longo e ocorrência de *flash floods* na localidade, seguindo os principais eixos de drenagem até alcançar as proximidades do Sítio Paleontológico Jirau. Uma vez disponível no entorno, os clastos arredondados foram então remobilizados e depositados no interior do tanque natural.

Figura 94 - Conglomerados suportados por clastos reconhecidos na base do depósito de tanque.
Foto: Felipe Waldherr, Dez./2021.



Figura 95 - Registro fotográfico de seixo de quartzo leitoso arredondado que foi coletado na camada basal do depósito de tanque no Jirau 01. Foto: Felipe Waldherr, Dez./2021.



A camada sobreposta é caracterizada por um espesso material inconsolidado de 1,30 m, constituído por um sedimento lamoso maciço com grãos de quartzo tamanho (em fração) areia muito grossa, subangulosos a angulosos, pobremente selecionados, dispersos na matriz pelítica. O material siltico-argiloso possui coloração laranja a vermelho alaranjado, sendo verificado de modo eventual a presença de grânulos e seixos, e, em menor porcentagem, minerais micáceos (Figura 96). As características indicam que o material siltico-argiloso pode ser associado a depósitos do tipo colúvio-aluvial.

Figura 96 - Contato entre a camada intermediária siltico-argilosa a esquerda e a rocha alterada a direita. A escala está posicionada no contato da parede lateral, conformada pelo material sedimentar e as lascas de descamação verticalizada em estado saprolítico. Foto: Felipe Waldherr, Dez./2021.



E, por fim, a camada superior, fóssilífera, constituída por fragmentos fósseis provenientes da megafauna pré-histórica que habitou a região durante o Pleistoceno Final e Holoceno Inicial (Figura 97). A camada fóssilífera pode ser descrita como uma cascalheira clasto suportada com presença de bioclastos e possui 40 cm de espessura. Cabe ressaltar que os fragmentos ósseos foram encontrados envolvidos por uma matriz argilosa com presença de clastos e grãos de quartzo pobremente selecionados; sendo erosivo o contato entre essa camada e a inferior. O tipo de material sedimentar e o aspecto de deposição do conjunto fóssil, junto a análise tafonômica (ARAÚJO-JÚNIOR *et al.*,

2013a), evidencia o transporte rápido e de elevada energia associado ao papel das enxurradas ou *flash floods* a partir do escoamento superficial concentrado (chuvas torrenciais).

Figura 97 - Camada fossilífera na porção superior do depósito de tanque no Jirau 01. A escala está posicionada no contato entre o conjunto de material fóssil e a parede lateral saprolitizada em posição vertical. Foto: Felipe Waldherr, Dez./2021.



A escavação da cacimba também expôs um aspecto interessante evidenciado no contato entre o depósito e o conjunto de lascas de descamação (*sheet structure*), em estado saprolítico, que delimita o material sedimentar. As lascas de descamação constituem estruturas rúpteis do embasamento granítico e que no interior do tanque permanecem verticalizadas (Figura 98). Na parede lateral, ainda há resquícios de lascas que desprenderam e contribuíram para o próprio preenchimento do depósito de tanque.

Figura 98 - Presença de lascas de descamação verticalizadas em estado saprolítico, posicionadas de modo paralelo, que delimita o registro sedimentar no interior do tanque natural. A escala está posicionada no contato da parede lateral, conformada pela rocha granítica (Leucogranito Penedos), e as lascas de descamação saprolitizadas. Foto: Felipe Waldherr, Dez./2021.



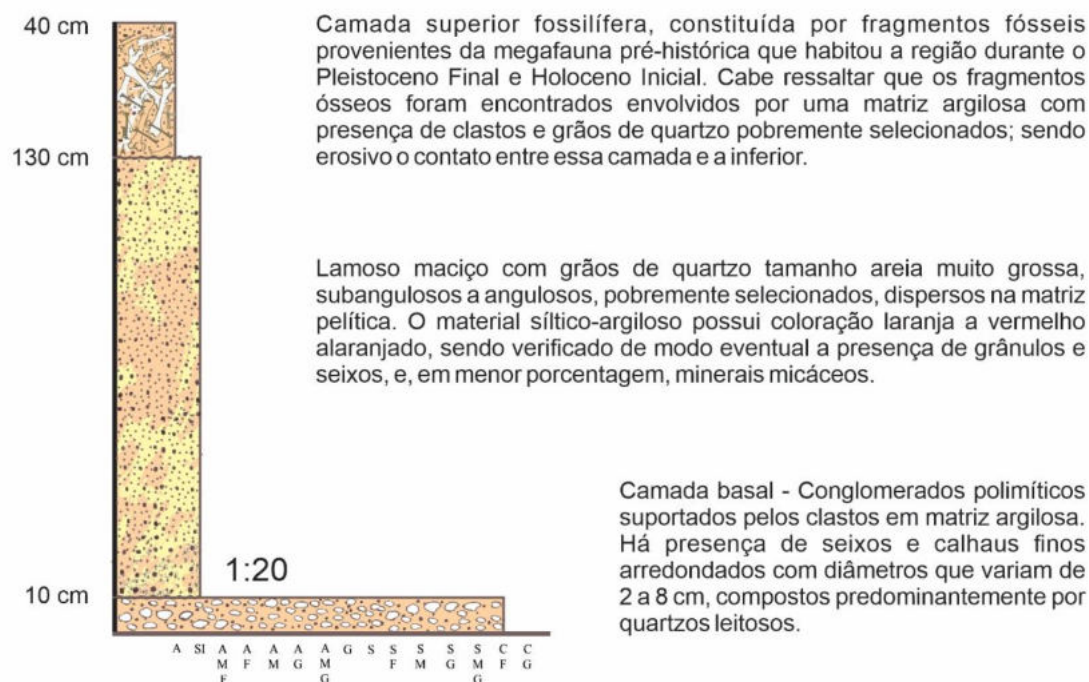
A análise do perfil estratigráfico, junto a descrição sedimentológica, do depósito de tanque indica uma série de eventos em relação a dinâmica paleoambiental durante o Quaternário. O primeiro ponto a levar em consideração é a conversão do tanque natural em um eixo preferencial para coalescência de fluxos do escoamento superficial e, conseqüentemente, do aporte de sedimentos. Outra observação reside na ocorrência do pacote sedimentar alóctone (depósito de tanque) no interior do tanque natural que sugere a formação prévia de um espaço de acomodação. O espaço de acomodação é decorrente da remoção através de processos erosivos do material inconsolidado *in situ*, denominado "*grus*", que anteriormente preenchia o interior do tanque natural. O *grus* corresponde ao material granítico alterado e não mobilizado, corresponde na literatura geomorfológica a "*arena in situ*", sendo bastante vulnerável a remoção e ao transporte através da erosão fluvial e pluvial.

Nesse contexto, a análise sobre o desenvolvimento do depósito de tanque não descarta a ideia que processos deposicionais e erosivos anteriores possam ter ocorrido até

a colmatação do tanque natural. Não há evidência que suporte unicamente um ciclo restrito de erosão/deposição após a remoção do *grus*. No entanto, a elaboração de um perfil sedimentográfico do depósito de tanque permite encaminhar alguns apontamentos sobre a possível sequência evolutiva na conformação do tanque natural fossilífero.

Assim, uma vez estabelecido a condição de depocentro em escala reduzida, o tanque natural começou a ser preenchido por sedimentos pleistocênicos. A camada de conglomerado com elevado grau de arredondamento dos clastos que corresponde a porção basal do depósito de tanque sugere um transporte de longa distância, remobilizados a partir de enxurradas que seguiam os principais eixos de drenagem e afluentes (rio Cruxati e riacho Sororó) no entorno do sítio paleontológico. O registro sedimentar indica uma condição paleoambiental distinta, sugerindo uma drenagem volumosa com maior energia e capacidade de transporte, diferente da atual que é caracterizada como drenagem intermitente. A camada sedimentar sobreposta, constituída por um material inconsolidado (depósito colúvio-aluvial), remete a fluxos de escoamento superficial concentrados, típico de chuvas torrenciais em ambientes do semiárido. O conjunto de chuvas torrenciais seria o responsável por carrear os sedimentos oriundos das áreas adjacentes, no dismantelamento de mantos intempéricos, e o desprendimento de lascas de descamação da parede lateral para o interior do tanque. No topo do depósito de tanque encontra-se a camada fossilífera, constituída por fragmentos ósseos oriundos da megafauna pré-histórica (Figura 99). Os estudos tafonômicos junto a análise da matriz sedimentar, apontaram um transporte rápido a partir de enxurradas que carrearam os fragmentos ósseos para o interior do tanque natural. Cabe ressaltar a característica caótica que expressa a camada fossilífera, sugerindo a mistura temporal e, de certo modo, uma baixa capacidade de deslocamento dos fragmentos fósseis em zonas específicas do tanque em virtude do estreitamento de fundo e do espaçamento cedido pelas ombreiras graníticas que delimitam a feição geomorfológica.

Figura 99 - Perfil sedimentográfico do depósito de tanque no Jirau 01. Elaborado por: Felipe Waldherr, Jan./2023.



A presença de fósseis de megamamíferos (mamíferos com peso acima de 1.000 kg) e grandes mamíferos (acima de 44kg) preservados no depósito de tanque constitui uma forte evidência de um antigo mosaico de vegetação composto por campos abertos, savanas e florestas na caatinga, assim como de maior ou menor quantidade de cursos de água durante o Pleistoceno e Holoceno. E, em vista disso, os registros paleontológicos que se encontram resguardados nos tanques naturais constituem áreas relevantes no que se refere as informações sobre a atuação de paleoclimas que podem ter viabilizado condições ambientais apropriadas ao desenvolvimento desse amplo conjunto faunístico pré-histórico.

Os depósitos de tanque preservam informações que podem auxiliar na interpretação da dinâmica paleoambiental local durante o Quaternário. O tanque natural fossilífero Jirau 01, área de referência no Sítio Paleontológico Jirau, resguarda em seu interior um relevante material de investigação no âmbito geocientífico. A importância do registro sedimentar reside no recorte preservado do quadro paleopaisagístico, um perfil constituído por sedimentos alóctones, culminando na camada fossilífera tida do Pleistoceno final - Holoceno inicial. A análise das camadas que constituem o depósito de tanque, junto a interpretação estratigráfica, sedimentológica e tafonômica, permite

elaborar apontamentos iniciais sobre as condições ambientais e os processos erosivos e deposicionais envolvidos no preenchimento do tanque natural Jirau 01. O levantamento sistemático em relação aos depósitos de tanque no Sítio Paleontológico Jirau, além de fornecer novos dados sobre a dinâmica paleoambiental local, visando demonstrar distintos pulsos erosivos/deposicionais e condições de domínios morfoclimáticos de acordo com a distribuição geográfica dos tanques, constitui sobretudo em um importante capítulo sobre a Geomorfologia do Quaternário, em especial no que se refere ao semiárido de Itapipoca.

5.1.5 Modelo hipotético da sequência evolutiva do tanque natural Jirau 01

Baseando-se no conjunto de informações coletadas em trabalho de campo no sítio paleontológico e nos aspectos morfológicos da porção interna do tanque, conferindo maior atenção as anotações referentes controle estrutural, foi organizado de modo incipiente uma sequência evolutiva para o tanque natural Jirau 01. A sequência de esquetes consiste na representação da feição geomorfológica através do bloco-diagrama¹⁹, dispoendo em tese as distintas etapas de desenvolvimento da depressão natural em ordem cronológica. A diversidade de formas e estruturas menores do relevo atribuídas ao processo de intemperismo químico-físico, vinculadas à teoria de etchplanação, que compõe o cenário paisagístico da área de investigação, consiste em um fator importante que sugere o contexto geomorfológico o qual o tanque natural foi concebido e, posteriormente, integrado ao conjunto de formas menores do relevo granítico.

Uma vez definido a preparo da sequência evolutiva no bloco-diagrama, a etapa seguinte foi identificar em detalhe as estruturas secundárias ou tardias que se apresentam de modo evidente sobre os afloramentos graníticos. Nesse contexto, a utilização de imagens de sobrevoo de RPA tornou-se fundamental, ao expor em planta a extensão dos principais lineamentos estruturais que balizam e conformam as feições que constituem o tanque natural e entorno. A obtenção dos lineamentos estruturais a partir dos modelos de relevo sombreados foram de fundamental importância ao ajudar a compor parte do sistema de estruturas rúpteis não visíveis em registros fotográficos obtidos por RPA.

¹⁹ No bloco-diagrama, a sequência evolutiva do tanque natural Jirau 01 é apresentado cada fase evolutiva em ordem cronológica, sendo igualmente acompanhado de um texto explicativo. No final do presente subitem, o conjunto de bloco-diagrama é disponibilizado em formato A4 com as legendas para uma melhor visualização das figuras (Anexo K).

Outra etapa importante a considerar na sequência do bloco-diagrama é a interpretação sobre a dinâmica associada ao esvaziamento e preenchimento sedimentar do tanque natural ao longo do tempo geológico. O registro estratigráfico e sedimentológico consiste em um importante marco temporal, provendo uma série de informações sobre eventos erosivos e deposicionais que sucederam na conformação do depósito de tanque. A avaliação da morfologia do fundo de tanque e o contato entre as camadas sedimentares e o embasamento granítico, em especial a evidência de lascas de descamação verticalizadas e em estado saprolítico corroboram com a importância do controle estrutural no reafeiçoamento e aprofundamento a longo prazo do tanque natural.

O conjunto de bloco-diagrama é composto por nove momentos que representam de modo hipotético a representação do contexto geológico-geomorfológico e dos condicionantes geoambientais, principalmente o controle estrutural, responsável pela origem e o desenvolvimento do tanque natural Jirau 01 (Anexo L). É importante destacar que os esquetes foram elaborados a partir de dados primários de campo e, posteriormente, de mosaicos de imagens de sobrevoos obtidas por RPA, junto aos modelos digitais de elevação e a extração de lineamentos, em *software* de Sistema de Informação Geográfica.

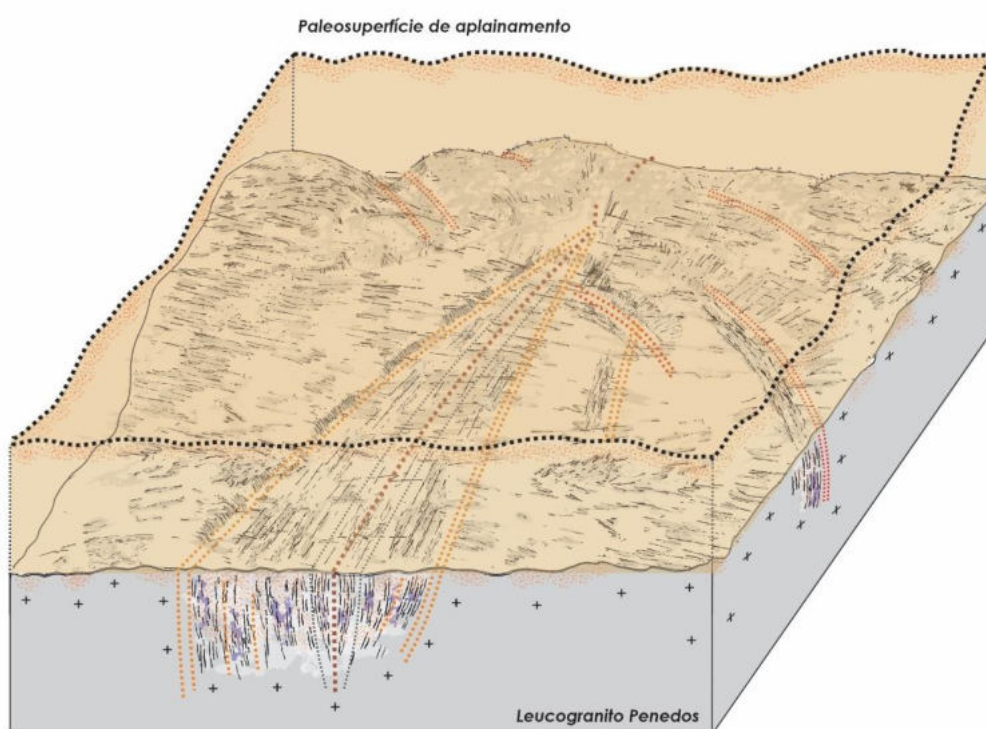
5.1.5.1 Quadros explicativos do bloco-diagrama do tanque natural Jirau 01

A figura 100 corresponde ao momento que o embasamento granítico (Leucogranito Penedos) se encontra recoberto por um espesso manto regolítico. Embora o manto regolítico corresponda a paleosuperfície de aplainamento e a um distinto período do tempo geológico, é interessante refletir sobre a possibilidade da existência de irregularidades topográficas o qual corresponderia as zonas e/ou setores de debilidade no substrato rochoso. A conformação da paisagem no ambiente subaéreo estaria vinculada ao intemperismo diferencial, evidenciando áreas de rugosidades e de confluência (concentração) do escoamento superficial e subsuperficial.

A cobertura igualmente proveria de modo simultâneo duas frentes intemperismo, mas com pulsos de atuação diferenciada. A primeira frente de intemperismo é atribuída próximo a camada superficial, enquanto a segunda atua em condições subedáficas, diretamente sobre o embasamento granítico. De modo geral, a frente de intemperismo tende a atuar com maior eficiência sobre o conjunto de estruturas secundárias ou tardias, no caso, os sistemas de fraturas conjugadas e as juntas que delimitam o tanque natural Jirau 01. A concentração e o espaçamento entre as fraturas condicionaram uma ampla

zona de debilidade. Esse momento evolutivo apresenta igualmente o estabelecimento de zonas vadasas entre as fraturas (*sheet structure*) e o eixo principal do tanque. O mantimento de áreas vadasas e úmidas em contato direto com a rocha e, em especial as zonas de debilidade, tende a acentuar o processo de corrosão química e a desintegração dos minerais que constituem o substrato granítico.

Figura 100 - Momento 01: representação do manto regolítico que recobria a atual área do Sítio Paleontológico Jirau e da atuação incipiente da frente de intemperismo sobre o sistema de fraturas conjugadas e juntas que delimitam e conformam o tanque natural. Elaborado por: Felipe Waldherr, Jan./2023.

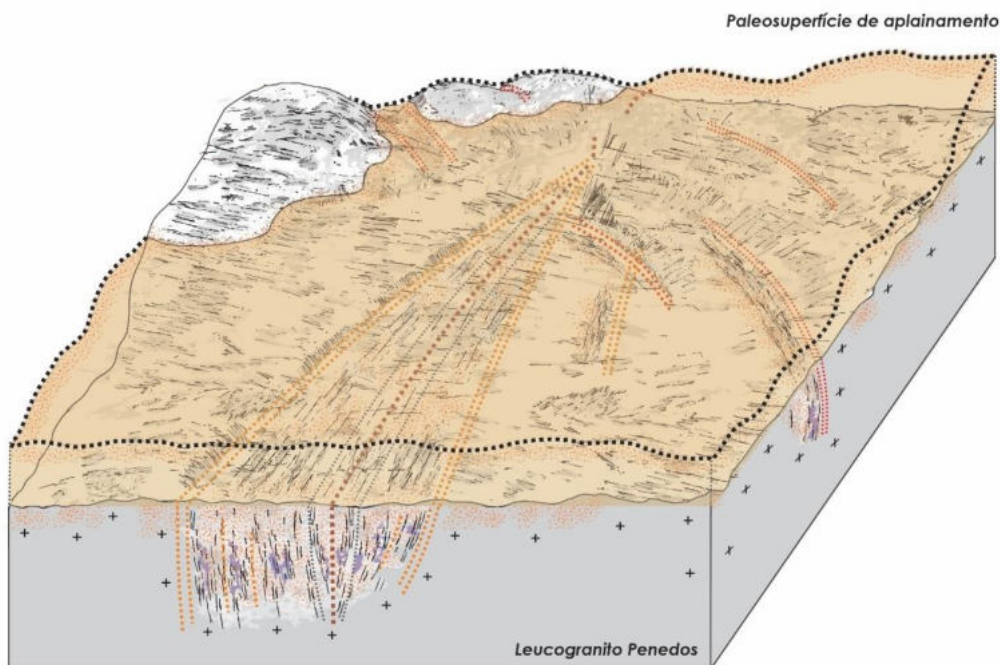


>>> BLOCO DIAGRAMA - LEGENDA:

- | | | | |
|--|---|--|--|
| | Eixo central do tanque natural Jirau 01 | | Zona de arena ou grus |
| | Sistema de fraturas conjugadas | | Estabelecimento de zonas vadasas |
| | Concentração de fraturas (<i>sheet structure</i>) | | Afloramentos rochosos |
| | Sistema de fraturas oblíquas | | Material intemperizado <i>in situ</i> |
| | Primeira frente de intemperismo | | Sedimento transportado |
| | Segunda frente de intemperismo | | Detritos (<i>lascas de descamação</i>) |

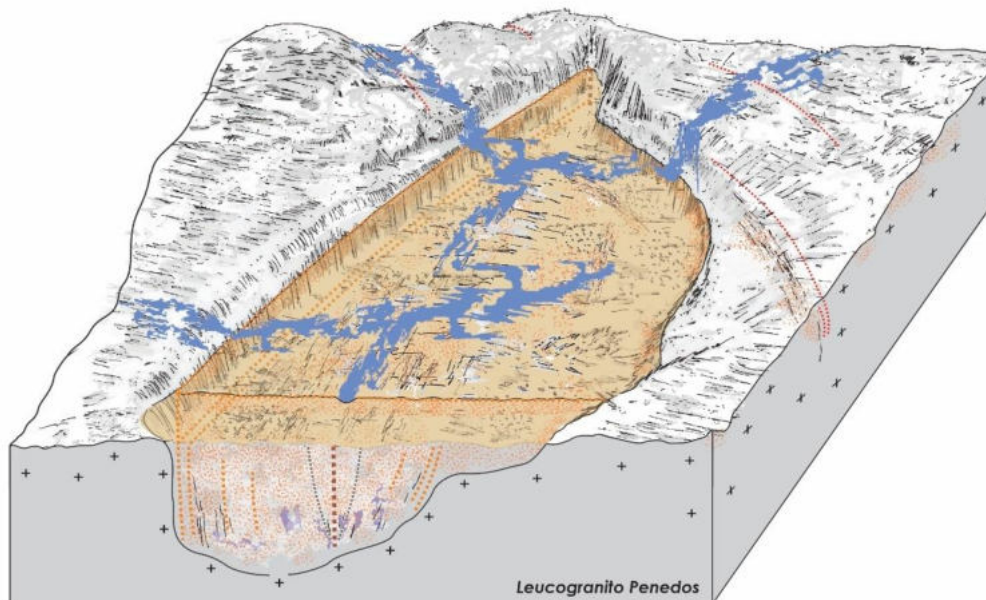
A figura 101 consiste no momento de remoção da cobertura regolítica e, assim, no dismantelamento da paleosuperfície aplainada, com a exposição episódica do embasamento granítico. Os sistemas de fraturas e juntas tendem a rearranjar a distribuição de formas do relevo, as áreas que apresentam menor ocorrência de estruturas secundárias tendem a formar núcleos maciços que se sobressaem no conjunto paisagístico. O entendimento do controle estrutural reflete igualmente em subsuperfície, por exemplo, os núcleos expostos tendem a atuar como dispersores de escoamento superficial, redistribuindo para as áreas de convergência de fluxos. Desse modo, a redistribuição do escoamento superficial é conduzida preferencialmente para as zonas topograficamente inferiores, promovendo a recarga sobre as zonas de debilidade da rocha em subsuperfície. A manutenção de zonas vadasas e bolsões de umidade em determinados pontos do substrato rochoso torna, assim, mais eficiente a atuação do processo de corrosão química e o reafeiçoamento de formas menores do relevo granítico em condições subedáficas. Na ilustração observa-se o aprofundamento significativo em relação ao eixo principal e as fraturas conjugadas (*sheet structure*), ambas em viés de saprolitização, transformando gradativamente as estruturas rúpteis em zonas de *arena* ou denominado simplesmente como *grus* (material intemperizado *in situ*).

Figura 101 - Momento 02: Exposição episódica de núcleos rochosos e atuação incisiva da frente de intemperismo sobre o sistema de fraturas conjugadas, transformando o conjunto de estruturas rúpteis em zonas de arena ou grus (material intemperizado *in situ*). Elaborado por: Felipe Waldherr, Jan./2023.



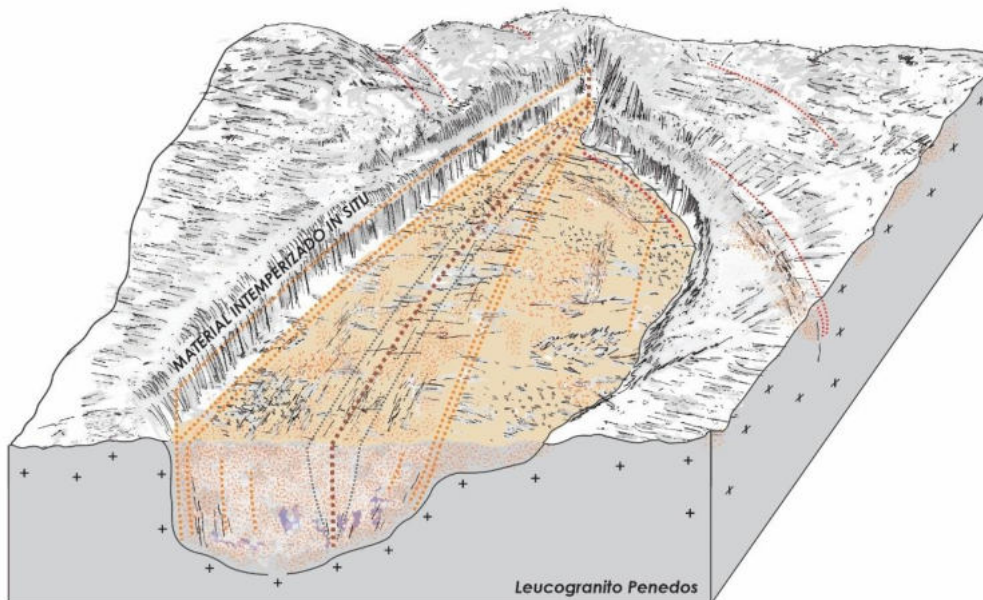
A figura 102 corresponde ao momento de exposição do tanque natural Jirau 01 e a remoção do material intemperizado *in situ* que preenchia o interior da depressão. A remoção e o transporte do material intemperizado *in situ* (zonas de *arena* ou *grus*) era então realizado a partir da ação do escoamento superficial estabelecido pela rede de drenagem. É importante destacar o reaproveitamento da rede drenagem sobre as zonas de debilidade do embasamento granítico, anteriormente recobertas pelo manto regolítico, e que ainda inferem atualmente, sobre a dinâmica da paisagem. Os sistemas de fraturas conjugadas e o eixo central do tanque natural encontram-se amplamente saprolitizados e compreendem autênticas zonas de *arena* ou *grus*. A remoção do material intemperizado através do escoamento superficial se mantém até alcançar o seu exutório.

Figura 102 - Momento 03: Exposição do tanque e a remoção de depósito sedimentar autóctone (material intemperizado in situ) a partir do escoamento superficial. Elaborado por: Felipe Waldherr, Jan./2023.



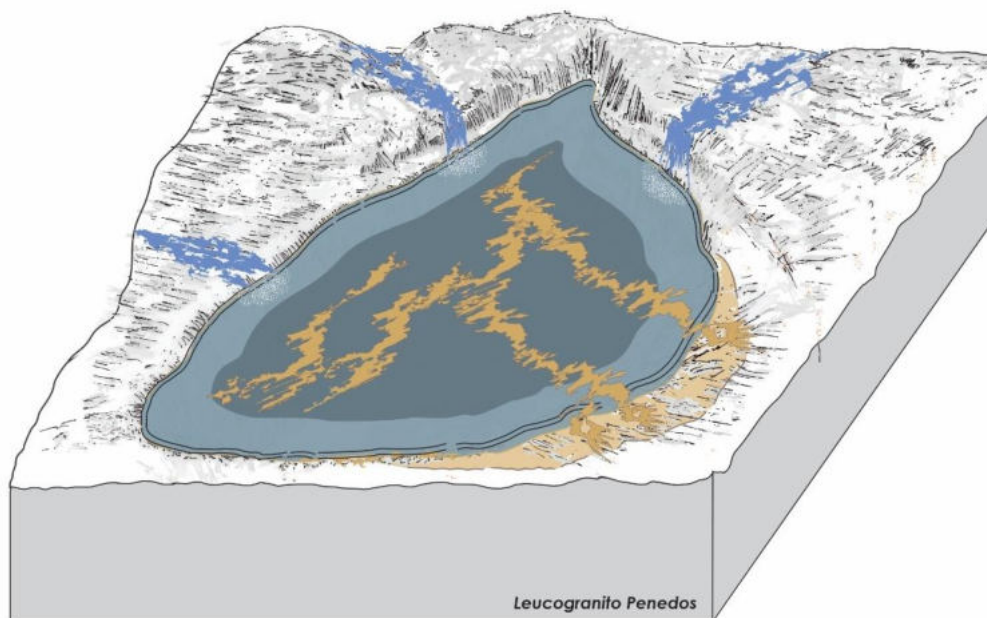
A figura 103 corresponde ao momento da remoção parcial do material intemperizado, expondo uma série de formas e estruturas menores do relevo granítico. A remoção e o transporte do material intemperizado (zonas de *arena* ou *grus*) é interrompido pela exumação do exutório, localizado a jusante do tanque natural, e que corresponde um nível de base local ao tanque. O processo de intemperismo segue atuando no interior do tanque em condições de subsuperfície, no entanto de modo mais restrito e pontual. A área anteriormente definida através da concentração de fraturas conjugadas e onde encontrava-se o eixo principal (lineamento estrutural WNW-ESE), já está totalmente modificada. A transformação física, química e mineralógica alterou o conjunto de estruturas rúpteis (secundárias ou tardias).

Figura 103 - Momento 04: A linha em laranja na parede do tanque indica a espessura que alcançava o depósito autóctone que foi removido do interior do tanque. Elaborado por: Felipe Waldherr, Jan./2023.



A figura 104 corresponde ao momento de transbordamento do tanque natural, resultante da confluência dos fluxos de escoamentos superficiais e, conseqüentemente, na remoção dos sedimentos finos. Além de revolver os sedimentos assentados sobre o fundo do tanque natural, a contínua entrada de fluxos d'água pode ter contribuído de modo a manter em suspensão os materiais intemperizados mais finos e, como efeito, remover parte desse material através do transbordamento.

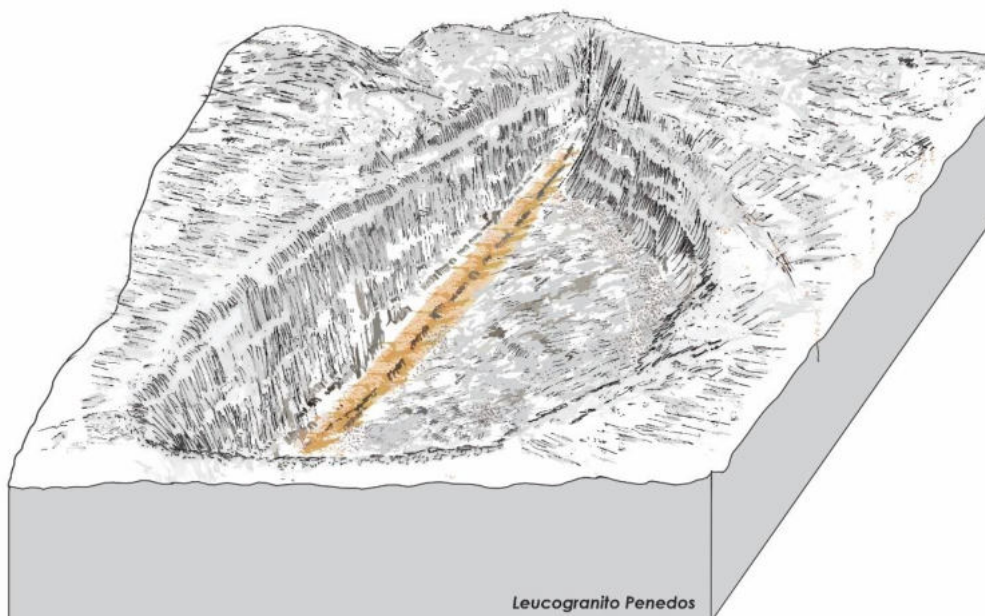
Figura 104 - Momento 05: fluxos d'água convergindo para o tanque e contribuindo para revolver os sedimentos de fundo, além de manter em suspensão os materiais mais finos. A remoção dos sedimentos mais finos seria através do transbordamento, representado pelas manchas na cor marrom claro saindo do interior do tanque. Elaborado por: Felipe Waldherr, Jan./2023.



A figura 105 refere-se ao momento da remoção de sedimentos finos em suspensão a partir da entrada de água por escoamento superficial no interior do tanque e, conseqüentemente, do seu transbordamento. Uma porção do material intemperizado permaneceu no fundo do tanque natural, mascarando irregularidades e desníveis ocasionados pela atuação da frente de intemperismo. A remoção da maior parte do depósito sedimentar de caráter autóctone resulta na formação de zonas de acomodação, ou seja, a disponibilidade de espaço de preenchimento no interior do tanque. É provável que a deposição da camada basal, formada por conglomerados polimíticos suportados pelos clastos em matriz argilosa de tonalidade esverdeada a cinza, principalmente no contato com o material saprolítico do embasamento cristalino, tenha ocorrido durante esse momento. É notório igualmente a exposição de formas e estruturas menores (*flared slopes, tafoni* e alvéolos), assim como texturas associadas a corrosão química (*pitting*), que ocorrem sobre as superfícies do tanque. Uma vez removido o material do contato solo-rocha (material intemperizado e o Leucogranito Penedos), compreende-se que há uma descontinuidade na atuação do intemperismo químico em áreas específicas,

sobretudo nas superfícies verticalizadas, por exemplo, nas paredes laterais do tanque natural. É possível indicar a atuação do intemperismo em condições subaéreas, por exemplo, o efeito de termoclastia sobre as paredes laterais, resultando no desprendimento / desagregação (mecanismo de *flaking*) de lascas de descamação em estado saprolítico (resquíio de processos vinculados a corrosão química), e na sua desintegração a partir da dinâmica restrita de transporte no interior do tanque natural.

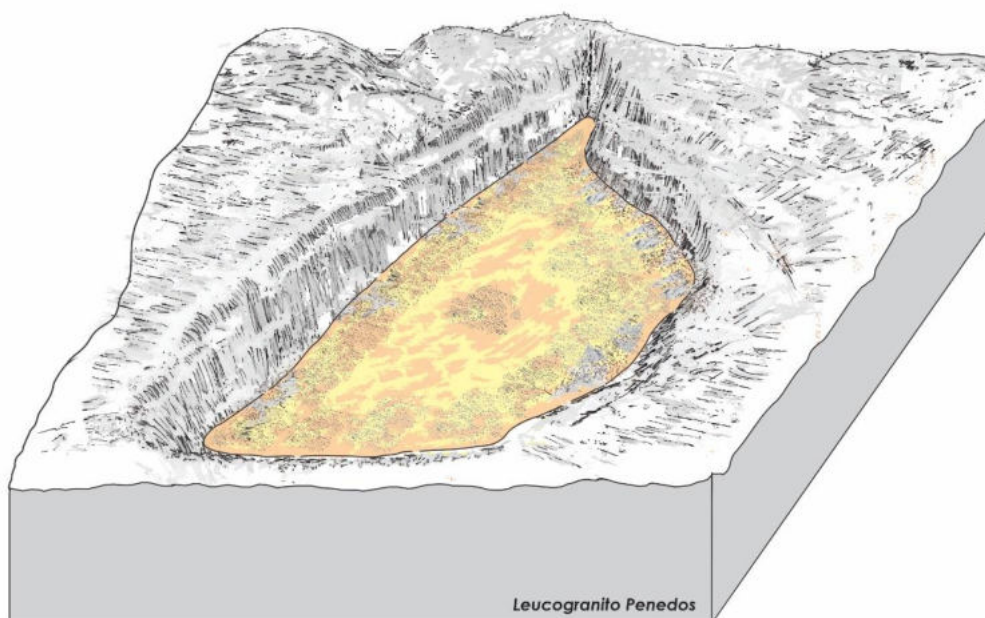
Figura 105 - Momento 06: Apresenta o fundo de tanque preenchido com o material intemperizado que não foi removido pelos sucessivos eventos de transbordamentos e o alargamento das paredes do tanque. Elaborado por: Felipe Waldherr, Jan./2023.



A figura 106 corresponde ao momento de preenchimento sedimentar sobre as zonas de acomodação do tanque natural. O novo aporte sedimentar seria carregado ao interior do tanque a partir do escoamento superficial, principalmente por enxurradas (*flash flood*). O escoamento superficial seria o responsável por transportar o material intemperizado de característica alóctone para o interior do tanque natural. O material intemperizado, carregado ao interior do tanque, corresponde ao depósito de tanque atual, sendo constituído por um sedimento lamoso maciço com grãos de quartzo tamanho (de fração) areia muito grossa, subangulosos a angulosos, pobremente selecionados, dispersos na matriz pelítica. As características indicam que o material síltico-argiloso poderia estar associado a

depósitos do tipo colúvio-aluvial. É possível notar também a continuidade do efeito de termoclastia, junto ao mecanismo de *flaking* (desagregação e desprendimento de lascas de descamação), resultando no acúmulo no interior do tanque de material detrítico no sopé das ombreiras graníticas e na desintegração de material intemperizado recém carregado e depositado no interior do tanque natural e que se encontrava no entorno do sítio paleontológico.

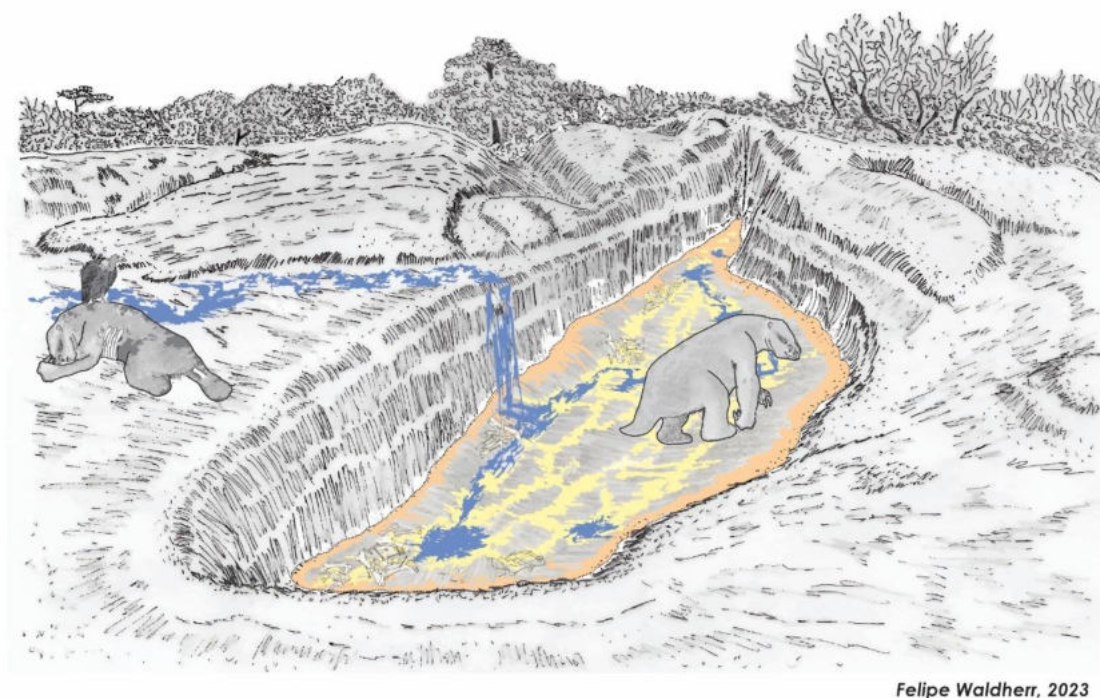
Figura 106 - Momento 07: Etapa de preenchimento do tanque natural a partir de escoamentos superficiais, principalmente do tipo enxurradas, que transportavam e depositavam no interior do tanque o material intemperizado do entorno do sítio paleontológico. Elaborado por: Felipe Waldherr, Jan./2023.



A figura 107 refere-se ao momento de formação da camada fossilífera no interior do tanque natural. A camada é constituída por fragmentos fósseis oriundos da megafauna pré-histórica que habitou a região durante o Pleistoceno-final e Holoceno Inicial. Os fragmentos ósseos foram encontrados envolvidos por uma matriz argilosa com presença de clastos e grãos de quartzo pobremente selecionados; sendo erosivo o contato entre essa camada e a inferior. O contato erosivo pode ser atribuído a condição de alta energia o qual os fluxos d'água em enxurradas adentravam o interior do tanque, revolvendo as camadas sedimentares do depósito de tanque. O tipo de material sedimentar e o aspecto

de deposição do conjunto fóssil, junto a análise tafonômica (ARAÚJO-JÚNIOR, 2012, 2015; ARAÚJO-JÚNIOR *et al.*, 2013a), evidencia o transporte rápido e de elevada energia associado ao papel de *flash floods* ou enxurradas, resultante de chuvas torrenciais. O escoamento superficial atuaria de modo a transportar e depositar, eventualmente, os fragmentos ósseos no interior do tanque natural. É aceito na literatura acadêmica que a maior parte do material fossilífero encontrado no depósito de tanque são de animais que haviam perecido nas proximidades da depressão. É importante destacar que a partir da deposição dos fragmentos ósseos da megafauna pré-histórica pode ser atribuída a denominação "tanque natural fossilífero Jirau 01", resultante da conformação entre o "tanque natural" e o "depósito de tanque fossilífero" (feição deposicional) e, até o momento, exclusivo do semiárido brasileiro.

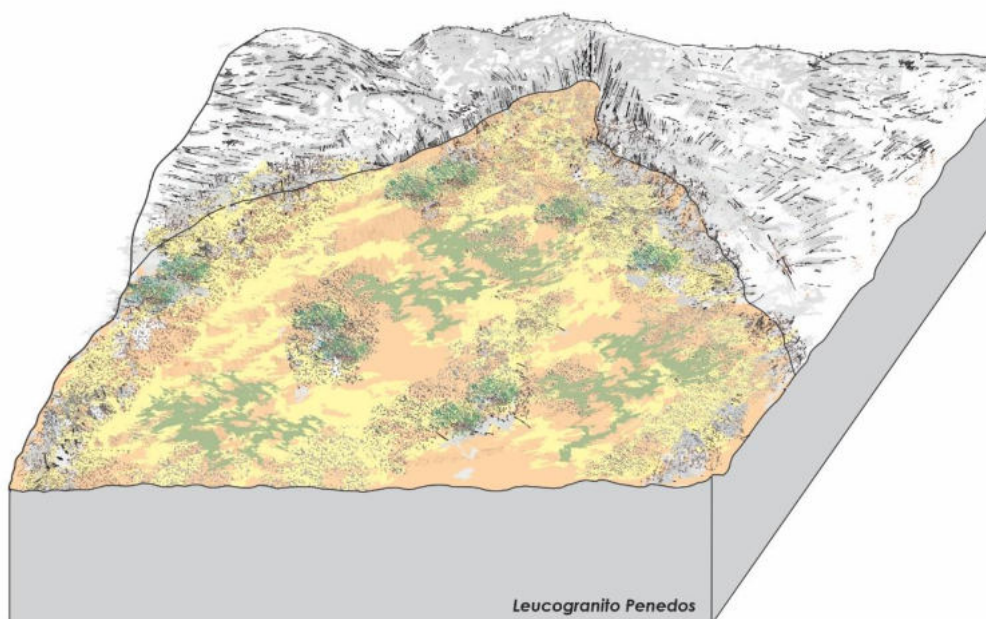
Figura 107 - Momento 08: Presença da megafauna pré-histórica de Itaipipoca. As ilustrações de preguiças gigantes (*Eremotherium laurillardii*) foram baseadas no trabalho de Jorge Blanco (2006). Elaborado por: Felipe Waldherr, Jan./2023.



A figura 108 corresponde ao momento de preenchimento generalizado do tanque natural fossilífero Jirau 01. A área do tanque natural converteu-se em uma ampla zona de sedimentação, ultrapassando o próprio nível de base local estabelecido pelo exutório. A

camada superior do depósito de tanque corresponderia aos sedimentos finos, com aproximadamente 1,5 m de espessura, composto por sedimentos argilosos e siltitos, com eventual ocorrência de seixos de quartzo e abundância de material orgânico. A sedimentação sobre o tanque natural e área de entorno, predominantemente alóctone, tenderia a mascarar as irregularidades das formas do relevo granítico. Em imagens fotográficas da década de 60, há registro de vegetação arbustiva e arbórea, inclusive de grande porte, sobre o depósito de tanque no interior da depressão natural. Infelizmente, a maior parte do material sedimentar referente a camada superior foi desentulhada para a abertura de cacimbas (poços) no intuito de armazenar água em períodos de estiagem e, conseqüentemente, o conjunto de dados e informações que poderiam provir da análise estratigráfica da camada sedimentar foram descartadas e/ou eliminadas.

Figura 108 - Momento 09: Tanque natural fossilífero totalmente preenchido, convertendo-se em uma ampla zona de sedimentação (alóctone). Elaborado por: Felipe Waldherr, Jan./2023.



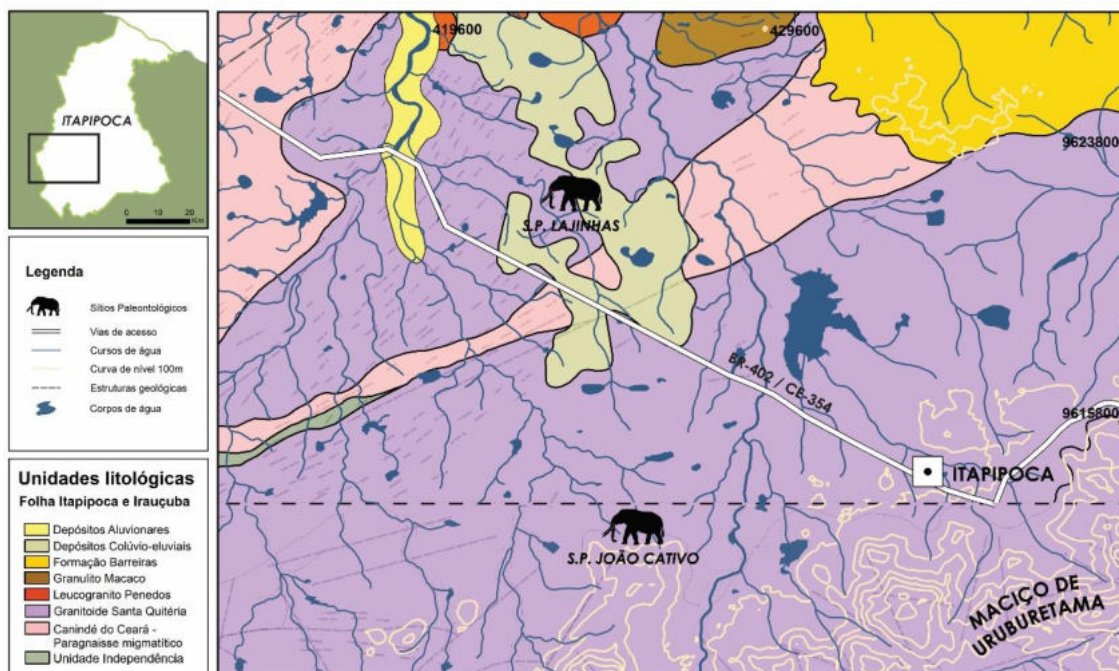
5.2 Os sítios paleontológicos Lajinhas e João Cativo

No presente subitem é apresentado os sítios paleontológicos Lajinhas e João Cativo e os tanques de referência, respectivamente Criminoso e João Cativo 02, para exemplificar o conjunto de condicionantes geoambientais que em tese viabilizaram o desenvolvimento dessas depressões naturais no município de Itapipoca. A apresentação conjunta desses dois tanques naturais a partir de um subitem é dada principalmente pelo contexto geológico, pois encontram-se sobre a mesma unidade litológica Granitoide Santa Quitéria e, na maior parte das vezes, apresentam semelhanças em relação ao controle estrutural no que se refere à disposição das formas menores do relevo granítico. Cabe destacar que ambos os tanques naturais foram totalmente desentulhados, impedindo a elaboração de uma sequência evolutiva, no que se refere aos eventos paleoambientais a partir da análise de sedimentos nos depósitos de tanque no período após a exposição.

5.2.1 Contexto geológico-geomorfológico dos sítios paleontológicos

De acordo com o mapeamento geológico, em escala 1:100.000, elaborado pelo CPRM (BRAGA; GOMES, 2018), os sítios paleontológicos Lajinhas e João Cativo encontram-se localizados sobre a unidade litológica Granitoide Santa Quitéria (Figura 109), pertencente ao Complexo Tamboril-Santa Quitéria, de idade Criogênica-edicariano ($\cong 635$ Ma), de idade neoproterozoica. Segundo o mapeamento geológico, os tanques naturais ocorrem em áreas constituídas por mosaico de lajedos, na porção central do Vale da Megafauna Pré-histórica de Itapipoca, e intercalados em lineamentos de domos graníticos no sopé do Maciço de Uruburetama. Na porção central do Vale da Megafauna Pré-histórica de Itapipoca, o entorno da área dos tanques naturais é constituído pela ocorrência de depósitos coluviais e aluviais, enquanto que o entorno dos tanques naturais no sopé do maciço granítico é composto por bolsões arenosos de caráter aluvial em fundos de vale de canais de drenagem intermitentes. O conjunto da área é igualmente drenado pelo Rio Cruxatí e afluentes do Riacho Sororô.

Figura 109 - Mapa geológico da Folha Itapipoca e Irauçuba. **A** - Recorte do mapeamento geológico do município de Itapipoca; **B** - Localização dos sítios paleontológicos Lajinhas e João Cativo. Modificado de: BRAGA; GOMES (2018); NALETO (2016).



Segundo Braga; Gomes (2018), a unidade Granitoide Santa Quitéria é composta por corpos descontínuos de porte variado, sendo assimilada na paisagem a partir de exposições em lajedos e blocos, nas proximidades de Itapipoca. A unidade engloba hornblenda-biotita ortognaisses, biotita gnaisses, *augen gnaisses*, hornblenda-biotita gnaisses com granada. No geral são ortognaisses cinza a cinza com tons rosados, com baixo grau de alteração. As rochas contêm porfiroclastos orientados, comumente de K-feldspato, anedrais a subedrais, por vezes oclares, em média com 1-4 cm, envoltos em matriz de granulação fina (BRAGA; GOMES, 2018). Em relação as feições tectono-estruturais, Braga; Gomes (2018) expressam que as rochas que compõem o embasamento cristalino apresentam um arranjo estrutural assinalado por um *trend* principal NE-SW, que condiciona tanto a forma da Unidade Granitoide Santa Quitéria, quanto da Suíte Magmática Tardi a Pós (BRAGA; GOMES, 2018).

De acordo com a classificação geomorfológica do nordeste setentrional brasileiro, elaborado por Costa *et al.* (2020), as áreas de tanques naturais nos sítios paleontológicos Lajinhas e João Cativo encontram-se integralmente na "Superfície Sertaneja 1" (SS1). No entanto, é importante destacar que os tanques situados no Sítio Paleontológico Lajinhas estão situados sobre um extenso lajedo granítico na porção central do chamado Vale da

Megafauna Pré-histórica de Itapipoca, enquanto os tanques do Sítio Paleontológico João Cativo localizam-se intercalado em domos graníticos, em uma zona circunvizinha ao Maciço de Uruburetama. Os sítios paleontológicos e, conseqüentemente, a distribuição geográfica dos tanques naturais, encontram-se em ambientes de energia diferenciada, em especial ao tratar sobre a atuação de processos erosivos, de transporte e deposicionais.

Em síntese, a paisagem do Sítio Paleontológico Lajinhas é constituída por um extenso mosaico de lajedos graníticos, sendo caracterizado principalmente pela superfície aplainada e a ocorrência de numerosos tanques naturais. O sítio paleontológico pode ser dividido em duas áreas, a porção central e porção sul (Figura 110). Na porção central, o mosaico de lajedos cobre uma área de aproximadamente 185.600 m² (Figura 111) e se mantem nivelado em cotas altimétricas que alcançam os 90 metros, enquanto que na porção sul, o lajedo granítico distribui-se sobre uma área de 28.500 m² (Figura 112) e está nivelado em uma altitude de 110 metros. Os tanques naturais ocorrem de forma recorrente na paisagem, possuindo uma ampla diversidade de formas, principalmente em relação aos aspectos dimensionais. No entanto, é possível avaliar que os tanques naturais de maiores dimensões tendem a seguir o padrão proposto anteriormente denominado como *itaigara* ou Canoa de Pedra, conferindo a forma menor do relevo granítico, um aspecto alongado e estreito, balizado por ombreiras graníticas de modo contínuo, e com profundidades que variam entre 3 - 5 metros (Figura 113). O entorno do sítio paleontológico é recoberto por depósitos coluviais e aluviais.

Figura 110 - Imagem obtida por sobrevoo de RPA na porção central e sul do Sítio Paleontológico Lajinhas. Foto: Henrique Sampaio, Dez./2021.

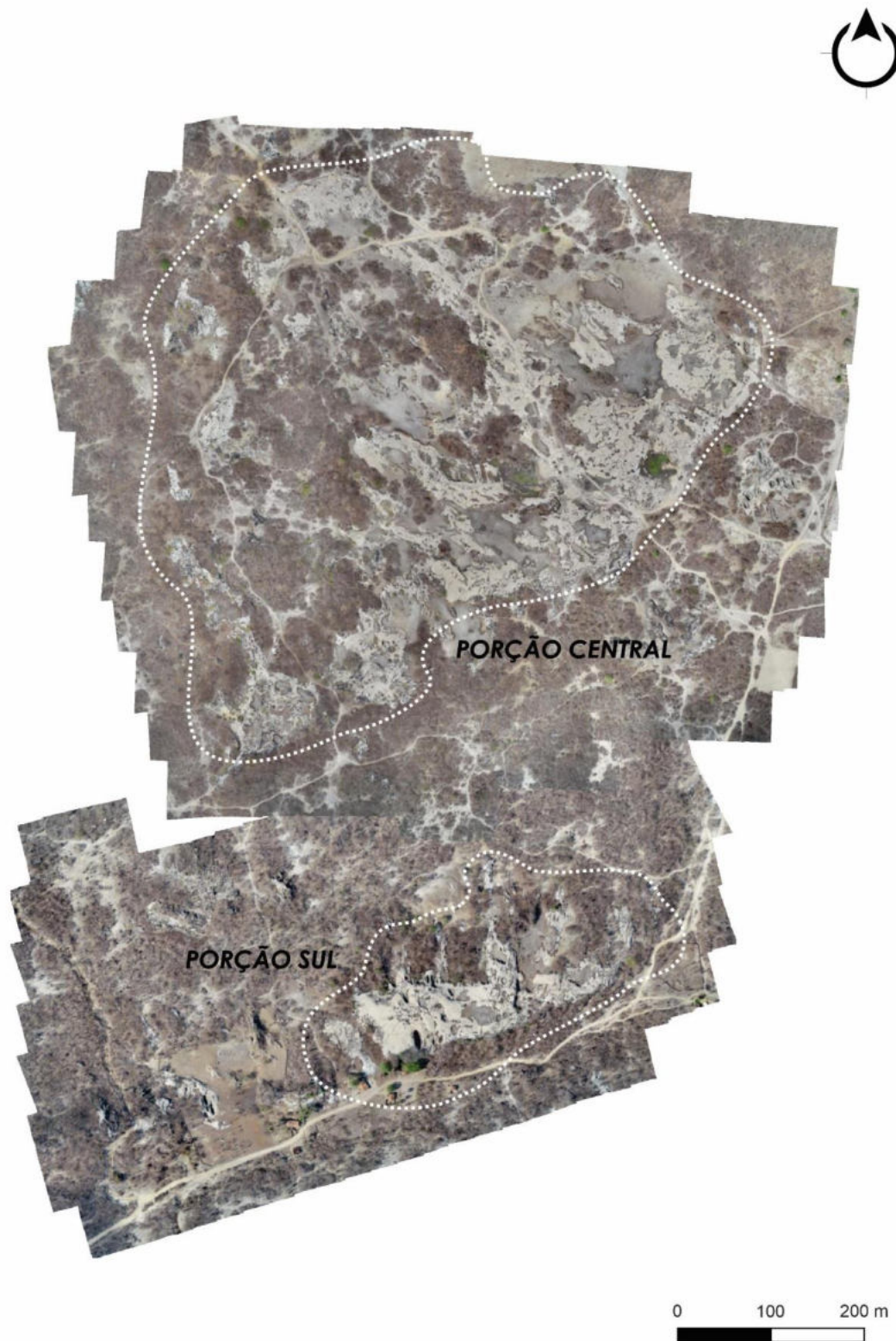


Figura 111 - Imagem obtida por sobrevoo de RPA na porção central do Sítio Paleontológico Lajinhas. O mosaico de lajedos graníticos encontra-se nivelado em uma altitude de 90 metros. Foto: Henrique Sampaio, Dez./2021.



Figura 112 - Imagem obtida por sobrevoo de RPA na porção sul do Sítio Paleontológico Lajinhas. É possível visualizar ao fundo, a barreira orográfica que corresponde ao Maciço de Uruburetama. Foto: Henrique Sampaio, Dez./2021.



Figura 113 - Ocorrência de tanques naturais do tipo Itaigara sobre os lajedos graníticos na porção central do Sítio Paleontológico Lajinhas. Foto: Henrique Sampaio, Dez./2021.



Ao seguir na direção sul, a continuidade do mosaico de lajedos que constituem a superfície aplainada (SS1) é interrompida pela presença do extenso maciço granítico de Uruburetama. A barreira orográfica alcança em seu ponto mais alto a 1.081 metros e constitui um importante retentor de massas de ar úmidas provenientes do Oceano Atlântico. Na paisagem é possível observar a ocorrência de "Formas Maiores", por exemplo, de maciços e domos graníticos, sendo representados, principalmente, na área de entorno do Maciço de Uruburetama, e das "Formas Menores" que correspondem aos matacões e *tors*, em especial a distribuição de depósito de tálus e o cenário recorrente de "*caos de blocos*". Nesse contexto geomorfológico, ao sopé do Maciço de Uruburetama, que está localizado o Sítio Paleontológico João Cativo.

A paisagem do Sítio Paleontológico João Cativo, área de ocorrência do tanque natural João Cativo 02, é constituída por lajedos e por um expressivo lineamento de domos graníticos, onde se encontra intercalado, na maior parte das vezes, os tanques naturais de maiores dimensões (Figuras 114 e 115). O conjunto de lajedos e domos graníticos cobrem uma área de aproximadamente 66.300 m² se mantem nivelado em cotas altimétricas que alcançam em média os 125 metros. Os tanques de maiores dimensões tendem igualmente a seguir a forma do tipo *Itaigara* ou *Canoa de Pedra*, atribuindo a feição geomorfológica, um aspecto alongado e estreito, limitado por ombreiras graníticas, e com profundidades que alcançam os 6 metros.

Figura 114 - Imagem obtida por sobrevoo de RPA no Sítio Paleontológico João Cativo. Foto: Henrique Sampaio, Dez./2021.

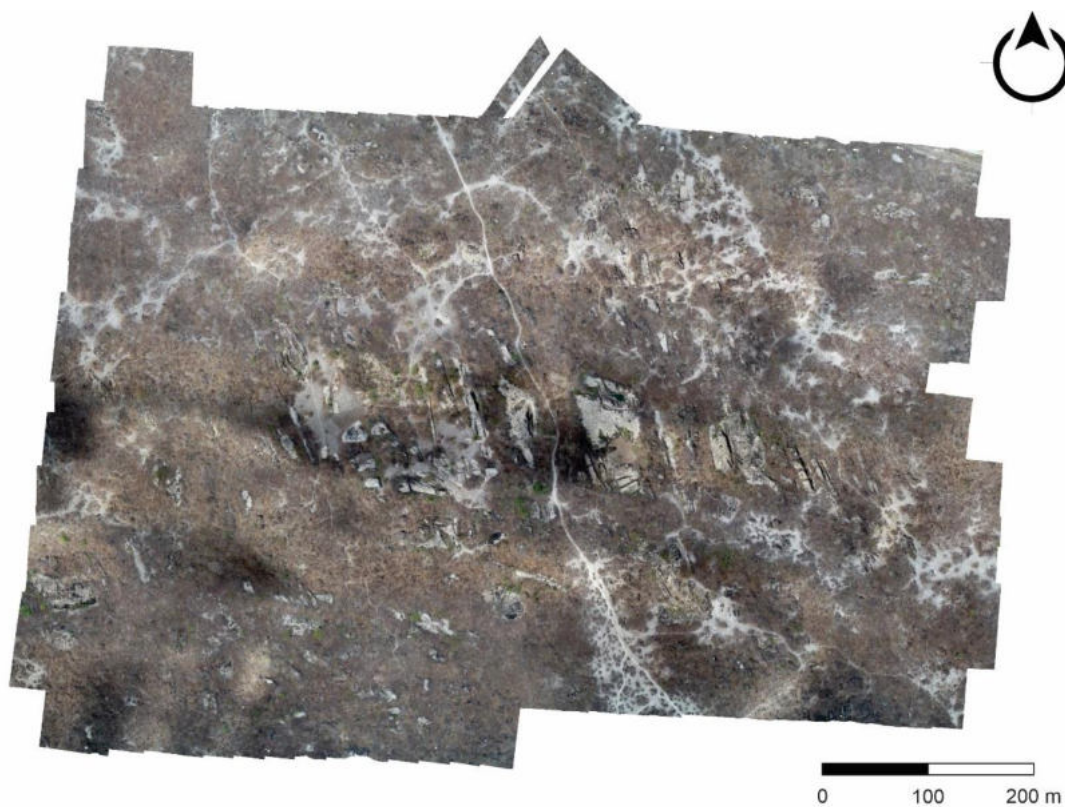


Figura 115 - Orientação dos lineamentos na área do Sítio Paleontológico João Cativo. Foto: Henrique Sampaio, Dez./2021.



5.3 Sítio Paleontológico Lajinhas

5.3.1 Os tanques naturais de Lajinhas e o tanque natural fossilífero Criminoso

Assim como foi mencionado anteriormente, os tanques naturais do sítio paleontológico Lajinhas ocorrem em afloramentos graníticos, em especial sobre o amplo mosaico de lajedos e, eventuais, domos que conformam a paisagem interiorana do município de Itapipoca. Encontram-se amplamente distribuídos em uma área localmente conhecida como Taboca-Lajinhas. Atualmente a localidade é reconhecida pela ocorrência de numerosos tanques naturais não escavados e tem sido convertida em um polo de pesquisas vinculada a investigação geomorfológica e paleontológica. O conjunto de tanques naturais do sítio paleontológico tem sido considerado como uma área de alto potencial fossilífero.

O Sítio Paleontológico Lajinhas situa-se aproximadamente 15 km a noroeste da sede do município de Itapipoca. O sítio paleontológico compreende centenas de depressões naturais com uma extensa diversidade entre os formatos de tanque. No entanto, a ocorrência de tanques com maiores dimensões se faz igualmente presente sobre os lajedos e domos graníticos. É possível visualizar uma série de estruturas menores como *flared slopes* e, inclusive, *ventanas* (janelas) entre as depressões, ambas se encontram nas paredes laterais das ombreiras graníticas. O substrato rochoso é constituído pela unidade litológica Granitoide Santa Quitéria. Entre as principais depressões, destaca-se o tanque natural fossilífero Criminoso, localizado na porção sul (Figura 116). As coordenadas geográficas do tanque Criminoso ²⁰ são: 3°25'18.44"S e 39°41'39.37"O. Os principais pontos de acesso ao Sítio Paleontológico Lajinhas são por vias secundárias não pavimentadas através do Assentamento Taboca-Lajinhas. É importante destacar que as incursões a área devem ser realizadas sempre que possível com a devida permissão dos moradores.

²⁰ As coordenadas UTM do tanque natural Criminoso são: Zona 24M - 422880.12 m E / 9621757.16 m S.

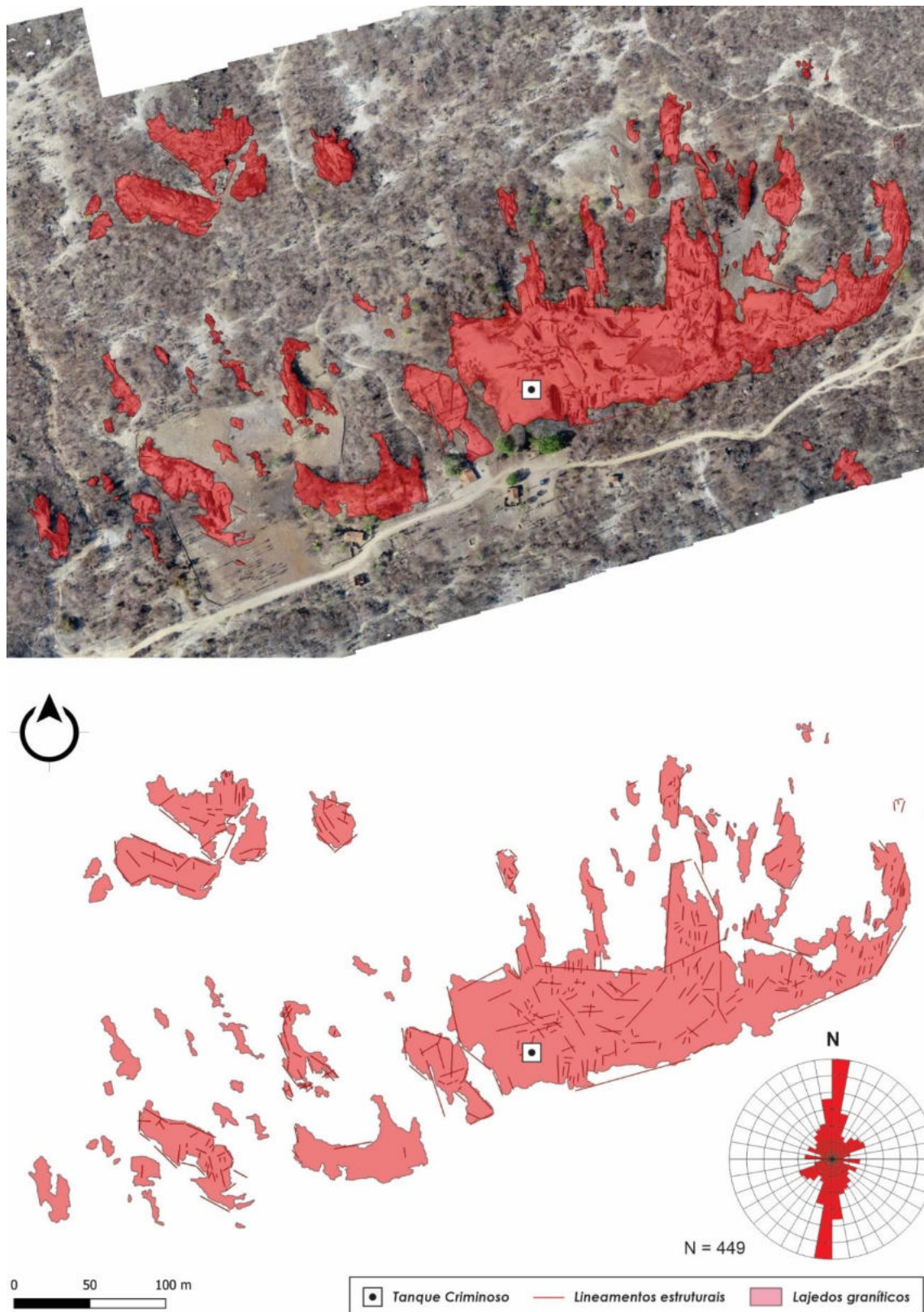
Figura 116 - Tanque natural fossilífero Criminoso, no Sítio Paleontológico Lajinhas. Foto: Henrique Sampaio, Dez./2021.



5.3.2 Distribuição dos lineamentos estruturais na porção sul do Sítio Paleontológico Lajinhas

A partir dos modelos de relevo sombreado foram compilados 449 lineamentos estruturais. O diagrama de rosáceas, resultante da somatória de frequência de orientação de lineamentos versus orientação, demonstrou que a área de estudo, e entorno, evidencia a orientação principal de lineamentos de direção N-S, com variação para NNE-SSW, indicando uma pequena diferença em relação aos lineamentos interpretados na imagem ótica (cor verdadeira) (Figura 117). A direção NNE-SSW reflete de maneira significativa a maior parte dos lineamentos observados tanto naqueles evidenciados na imagem ótica (cor verdadeira), quanto nos modelos de relevo sombreado. A direção também indica a orientação principal analisada nos lajedos graníticos delimitados.

Figura 117 - Disposição dos lineamentos estruturais sobre a área do tanque natural Criminoso e entorno. É possível visualizar a sobreposição entre os lineamentos e os afloramentos do Granitoide Santa Quitéria obtidos a partir da imagem óptica em cor natural.



5.3.3 Tanque natural Criminoso: aspectos morfológicos

Em análise de campo, foi observado inicialmente a disposição de estruturas rúpteis/dúcteis estabelecido sobre os lajedos graníticos que delimitam e conformam o tanque natural. Ao estabelecer que o conjunto de estruturas (fraturas conjugadas e sistema de juntas) constituem igualmente em zonas de debilidade no substrato rochoso, é pertinente reconhecer tais áreas como pontos preferenciais ao avanço da frente de intemperismo sob condições subedáficas. O resultado é a ocorrência de uma série de formas *etch* e estruturas menores do relevo que integram atualmente a parte interna da depressão natural. O alto grau de aprofundamento sugere a extensão do eixo principal (lineamento estrutural) no embasamento granítico e o espaçamento entre as fraturas conjugadas (*sheet structure*) o qual o tanque pôde se desenvolver ao longo do tempo. A presença de *flared slope* de modo pontual reflete sobre a ocorrência de fraturas posicionadas de forma oblíqua ao eixo principal, conformando as zonas de interseção de fraturas, gerando pontos de debilidade e o recuo pronunciado na parede lateral do tanque natural Criminoso.

O tanque natural Criminoso apresenta um desenvolvimento contínuo ao longo da disposição do eixo principal que atravessa o embasamento granítico. O lineamento principal apresenta direção NNW-SSE (N10W) com alto mergulho para ESE (ângulo de inclinação de 63°) e as ombreiras graníticas se prolongam em forma de arco até alcançar o nível de base local do tanque, o exutório (Figuras 118 e 119). Em análise de campo, as fraturas oblíquas e transversais não consistiam em estruturas visíveis no nível superior da depressão natural (à montante), no entanto, a continuidade destas juntas conforma, na porção inferior, o conjunto de septos graníticos - intercalados com *flared slopes* - que integram a morfologia interna do tanque. Os recuos e proeminências da parede lateral se tornam mais evidentes na zona de contato com o depósito de tanque (entulhamento antrópico).

O tanque natural Criminoso apresenta uma extensão de 25 metros de comprimento. A largura máxima entre as ombreiras é de 8 metros e a morfologia no que se refere à presença de formas *etch*, por exemplo, de *flared slope*, de textura do tipo *pitting* e mecanismo de *flaking* sobre as superfícies graníticas ocorrem amplamente na porção interna do tanque (Figuras 120 e 121). O fundo da depressão, embora mantenha um padrão côncavo e do tipo cunha, apresenta também distintos níveis de aprofundamento, alcançando os 11 metros de profundidade. Segundo a classificação para as distintas

formas de tanques naturais no semiárido nordestino, elaborada por Waldherr *et al.* (2017a), o tanque "Criminoso" pode ser classificado como um tanque natural escarpado de grandes dimensões e com morfologia de fundo do tipo côncavo e cunha.

É importante destacar que o controle estrutural corrobora com as análises de campo. Na área do tanque Criminoso, além da ocorrência de fraturas conjugadas em superfície no entorno dos tanques de pequeno a médio porte, o lineamento que corresponde ao eixo central do tanque Criminoso prolonga-se diretamente no lajedo, resultando no desenvolvimento de tanques naturais de maiores dimensões e que se encontram atualmente expostos de modo parcial (Figuras 122 e 123).

Figura 118 - Tanque natural fossilífero Criminoso, no Sítio Paleontológico Lajinhas. É possível visualizar a profundidade do tanque e a continuidade das ombreiras graníticas até o nível de base local do tanque (exutório). Foto: Ricardo Machado, Dez./2021.



Figura 119 - Ocorrência de *flared slope* nas paredes laterais das ombreiras graníticas no interior do tanque natural fossilífero Criminoso. Foto: Felipe Waldherr, Dez./2021.



Figura 120 - Lineamento estrutural que se prolonga pela parede do tanque em direção à montante do tanque natural Criminoso. Foto: Felipe Waldherr, Dez./2021.



Figura 121 - Ocorrência de textura do tipo *pitting* sobre as paredes laterais do tanque natural Criminoso. Em geral, o tipo de textura pode ser associado ao intemperismo químico e as formas *etch*. Foto: Felipe Waldherr, Jan./2020.



Figura 122 - A norte, no sentido contrário ao tanque Criminoso, é possível observar conjuntos de fraturas conjugadas de direção NNW-SSE sobre o lajedo. Foto: Felipe Waldherr, Jul./2019.



Figura 123 - O prolongamento do lineamento o qual conforma o tanque natural fossilífero Criminoso segue na direção norte e constitui outros tanques naturais sobre o lajedo granítico. Fonte: Felipe Waldherr, Jan./2020.



Uma observação interessante é disposição das estruturas secundárias ou tardias de direção NE-SW, conforme a foliação estabelecida pelo ortognaisse que constitui parte da unidade litológica Granitoide Santa Quitéria. De modo geral, os lineamentos estruturais NNW-SSE, tanto no setor norte quanto sul, definem os tanques naturais de maiores dimensões. No entanto, os lineamentos estruturais de direção NE-SW, tendem a restringir a continuidade dos tanques de grande porte ou, em outros casos, atuando como via ou eixo principal de interconexão entre os tanques de menor porte, configurando um aspecto lobulado as formas menores de relevo sobre o terreno granítico.

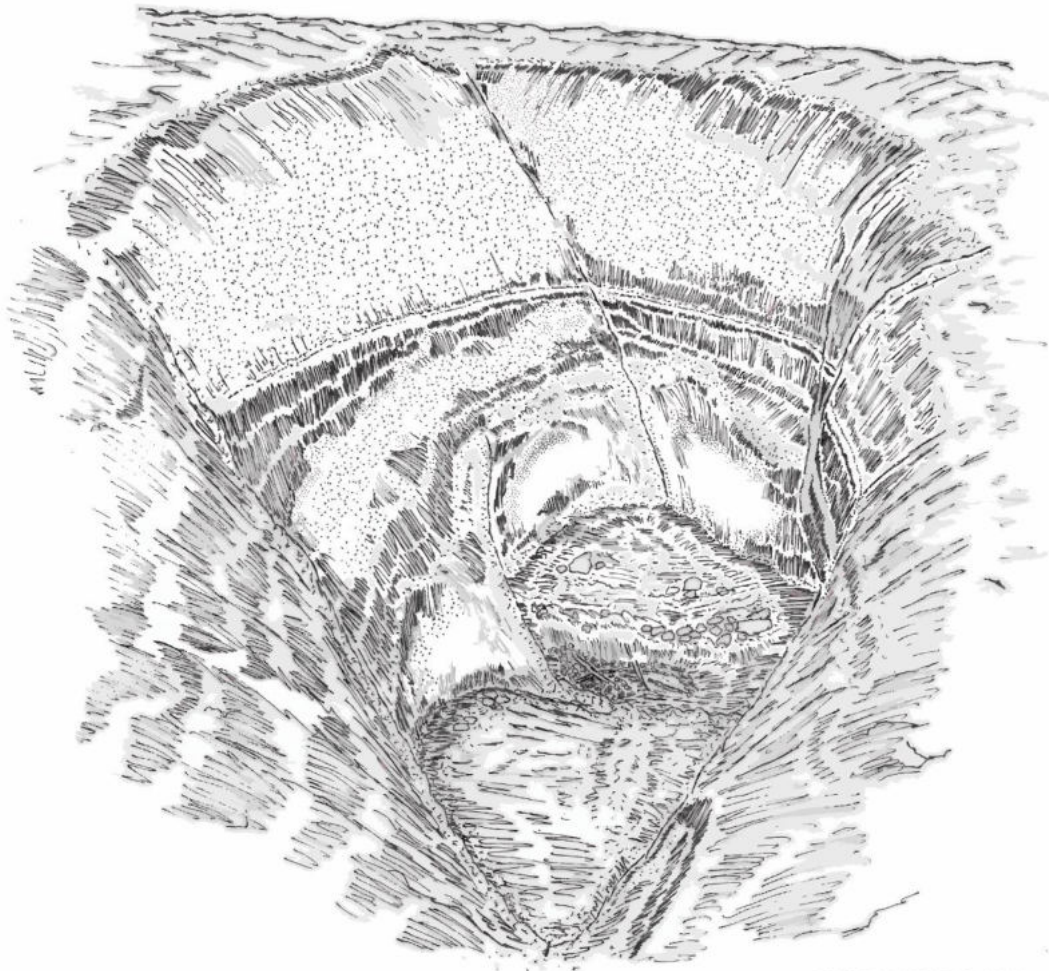
Os lineamentos estruturais de direção NE-SW conformam no interior do tanque Criminoso em áreas de interseção, formando na parede lateral os septos graníticos verticalizados. Já os septos graníticos que atuam como divisores de tanques naturais de menor porte ocorrem quando os lineamentos de direção NNW-SSE não conseguem romper a foliação estabelecida pelo ortognaisse de direção NE-SW, resultando nesse sobressalto ou microrelevo em relação aos tanques rasos. Tal fenômeno ocorre comumente em tanques naturais nos sítios paleontológicos Lajinhas e João Cativo.

5.3.4 Controle estrutural no desenvolvimento do tanque natural Criminoso

Após os trabalhos de campo, foi elaborado uma série de desenhos esquemáticos com o objetivo de evidenciar os principais condicionantes geoambientais, em especial o controle estrutural e litológico, que poderiam estar vinculados ao desenvolvimento do tanque natural Criminoso. Os esquemas apresentados pelas figuras 124 e 125 mostram a disposição dos lineamentos estruturais, no caso, o eixo central e o conjunto de sistema de fraturas (fraturas oblíquas e a possível área de interseção entre as fraturas) observados em campo e, posteriormente, analisados a partir do imagens de alta resolução obtidas pelo sobrevoo de RPA no Sítio Paleontológico Lajinhas e, conseqüentemente, do tanque natural Criminoso.

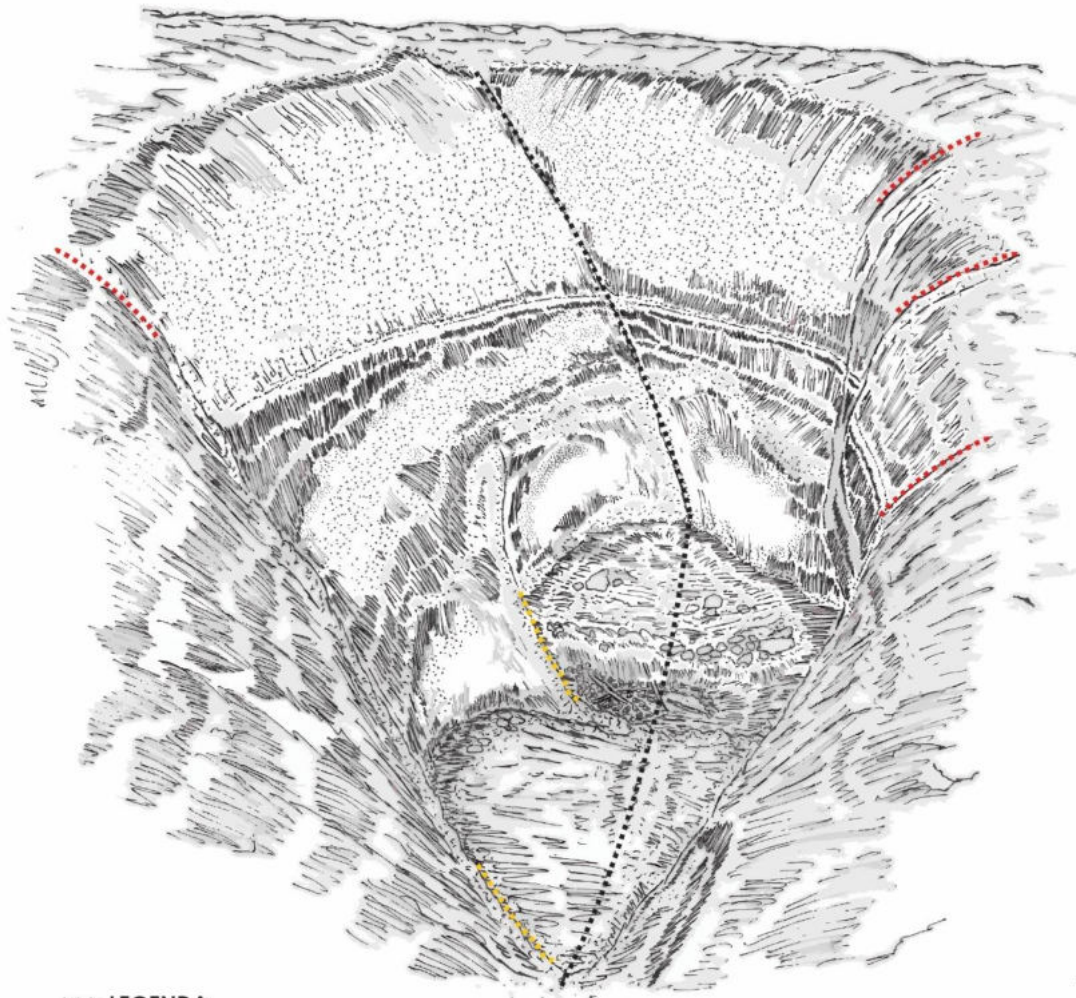
Os esquetes elaborados em nanquim (ponta 0.05) e editados em *software* CorelDraw 2020 seguem abaixo. O primeiro desenho esquemático (Figura 124) corresponde ao tanque natural Criminoso e a morfologia do interior da depressão, enquanto o segundo desenho (Figura 125) busca apresentar os principais lineamentos e, conseqüentemente, os condicionantes geoambientais, responsáveis pelo desenvolvimento do tanque natural em subsuperfície e, posteriormente, sua exposição em condições subaéreas.

Figura 124 - Desenho esquemático elaborado para o tanque natural Criminoso, expondo os principais aspectos morfológicos do interior da depressão. Visada para o norte. Elaborado por: Felipe Waldherr, Jan./2023.






FELIPE WALDHERR, 2023

Figura 125 - Desenho esquemático representando os principais lineamentos estruturais do tanque natural Criminoso. É possível visualizar o eixo principal e a disposição das fraturas oblíquas que configuram a morfologia de fundo do tanque. Visada para o norte. Elaborado por: Felipe Waldherr, Jan./2023.



>>> LEGENDA:

- | | | | |
|---|--|---|---------------------------------|
|  | Eixo central do tanque natural Criminoso |  | Afloramentos rochosos |
|  | Sistema de septos graníticos |  | Disposição de fraturas oblíquas |

5.4 Sítio Paleontológico João Cativo

5.4.1 Os tanques naturais de João Cativo e o tanque natural fossilífero João Cativo 02

Os tanques naturais de João Cativo integram um conjunto de formas menores do relevo que ocorrem em afloramentos graníticos, em especial domos e lajedos localizados no interior do município de Itapipoca (Figura 126). Os tanques naturais encontram-se distribuídos em uma área localmente conhecida como "João Cativo", no sopé do Maciço de Uruburetama e integrada à propriedade particular "Fazenda Carrapato". Atualmente a localidade é reconhecida como Sítio Paleontológico João Cativo, marco histórico de uma das mais importantes descobertas do século passado no que se refere ao avanço da Paleontologia em âmbito nacional e de pesquisas associadas ao Quaternário do Brasil e da América do Sul (XIMENES, 2003; XIMENES; SANTOS, 2011; ARAÚJO-JÚNIOR, 2013).

Além da beleza cênica, cabe destacar que a localidade de João Cativo ainda estimula uma série de discussões. Desde a origem e o desenvolvimento das feições geomorfológicas que resguardam os fósseis até a história de ocupação e dinâmica social do município. O levantamento, a longo prazo, junto ao investimento em pesquisas associadas ao Museu de Pré-história de Itapipoca (MUPHI) e instituições parceiras (UFRJ, UERJ e UFC), tem gerado dados e informações que enriquecem igualmente o debate em relação a geodiversidade, a identificação do geossítio e a geoconservação a partir dos valores atribuídos ao patrimônio geomorfológico de João Cativo.

Importantes contribuições científicas são registradas para a área a partir de 1952, em razão da quantidade de ossadas que foram encontradas a partir da escavação sobre depósitos de tanque para o armazenamento de água em períodos de estiagem (XIMENES; SANTOS, 2011). Segundo estes autores, no ano de 1953, o Museu Nacional, sediado no Rio de Janeiro, recebe uma carta de um cidadão de Itapipoca, o então jovem José Paurilo Barroso, informando o achado de grandes ossadas pré-históricas em um lajedado na localidade de João Cativo. Mas somente após oito anos, em janeiro de 1961, o Museu Nacional enviou a Itapipoca os paleontólogos, Prof. Carlos de Paula Couto e o Prof. Fausto Luiz de Souza Cunha, para uma campanha de campo de 44 dias.

Segundo Cunha (1961), a escavação resultou na coleta de 40 peças ósseas de grande porte e mais de 3.000 peças de pequeno porte. Cabe ressaltar que a partir da análise taxonômica elaborada por Paula Couto (1961) se obteve o primeiro registro de alguns

gêneros do Pleistoceno-Final na Região Semiárida do Nordeste do Brasil, p. ex., *Nothrotherium* (espécie de preguiça-gigante terrestre) e *Smilodon* (popularmente conhecido como tigre dentes-de-sabre). Posteriormente, Paula Couto (1980) identificou o total de 24 táxons, sendo 18 de mamíferos, 4 de répteis e 2 de aves. Deste modo, a confluência histórica e científica dos tanques de João Cativo pode ser analisada sob a esfera de debate do patrimônio natural, possibilitando uma discussão a partir da identificação de patrimônio geomorfológico, a conformação de um importante Geossítio e, conseqüentemente, das iniciativas que visam a sua Geoconservação. A abordagem sobre a Geoconservação tende a encaminhar uma série de discussões sobre iniciativas que visem o desenvolvimento socioeconômico local por meio do Turismo Sustentável, buscando alternativas e incentivos para conscientizar a importância deste patrimônio natural em relação a sociedade.

Figura 126 - Imagem obtida por sobrevoo de RPA no Sítio Paleontológico João Cativo, evidenciando a distribuição dos tanques naturais. O controle estrutural pode ser evidenciado pela orientação dos lineamentos. Foto: Henrique Sampaio, Dez./2021.



As temáticas que envolvem o contexto histórico dessa descoberta e do estudo deste patrimônio geomorfológico tornaram a área propensa a discussões sobre valoração, identidade e conservação de geossítios no Brasil. Em uma breve apresentação

historiográfica, é interessante mencionar que a origem do topônimo João Cativo se encontra vinculado ao regime escravocrata que perdurou desde o Período Colonial até o Império do Brasil (OLIVEIRA, 1971; XIMENES; SANTOS, 2011). Segundo tradições locais, João Cativo foi um senhor escravizado e desertor, que conseguiu evadir-se para uma área de difícil acesso e onde havia depressões (tanques naturais) que desempenharam importante papel como reservatórios de água durante os períodos de estiagem. Em curto intervalo de tempo, João Cativo converteu-se em líder e guia espiritual, estabelecendo ao sopé do Maciço de Uruburetama um Quilombo, reduto de resistência e de acolhimento aos companheiros que conseguiam escapar da então dominante elite escravocrata (OLIVEIRA, 1971).

O Sítio Paleontológico João Cativo situa-se a cerca de 10 km a oeste da sede do município de Itapipoca (CE). O sítio compreende o total de sete tanques naturais de grandes dimensões, entre outros menores, que ocorrem de modo intercalado entre os domos e lajedos graníticos, além de outras formas maiores e menores que constituem o relevo granítico na área, por exemplo, o Maciço de Uruburetama, os campos de blocos, os matacões e *tors*. Além de estruturas menores como *flared slopes* e favos de mel posicionadas nas laterais das ombreiras graníticas. O Sítio Paleontológico João Cativo é constituído pelo Granitoide Santa Quitéria, o qual se encontra o tanque natural fossilífero João Cativo 02, alvo de investigação do presente subitem, possuindo uma área aproximada de 66.300 m² e o conjunto de superfícies aplainadas de topo dos domos graníticos se mantém nivelada em uma altitude de 130 metros. As coordenadas geográficas do tanque João Cativo 02 ²¹ são 3°30'16.74"S e 39°40'28.00"O. Os principais pontos de acesso ao Sítio Paleontológico João Cativo são por vias secundárias não pavimentadas na propriedade particular Fazenda Carrapato. As incursões ao sítio paleontológico devem ser realizadas com a autorização do proprietário.

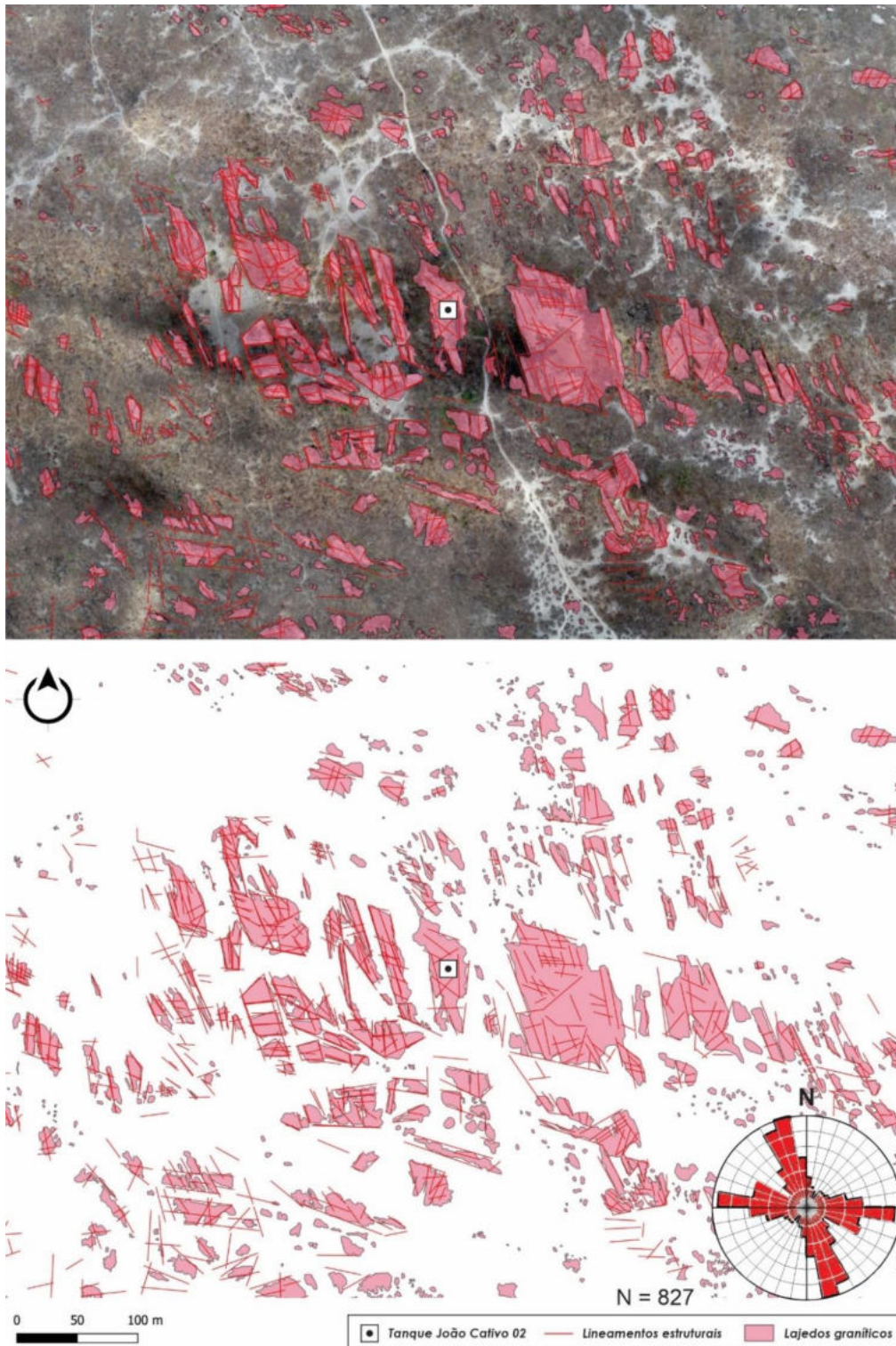
5.4.2 Distribuição dos lineamentos no Sítio Paleontológico João Cativo

A partir dos modelos de relevo sombreado foram compilados 827 lineamentos estruturais. O diagrama de rosáceas, resultante da somatória de frequência de orientação de lineamentos versus orientação, demonstrou que a área de estudo, e entorno, evidencia duas orientações principais de lineamentos, as direções NNW-SSE e W-E, indicando uma pequena diferença aos lineamentos interpretados na imagem ótica (cor verdadeira)

²¹ As coordenadas UTM do tanque João Cativo 02 são: Zona 24M - 425089.55 m E / 9612599.52 m S.

(Figura 127). A direção NNW-SSE reflete de maneira significativa a maior parte dos lineamentos observados tanto naqueles evidenciados na imagem ótica (cor verdadeira), quanto nos modelos de relevo sombreado. A direção também indica a orientação principal analisada nos lajedos graníticos delimitados.

Figura 127 - Disposição dos lineamentos estruturais sobre a área do tanque natural fossilífero João Cativo 02 e entorno. É possível visualizar a sobreposição entre os lineamentos e os afloramentos do Granitoide Santa Quitéria obtidos a partir da imagem ótica em cor natural.



5.4.3 Tanque natural João Cativo 02: aspectos morfológicos

O Sítio Paleontológico João Cativo é composto por dezenas de tanques naturais, sendo dois preenchidos com um abundante material fossilífero proveniente da megafauna pré-histórica (XIMENES, 2003). Entre os tanques de maior importância, destaca-se o João Cativo 02 (Figura 128). Segundo a classificação elaborada por Waldherr *et al.* (2017a), os tanques naturais de João Cativo podem ser compreendidos em um padrão de tanques escarpados de grandes dimensões e que apresentam morfologia de fundo do tipo côncavo e cunha.

Figura 128 - Tanque natural fossilífero João Cativo 02 no centro da imagem. Os sobrevoos de RPA foram realizados no período de estiagem para uma melhor visualização dos possíveis condicionantes geoambientais, em especial os lineamentos estruturais. Foto: Henrique Sampaio, Dez./2021.



O tanque natural João Cativo 02 apresenta uma extensão de 33 metros de comprimento. A largura máxima entre as ombreiras é de 5 metros e a profundidade chega a alcançar os 6 metros. O eixo principal do tanque João Cativo 02 apresenta direção NNW-SSE (N10W) e as ombreiras possuem alturas distintas, configurando uma evidente assimetria em relação a forma de relevo. Nesse sentido, a porção voltada para leste encontra-se rebaixada, semelhante a um lajedo de topo nivelado, enquanto que a oeste a

ombreira granítica se eleva de modo abrupto, configurando a lateral de um domo (Figuras 129 e 130). A ocorrência de fraturas oblíquas de direção NW-SE e/ou WSW-ENE, tendem a delimitar o tanque no sentido N-S, definindo igualmente a posição dos exutórios ou nível de base local do tanque natural (Figura 131 e 132). Cabe destacar a presença de fraturas de direção NW-SE (N50W), tendo a extensão de 10 a 13 metros de comprimento, posicionadas de forma oblíqua ao eixo longitudinal da depressão.

A morfologia de fundo do tanque natural é caracterizada pela ocorrência de três depressões sobrecavadas que seguem o eixo principal NNW-SSE. As depressões encontram-se na porção central do tanque, sendo restringidas por divisores internos ou septos graníticos. Os septos estão posicionados de modo oblíquo ao eixo principal, seguindo a direção NE-SW. Embora as três depressões sobrecavadas imputem uma morfologia de fundo distinta, o tipo de fundo observado em campo corresponde ao padrão côncavo e em cunha. Ainda em relação aos aspectos morfológicos do tanque natural João Cativo 02 apresenta um conjunto de formas e estruturas menores (*flared slopes*, septos graníticos e alvéolos) no seu interior e que tendem a seguir o posicionamento do eixo principal em relação as áreas de interseção com as fraturas oblíquas. A textura de *pitting* e o mecanismo de *flaking* se mostram igualmente presente sobre a superfície das paredes laterais do tanque.

Em avaliação de campo, considera-se que o tanque natural João Cativo 02 tem a sua possível origem e desenvolvimento associado ao reafeiçoamento a partir do intemperismo químico-físico em condições subedáficas. No caso, a frente de intemperismo atuando preferencialmente sobre o conjunto de estruturas rúpteis/dúcteis estabelecido entre os domos e lajedos graníticos. Uma vez removida a cobertura regolítica, as formas *etch* foram expostas, por fim, ao ambiente subaéreo. A disposição do conjunto de lineamentos, assim como o grau de aprofundamento associado ao intemperismo químico-físico, reflete sobre parte da distribuição das feições geomorfológicas que configuram o Sítio Paleontológico João Cativo. No geral, a ocorrência de formas *etch* (corrosão) no sítio paleontológico indica que o tanque João Cativo 02 tenha sido igualmente retrabalhado a partir da frente de intemperismo em zonas pré-estabelecidas, ou seja, sobre áreas de debilidade do embasamento rochoso em subsuperfície.

Figura 129 - Tanque natural João Cativo 02 no período de "pós inverno" no sertão de Itapipoca. O tanque encontrava-se completamente inundado. Foto: Felipe Waldherr, Jul./2019.



Figura 130 - Morfologia de fundo do tanque natural João Cativo 02. É possível visualizar o eixo principal e o fundo escavado. Nota-se a segmentação das depressões a partir de septos graníticos. Visada para o sul. Foto: Felipe Waldherr, Dez./2021.



Figura 131 - Disposição de fraturas oblíquas de direção NW-SE que atravessam o eixo principal do tanque natural João Cativo 02. É possível ver a continuidade do lineamento sobre o lajedo acima. Foto: Felipe Waldherr, Dez./2021.



Figura 132 - Morfologia de fundo do tanque natural João Cativo 02. É possível visualizar o controle do eixo principal no aprofundamento da forma e o papel das fraturas oblíquas na segmentação das depressões de fundo. Visada para o norte. Foto: Felipe Waldherr, Dez./2021.



Uma observação interessante é a disposição das estruturas secundárias ou tardias, em especial as fraturas de direção NW-SE e NE-SW. Embora os lineamentos estruturais citados acima sejam vinculados a ocorrência de uma ampla diversidade de tanques naturais no Sítio Paleontológico João Cativo, há um importante fator em relação a disposição dos lineamentos em relação aos tanques de maiores dimensões. No tanque João Cativo 02, por exemplo, os lineamentos estruturais de direção NW-SE e NE-SW, posicionados de modo oblíquo ao eixo principal, são convertidos em importantes estruturas responsáveis por delimitar, reafeiçoar e seccionar internamente a depressão natural (Figura 133).

Figura 133 - Ocorrência de cavidades entre os planos de fraturas oblíquas subverticais (A) que constituem estruturas menores do relevo (tais formas são análogas às resultantes do modelo de migração e concentração de cargas). É possível visualizar o lineamento estrutural e sua extensão ao configurar e/ou delimitar o septo granítico (B). Foto: Felipe Waldherr, Dez./2021.



5.4.4 O controle estrutural no desenvolvimento do tanque natural João Cativo 02

Após os trabalhos de campo, foi elaborado uma série de desenhos esquemáticos no intuito de tornar evidente os principais condicionantes geoambientais que poderiam estar vinculados ao desenvolvimento do tanque natural João Cativo 02. Os desenhos esquemáticos apresentam de modo pontual a disposição dos lineamentos estruturais, no caso, o eixo central e o conjunto de sistema de fraturas (fraturas conjugadas, oblíquas e a interseção entre as fraturas) observados em campo e, posteriormente, analisados a partir do imagens de alta resolução obtidas pelo sobrevoo de RPA no Sítio Paleontológico João Cativo.

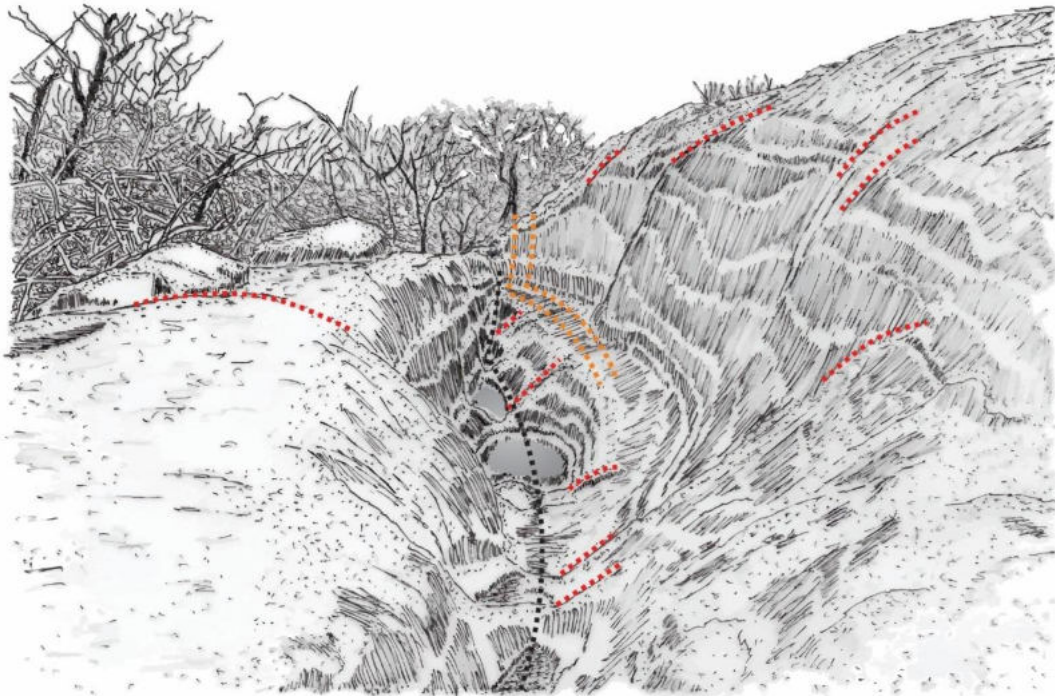
Os desenhos esquemáticos foram elaborados em nanquim e editados em *software* CorelDraw 2020. O primeiro desenho (Figura 134) corresponde ao tanque natural João Cativo 02 e a morfologia do interior da depressão, enquanto o segundo desenho esquemático (Figura 135) busca estabelecer os principais lineamentos e, conseqüentemente, condicionantes geoambientais, responsáveis pelo desenvolvimento do tanque natural em subsuperfície (condições subedáficas) e sua exposição em condições subaéreas.

Figura 134 - Desenho esquemático elaborado do tanque natural João Cativo 02, expondo os principais aspectos morfológicos do interior da depressão. Visada para o sul. Elaborado por: Felipe Waldherr, Jan./2023.



FELIPE WALDHERR, 2023

Figura 135 - Desenho esquemático representando os principais lineamentos estruturais do tanque natural João Cativo 02. É possível visualizar o eixo principal e a disposição (e extensão) das fraturas oblíquas que configuram a morfologia de fundo do tanque. Visada para o sul. Elaborado por: Felipe Waldherr, Jan./2023.



>>> LEGENDA:



Eixo central do tanque natural João Cativo 02



Sistema de fraturas conjugadas



Afloramentos rochosos



Sistema de fraturas oblíquas

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os tanques naturais de Itapipoca correspondem a um importante conjunto de formas menores do relevo granítico. No meio acadêmico nacional, a discussão sobre a origem e o desenvolvimento deste tipo de feição geomorfológica remonta ao século XIX, durante as expedições científicas que percorriam a porção interiorana do então Império do Brasil. Entre as expedições científicas, tem destaque a Comissão Científica do Império (1859 - 1961) o qual o Prof. Guilherme Schüch de Capanema, membro da comissão científica e chefe da seção de geologia, descreve um dos primeiros registros sobre tanques naturais e depósitos de tanqueossilífero na então Província do Ceará, acrescentando ao relato uma breve concepção sobre a possível gênese da cavidade (CAPANEMA, 1866). Ao longo do tempo histórico, uma série de hipóteses foram apreciadas e, eventualmente, debatidas no meio acadêmico nacional. Atualmente, o modelo que tem sido comumente utilizado na explanação sobre a gênese e a distribuição geográfica de "Formas Maiores" e "Formas Menores" do relevo granítico reside no conceito de duplo estágio (dupla etapa) de aplainamento ou teoria de etchplanação.

O modelo em questão integraria a dinâmica dos (paleo)mantos intempéricos, ou seja, a influência do *front* de intemperismo na modelagem e reafeiçoamento das formas de relevo em subsuperfície e, posteriormente, na exposição gradual destas unidades e a formação de compartimentos geomorfológicos. Nesse contexto, a presente tese buscou apresentar os condicionantes geoambientais que hipoteticamente viabilizaram o desenvolvimento de três tanques naturais de maior dimensão localizados no chamado Vale da Megafauna Pré-histórica de Itapipoca. As depressões naturais encontram-se distribuídas em três sítios paleontológicos. O primeiro tanque avaliado corresponde ao "tanque natural Jirau 01", no Sítio Paleontológico Jirau; o segundo, denominado "tanque natural Criminoso", no Sítio Paleontológico Lajinhas; e, por fim, o terceiro, nominado "tanque natural João Cativo 02", no Sítio Paleontológico João Cativo. Os sítios paleontológicos referidos acima estão localizados no município de Itapipoca, na porção norte do estado do Ceará.

No contexto geoambiental, as unidades litoestratigráficas denotam a uma série de informações primárias em relação ao controle litológico e estrutural nas formas de relevo que integram a paisagem interiorana de Itapipoca. A unidade litológica Leucogranito Penedos, por exemplo, onde encontra-se o tanque natural Jirau 01, foi alojada em

profundidade no Granitoide Santa Quitéria²², sob condições confinantes, sendo submetida ao resfriamento magmático em distintos estágios, seguido de fases de deformações de caráter rúptil e, posteriormente, ao alívio de pressão (redução da pressão confinante ou erosão de camadas subjacentes) ao longo do tempo geológico. O conjunto desses processos tem sido aceito como responsável pela origem e desenvolvimento de famílias ou *sets* de fraturas/diáclases (*sheet structure*) em ocorrerem em diferentes estágios no embasamento cristalino (OLLIER, 1984; VIDAL ROMANÍ, 1989, 2008; VIDAL ROMANÍ; TWIDALE, 1999; VIDAL ROMANÍ *et al.*, 1995; TWIDALE; VIDAL ROMANÍ, 2005). A ocorrência de fraturas (*sheet structure*) sobre o embasamento granítico tem sido apontado como uma das principais vias de acessos ao desenvolvimento de processos vinculados à corrosão química em condições subedáficas. Assim, o estabelecimento de águas vadasas sobre áreas específicas, por exemplo, em interseções de fraturas, considerando a proximidade (espaçamento) e a disposição das estruturas rúpteis, teria permitido a atuação e o reafeiçoamento diferencial a partir da frente de intemperismo em subsuperfície. No entanto, o conjunto de fraturas (*sheet structure*), além de resultar na abertura de numerosas vias de acesso para o ingresso e estabelecimento de águas vadasas, também pode ter originado a formação de numerosos pontos de migração e concentração de carga, entre os blocos e/ou lascas de descamação, a partir de tensões oriundas de processos tectônicos. A concentração de cargas resultaria em estruturas pré-estabelecidas, no caso, a conformação de estruturas menores sobre zonas internamente deformadas, semelhantes a bulbos de tensões, que atuariam como áreas preferenciais sobre o embasamento granítico ao ataque intempérico em subsuperfície.

Em relação a distribuição dos aspectos morfológicos no interior dos tanques naturais é possível visualizar uma série de formas de dissolução e estruturas menores sobre o embasamento que corresponderiam, na literatura acadêmica internacional, às formas vinculadas ao processo de corrosão físico-química provenientes do contato solo-rocha e, de modo pontual, ao processo de migração e concentração de cargas. Em avaliação de campo, as superfícies graníticas dos tanques naturais apresentam comumente uma textura que ocorre, em especial na porção inferior e no antigo limite de contato solo-rocha, denominada na língua inglesa como *pitting* (processo associado a corrosão química) e com sinais ativos de desagregação granular e/ou descamação em placa

²² É interessante destacar que os tanques naturais Criminoso e João Cativo, por exemplo, encontram-se distribuídos sobre afloramentos graníticos da rocha encaixante, principalmente em lajedos e domos, constituídos pela unidade litológica Granitoide Santa Quitéria.

(*flaking*). Nas laterais, principalmente em lineamentos que correspondem as fraturas oblíquas ao eixo central dos tanques, é possível verificar a ocorrência de cavidades menores, semelhante às formas de favo de mel encontradas em feições do tipo tafone.

Em razão da baixa porosidade e permeabilidade do embasamento granítico, os tanques naturais de maiores dimensões, uma vez expostos as condições subaéreas, tenderiam a manter ao longo do tempo geológico as suas características geradas e/ou reafeiçoadas em subsuperfície, configurando na paisagem de Itapipoca a ocorrência (e permanência) de distintos níveis, ou mesmo estágios, de desenvolvimento dessas depressões naturais. Em análise de campo, uma hipótese apreciada é que a fase de aprofundamento dos tanques naturais de grande porte tenha sido interrompida, expondo de modo sucinto os tanques naturais em superfície e mantendo a morfologia concebida em condições subedáficas. Embora os processos vinculados ao aprofundamento e/ou alargamento do tanque natural continuem após a exposição e as condições subaéreas, estes estariam submetidos a taxas significativamente mais lentas em relação aos processos subedáficos. Ao remover de modo sucessivo o material intemperizado *in situ* que anteriormente recobria os tanques naturais, os espaços exumados tenderiam a descontinuar e/ou restringir os processos de corrosão química em virtude da redução contínua da área de atuação da frente de intemperismo associado a diminuição ou remoção do antigo contato solo-rocha. Em contrapartida, os processos erosivos e de transporte atuam com maior eficiência sobre o material regolítico *in situ* (zonas de *arena* ou *grus*) que anteriormente recobriam os terrenos graníticos, favorecendo a exposição episódica dos tanques naturais. Assim, os eventos associados a distintos pulsos erosivos, recorrência de chuvas torrenciais, transbordamentos e a dissecação do relevo, na região poderiam estar vinculados a remoção parcial do material acumulado no interior das depressões, gerando novos espaços de acomodação que viriam a ser preenchidos por uma sequência de eventos deposicionais, conformando os depósitos de tanque. Os depósitos de tanque compreendem os sedimentos quaternários e que, eventualmente, são preenchidos por conteúdo fóssilífero da megafauna pré-histórica. Os principais processos vinculados a continuidade no reafeiçoamento e do desgaste do tanque natural, em ambiente subaéreo, seriam através da ação fluvial, aos efeitos resultantes da termoclastia, da influência de agentes biológicos, atividade eólica, etc.

Assim, a identificação dos condicionantes geoambientais, em especial o controle litológico-estrutural, e o emprego da concepção de duplo estágio foi utilizado na presente

pesquisa na elaboração de apontamentos que buscam esclarecer a origem e o desenvolvimento de tanques naturais de maiores dimensões. Uma vez compreendido a complexa interação entre os mantos intempéricos, a frente de intemperismo e o controle estrutural do embasamento cristalino, a questão subsequente residiu na definição de dois momentos específicos: o primeiro encontra-se associado ao reafeiçoamento das depressões naturais (aprofundamento e alargamento) em subsuperfície; enquanto o segundo período corresponde a exposição ou exumação das formas menores do relevo granítico.

Em importante contribuição sobre a história do intemperismo no semiárido nordestino, Lima (2008) demonstra um número expressivo de amostras que denota a presença de períodos mais pronunciados da atuação de intemperismo e a distribuição de resquícios de mantos intempéricos em três setores geomorfológicos, a saber: Depressão Sertaneja; Planalto Borborema e Planícies e Tabuleiros Costeiros. Em relação aos óxidos de manganês, analisados através do método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, os principais picos apresentam idades de 28, 15, 10, 5.5 e 1.5 Ma; e os períodos obtidos a partir do método (U-Th)/He em geotitas, apresentam idades de 17, 10 e 3.5 Ma. Os picos nos ideogramas expostos por Lima (2008) sugerem que um intenso enriquecimento de óxidos de manganês e óxidos/hidróxidos de ferro ocorreu no perfil, indicando que parte do Nordeste do Brasil estava provavelmente submetida a condições quentes e úmidas durante os períodos mencionados. A maior parte dos eventos climáticos globais são bem correlacionados com este intemperismo intenso e eventos de precipitação mineral. Santos *et al.* (2022) destacam igualmente que os resultados obtidos por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ em óxidos de manganês sugere que o intemperismo químico foi intenso entre o Mioceno Médio e Pleistoceno.

De acordo com Lima (2008), os perfis de intemperismo na Depressão Sertaneja fornecem idades que variam de 3.1 ± 0.5 a 0.8 ± 0.4 Ma, indicando uma história de intemperismo mais recente neste compartimento geomorfológico. Os perfis de intemperismo rasos e incipientes da Depressão Sertaneja, todos mais jovens que 3 Ma, indicam uma história mais ativa de erosão em relação a esta superfície, o que impediu a formação ou, principalmente, a preservação de perfis de intemperismo mais antigos. Os perfis de intemperismo incipientes e rasos da Depressão Sertaneja, datados em torno de 1.5 Ma, caracterizam o contínuo retrabalhamento desta superfície. No contexto da análise estratigráfica, a espessura dos perfis de intemperismo associados a Depressão Sertaneja,

ou seja, nas áreas topograficamente mais baixas e que constituem a Superfície Sertaneja 01 ocorrem perfis mais rasos e incipientes com 2 a 5 metros de profundidade.

Desse modo, é interessante refletir sobre a possibilidade o qual a atuação da frente de intemperismo em condições subedáficas tenha sido reduzida e/ou interrompida, mantendo a morfologia pré-estabelecida dos tanques naturais de maiores dimensões em idades patamar de 3.1 e 1.5 Ma durante um período de maior umidade e condicionado a exposição gradual das formas menores do relevo granítico. O estabelecimento exato no que se refere ao momento o qual a frente de intemperismo tenha atingido o substrato rochoso e, conseqüentemente, iniciado o reafeiçoamento das formas de relevo torna-se de difícil assimilação em virtude dos distintos pulsos de intemperismo associado ao predomínio de domínios morfoclimáticos de maior umidade que sucederam ao longo do Cenozoico, em especial no Neógeno e Quaternário. No entanto, a implementação de um período de intenso intemperismo químico no Nordeste Setentrional, sugerido entre o Mioceno Médio e Pleistoceno, denota a reflexão sobre a conjuntura o qual a frente de intemperismo pôde ter alcançado de modo incipiente o nível dos tanques naturais (embasamento granítico) em subsuperfície. Nesse contexto, o aprofundamento do manto regolítico sobre as rochas sobrejacentes teria ocorrido em um momento posterior ao importante evento erosivo que sucedeu durante o Oligoceno na porção continental, registrando na margem *offshore* as maiores taxas de sedimentação siliciclástica (Formação Tibau) na Sub-bacia do Mundaú.

Uma resposta assertiva em relação a idade do início da formação dos tanques naturais de maiores dimensões ainda carece de dados mais precisos, no entanto, sabe-se que a dinâmica da frente de intemperismo acontece de modo difuso e irregular em condições subedáficas, sendo posteriormente direcionada a zonas preferenciais, por exemplo, sobre estruturas rúpteis/dúcteis ou estruturas secundárias e tardias, resultando na atuação e efetividade do intemperismo químico (corrosão química) em áreas específicas ou pré-estabelecidas no contato solo-rocha.

É comumente explicitado que a atuação da frente de intemperismo e o seu aprofundamento (desenvolvimento do manto regolítico) está vinculada ao predomínio e/ou concentração de umidade. A interpretação paleoambiental para os perfis de intemperismo de 3.1 Ma. indica, além do predomínio de pulsos erosivos de maior intensidade, na recarga de zonas vadasas que estariam posicionadas em áreas de maior debilidade do substrato rochoso. É provável que a remoção gradual do material

intemperizado tenha sido acentuada, desmantelando as capas regolíticas e expondo de modo episódico do conjunto de tanques naturais que haviam sido previamente reafeiçoados em subsuperfície.

Outra característica reside no fato de que durante o Pleistoceno Final - Holoceno Inicial, os tanques naturais de maiores dimensões seriam semelhantes em relação aos aspectos morfológicos ao que se observa atualmente. No entanto, os tanques naturais apresentariam no seu interior espaços de acomodação, assim, como o desenvolvimento incipiente dos depósitos de tanque. A própria existência de tanques naturais fossilíferos revelam uma causalidade e casualidade geológica e paleontológica extraordinária, estabelecendo uma conformação entre a exposição da feição geomorfológica e o seu preenchimento sedimentar com fragmentos ósseos provindos da megafauna pré-histórica durante o Quaternário no semiárido brasileiro.

É importante destacar a relevância dos depósitos de tanque em relação a exposição das formas menores do relevo e o papel que as depressões naturais desempenham no contexto da dinâmica da paisagem no semiárido. Na presente pesquisa, somente o tanque natural fossilífero Jirau 01 ainda mantém em seu interior as camadas sedimentares que conformam o depósito de tanque. Desse modo, foi possível elaborar uma reconstituição da dinâmica da paisagem no entorno da depressão. A análise do perfil estratigráfico, junto a descrição sedimentológica, do depósito de tanque do Jirau 01 indica uma série de eventos em relação a dinâmica paleoambiental e paleoclimática durante o Quaternário. O primeiro ponto a levar em consideração é a conversão do tanque natural em um eixo preferencial para coalescência de fluxos do escoamento superficial e, conseqüentemente, do aporte preponderante de sedimentos siliciclásticos. Outra observação reside na propriedade estratigráfica do pacote sedimentar que compreende um material alóctone; no caso, a ocorrência do depósito de tanque sugere a formação prévia de um espaço de acomodação no interior da depressão natural. O espaço de acomodação é decorrente da remoção do material inconsolidado *in situ*, denominado "*grus*", através de processos erosivos e que preenchia anteriormente o interior do tanque natural. O *grus* corresponde ao material granítico alterado e não mobilizado, corresponde na literatura geomorfológica a "*arena in situ*", sendo bastante vulnerável a remoção e ao transporte através da erosão fluvial e pluvial.

Assim, uma vez estabelecido a condição de depocentro em escala reduzida, o tanque natural começou a ser preenchido por sedimentos pleistocênicos. A camada de

conglomerado com elevado grau de arredondamento dos clastos que corresponde a porção basal do depósito de tanque sugere um transporte de longa distância, remobilizados a partir de enxurradas que seguiam os principais eixos de drenagem (Rio Cruxati e Riacho Sororó) no entorno do sítio paleontológico. O registro sedimentar indica uma condição paleoambiental distinta, sugerindo uma drenagem volumosa com maior energia e capacidade de transporte, diferente da atual que é caracterizada como drenagem intermitente. A camada sedimentar sobreposta, constituída por um material inconsolidado (depósito colúvio-aluvial), remete a fluxos de escoamento superficial concentrados, típico de chuvas torrenciais em ambientes do semiárido. O conjunto de chuvas torrenciais seria o responsável por carrear os sedimentos oriundos das áreas adjacentes, no desmantelamento de mantos intempéricos, e o desprendimento de lascas de descamação da parede lateral para o interior do tanque. No topo do depósito de tanque encontra-se a camada fossilífera, constituída por fragmentos ósseos oriundos da megafauna pré-histórica. Os estudos tafonômicos junto a análise da matriz sedimentar, apontaram um transporte rápido a partir de enxurradas que carregaram os fragmentos ósseos para o interior do tanque natural. Cabe ressaltar a característica caótica da camada fossilífera que denota uma mistura temporal e, de certo modo, uma baixa capacidade de deslocamento dos fragmentos fósseis em zonas específicas do tanque em virtude do estreitamento de fundo da feição geomorfológica.

Nesse sentido, a presença de fósseis de megamamíferos, mamíferos com peso acima de 1.000 kg, e grandes mamíferos, acima de 44kg, preservados em depósitos de tanque constitui uma evidência de um mosaico de vegetação pretérito composto por campos abertos, savanas e florestas na caatinga, assim como de maior ou menor quantidade e atuação de cursos de água durante o Pleistoceno. Desse modo, os registros paleontológicos que se encontram resguardados nos tanques naturais constituem áreas relevantes no que se refere as informações sobre a atuação de paleoclimas que podem ter viabilizado condições ambientais apropriadas ao desenvolvimento desse amplo conjunto faunístico pré-histórico.

Embora o presente trabalho tenha dado prioridade ao conjunto de tanques naturais de maiores dimensões, uma ampla diversidade de tanques de tamanho menor ocorre igualmente sobre os lajedos e domos graníticos no interior do município de Itapipoca. Ao estabelecer a diferenciação entre os tanques naturais em relação ao aspecto dimensional para o Nordeste do Brasil, Waldherr *et al.* (2017a) sugerem a utilização de dois tipos de

tanques, a saber: os tanques rasos e os tanques escarpados (Quadro 02). No presente estudo, os tanques de menor porte constituem os tanques rasos, no entanto em Itapipoca foi observado uma série de especificidades que devem ser abordados em relação as depressões naturais. Além da própria perspectiva dimensional, a distinção entre os tanques de menor porte (tamanho centimétrico a métrico) consiste na análise a partir da visão em planta (circular, alongado, elipsoide e/ou lobulado), de aspectos morfológicos da depressão (ocorrência de estruturas menores no seu interior) e do tipo de fundo do tanque. Nesse último caso, o tipo de fundo de tanque detém informações relevantes no que se refere aos possíveis condicionantes geoambientais para o desenvolvimento destas depressões, sendo previamente classificados em: tipo cunha, côncavo, plano e/ou poltrona (WALDHERR *et al.* 2017a, 2019; SILVA *et al.*, 2017).

Quadro 2 - Tipologia proposta para os tanques naturais (rasos e escarpados) localizados nos sítios paleontológicos do município de Itapipoca (CE).

Tipos de Tanques	Subtipos (forma de fundo)	Características morfológicas	Morfogênese
Tanques rasos	<p>Tanque raso cunha</p> <p>Tanque raso côncavo</p> <p>Tanque raso plano</p> <p>Tanque raso poltrona</p>	<p>Tanques rasos são depressões naturais produzidas em superfícies horizontais e/ou subhorizontais do substrato rochoso granítico.</p> <p>Feições pouco profundas (centimétricas a métricas) com caráter esférico e/ou elipsoidal, raramente cônicos. Quando o fundo é do tipo em cunha são comumente alongados.</p> <p>Tanques rasos têm $C > L$, podendo ser $C \sim L$, e de modo contínuo com $P < C$ ou L. Os tanques em poltrona assemelham-se aos tanques escarpados em relação a morfologia, uma vez que $P > L$.</p>	<p>Os tanques rasos tem sua origem associada a processos de intemperismo físico e químico em zonas de debilidade do embasamento granítico e sob condições subaéreas ou de transição em mantos de regolito pouco espessos e/ou próximos da superfície.</p> <p>A gênese integra tanto ao modelo monofásico (controle estrutural, litológico, climático, biológico e dinâmico) e, eventualmente, ao modelo polifásico (subedáficos).</p>
Tanques escarpados (Itaigaras)	-----	<p>Tanques escarpados (Itaigaras) são depressões naturais produzidas sobre lineamentos estruturais, desenvolvidos a partir de eixos verticais e/ou subverticais no substrato rochoso granítico.</p> <p>Em geral, apresentam formas alongadas e estreitas, sendo balizadas por paredes íngremes (ombreiras graníticas). Em geral, apresentam no seu interior indícios de processos vinculados ao reaquecimento a partir da atuação de corrosão química como <i>flared slopes</i> e textura em <i>pitting</i> e/ou <i>flaking</i>.</p> <p>São fundos e predominantemente alongado. \por vezes, tem aspecto elipsoidal. Em geral, $C > L$, mas sempre $P \gg L$.</p>	<p>Seu desenvolvimento está ligado ao intemperismo diferencial em condições subedáficas, atuando de modo contínuo sobre áreas de debilidade do embasamento granítico.</p> <p>A disposição de <i>sets</i> de fraturas (<i>sheet structure</i>), em especial as fraturas conjugadas e áreas de interseções de estruturas secundárias/tardias, viabilizaram o estabelecimento de distintas zonas de saprolitização em subsuperfície. A remoção gradual do material intemperizado que anteriormente o recobria expôs gradualmente os tanques naturais escarpados.</p> <p>A gênese dos tanques escarpados estaria integrada preferencialmente ao modelo polifásico (subedáfico). Em alguns casos há indícios de processos de migração e concentração deargas.</p>

C - Comprimento; L - Largura; P - Profundidade.

A origem destes tanques menores nos sítios paleontológicos de Itapipoca ainda requer um levantamento em detalhe, no entanto foi possível examinar em campo, que os tanques rasos com fundo em cunha e/ou do tipo côncavo possuem notória ocorrência sobre fraturas paralelas (conjugadas) e/ou em intersecções de estruturas secundárias. No entanto, o tanque com fundo do tipo côncavo pode igualmente ser interpretado como

resultante do intemperismo diferencial atuando sobre enclaves máficos e/ou xenólitos com formato circular (OLIVEIRA *et al.*, 1989; MABESOONE *et al.*, 1990; MAIA; NASCIMENTO, 2018) ou reafeiçoando um conjunto de formas côncavas (espaços lacunares) previamente estabelecidas ao longo das lascas de descamação (*sheet structure*), resultantes dos processos de migração e concentração de cargas em subsuperfície (VIDAL-ROMANÍ, 1984, 1985, 1989, 1990, 2008; VIDAL-ROMANÍ *et al.*, 2014a, 2014b, 2018; MAYOR RODRÍGUEZ, 2011; ROQUÉ *et al.*, 2013).

O tanque raso com fundo plano detém uma característica interessante, uma vez que indica a área de interseção entre os planos de fraturas sub-horizontais e a exposição do topo de nível do plano da fratura subjacente. Em geral, a estruturação de distintos planos de fraturas tem sido associada a eventos atectônicos como alívio de pressão, comumente observado em exposições graníticas.

O tanque raso com fundo tipo poltrona, além de indicar um controle estrutural a partir da interseção entre as fraturas, sugere o vestígio de um antigo contato solo-rocha o qual foi responsável pela atuação e manutenção da frente de intemperismo e, conseqüentemente, pelo recuo da parede lateral, conformando a presença de *flared slopes* sobre a superfície granítica remanescente (TWIDALE, 1968, 1982, 1986a, 1986b; TWIDALE; VIDAL-ROMANÍ, 2005; MIGOÑ, 2006; BASTOS, 2018; MAIA; NASCIMENTO, 2018).

Em geral, os tanques rasos tem a sua gênese associada a condições subaéreas ou de transição, sob mantos de regolito pouco espessos e próximos a superfície, mantendo sua dinâmica evolutiva conforme a atuação do intemperismo sobre as zonas de debilidade do substrato rochoso. Uma vez exposto, o embasamento granítico tende a manter o conjunto de formas de relevo, em especial no que se refere as superfícies verticais e subverticais, onde dificilmente a pedogênese pode vir a se desenvolver. No entanto, as superfícies horizontais e sub-horizontais ao se estabelecerem como eixos de confluência de escoamento superficial e para o transporte de sedimentos, por exemplo, sobre os sistemas de fraturas e juntas, conformam áreas preferenciais para o desenvolvimento incipiente de solo, reestabelecendo novas frentes de intemperismo sobre os lajedos graníticos. Ao empreender inicialmente a proposta de Mayor Rodríguez (2011), a gênese dos tanques rasos estaria integrada tanto ao modelo monofásico (controle estrutural, litológico, climático, biológico e dinâmico) como, eventualmente, polifásico (subedáfico).

Em Itapipoca, os tanques naturais escarpados constituem as depressões de maiores dimensões, alcançando em média os 50 metros de comprimento e 8 metros de profundidade. Em campo, ficou estabelecido a denominação regional de *Itaigara*, condizente com o tronco linguístico tupi e que traduzido ao português tem o significado de "Canoa de Pedra", em referência a feição geomorfológica observada através de sobrevoo de RPA. Os tanques naturais do tipo *Itaigara* correspondem as formas menores do relevo granítico mais representativas no âmbito social, geocientífico e histórico da paisagem interiorana de Itapipoca. Na paisagem do interior cearense, a morfologia que define o tipo de conjunto de tanques naturais escarpados do tipo *Itaigara* encontra-se associada à disposição dos lineamentos estruturais, configurando as ombreiras graníticas. As ombreiras graníticas, por sua vez, delimitam as formas menores do relevo que seguem o eixo principal de modo paralelo e contínuo. Um outro aspecto é o tipo de fundo dos tanques naturais de grandes dimensões que varia entre o formato côncavo e/ou em cunha. O modelo empregado aos tanques naturais escarpados estaria teoricamente associado ao modelo polifásico (MAYOR RODRÍGUEZ, 2011), dispondo de uma gênese inicial em subsuperfície e, posteriormente, exposto as intempéries em condições subaéreas.

Em análise de campo, o desenvolvimento destes tanques naturais de maiores dimensões foi atribuído ao intemperismo diferencial em condições subedáficas, atuando de modo contínuo sobre áreas de debilidade do embasamento granítico. A disposição de *sets* de fraturas (*sheet structure*), em especial as fraturas conjugadas e áreas de interseções de estruturas secundárias/tardias, viabilizaram o estabelecimento de distintas zonas de saprolitização em subsuperfície. Ao manter as zonas de águas vadasas e o reafeiçoamento através da corrosão química no contato solo-rocha, a forma do tanque natural escarpado encontrava-se previamente estabelecida. A remoção gradual do material intemperizado que anteriormente o recobria, no caso, os sedimentos resultantes da alteração mineralógica, química e física do eixo principal e do conjunto de fraturas conjugadas e oblíquas, expos gradualmente os tanques naturais escarpados no Vale da Megafauna Pré-histórica de Itapipoca ao longo do Pleistoceno, mantendo aparentemente seus aspectos morfológicos, ao longo do Holoceno.

7 CONCLUSÕES

Os tanques naturais integram um conjunto de formas menores do relevo que ocorrem sobre lajedos e domos graníticos no interior do município de Itapipoca, no semiárido cearense. Na presente tese, o total de três tanques naturais escarpados, que se encontram em diferentes localidades, foram selecionados como os principais pontos de referência para investigação em campo. A avaliação sobre a origem e o desenvolvimento dos tanques naturais revela à princípio um amplo controle litológico e estrutural, em especial a partir da disposição de lineamentos. Na proposta da sequência evolutiva dos tanques, a dinâmica dos mantos intempéricos configura em um importante processo para o intemperismo diferencial sobre o substrato rochoso e o início da conformação morfológica do tanque natural em subsuperfície. A ocorrência de paleomantos intempéricos igualmente denota a atuação e o avanço da frente de intemperismo conforme o predomínio morfoclimático regional, assim como a permanência da cobertura regolítica, promovendo o contato solo-rocha e o reafeiçoamento a partir da corrosão química. Em síntese, a frente de intemperismo torna-se responsável pela modelagem das formas de relevo em subsuperfície a partir da alteração física, química e mineralógica sobre as zonas de debilidade do embasamento granítico. A remoção sucessiva dos mantos intempéricos resultaria na exposição gradual dos tanques naturais (formas *etch*) e na composição atual dos compartimentos geomorfológicos.

A ampla diversidade de formas de dissolução e/ou formas *etch*, tanto no interior dos tanques naturais escarpados quanto na área do entorno, que compõe o relevo dos sítios paleontológicos, evidencia os resquícios da atuação da frente de intemperismo na paisagem interiorana de Itapipoca. Entre as formas e estruturas menores encontradas e que estariam correlacionadas ao intemperismo químico e, conseqüentemente, a períodos mais úmidos prevalecendo em porções do semiárido brasileiro, destacam-se os matacões sobre lajedos de topo nivelado, ocorrência de *castle koppies*, *tors*, *flared slope*, *honeycombs* ou "favos de mel", *tafoni*, alvéolos, além de textura de *pitting* que corresponde a ação de corrosão química sobre as superfícies rochosas e os mecanismos associados a *flaking*, de desagregação e desprendimento de lascas graníticas.

De acordo com os levantamentos de campo, junto ao auxílio de imagens aéreas obtidas por sobrevoo de RPA e modelos digitais de elevação elaborados em *software* SIG, o tanque natural Jirau 01, no Sítio Paleontológico Jirau, tende a apresentar os aspectos morfológicos intrinsecamente vinculados ao controle estrutural, consistindo no eixo

principal de direção WNW-ESE (N80W), acompanhado paralelamente por *sets* de fraturas conjugadas e, eventualmente, atravessado por fraturas oblíquas de direção NE-SW. A disposição dos lineamentos, em especial o eixo principal WNW-ESE, ocorre do modo recorrente sobre a unidade litológica Leucogranito Penedos, pertencente a Suíte Magmática Tardi a Pós-orogênica, de idade cambriano-ordoviciano (541 - 485 Ma).

Por outro lado, os tanques naturais Criminoso e João Cativo 02, respectivamente localizados nos sítios paleontológicos Lajinhas e João Cativo, ocorrem sobre a unidade litológica Granitoide Santa Quitéria, pertencente ao Complexo Tamboril-Santa Quitéria, de idade criogênica-ediacariano (\cong 635 Ma). O eixo central de ambos os tanques naturais detém direção NNW-SSE, sendo eventualmente atravessados por fraturas oblíquas de direção NW-SE e NE-SW, o qual configuram no interior dos tanques uma série de septos graníticos definidos por estruturas secundárias. A interseção entre as fraturas oblíquas e os eixos principais define áreas ou pontos de recuo nas paredes laterais, conformando formas *etch* do tipo *flared slope* ou *zapata* no sopé das ombreiras graníticas.

Em análise de campo, a disposição dos lineamentos estruturais consistiu em importantes condicionantes geoambientais para a formação dos tanques naturais escarpados em subsuperfície. A ocorrência de formas *etch*, estruturas menores do relevo e texturas associadas ao processo de corrosão química amplamente distribuídas sobre as superfícies graníticas nos sítios paleontológicos e no interior dos tanques naturais escarpados (Itaigaras) indicam o desenvolvimento da feição geomorfológica associada ao trabalho de reafeiçoamento através do intemperismo em condições sudedáficas e, posteriormente, a exposição em ambiente subaéreo. A presença dessas evidências em campo que constituem o conjunto de formas do relevo local tem auxiliado a compreender de modo parcial o contexto geomorfológico e, conseqüentemente, a elaborar uma seqüência evolutiva dos tanques naturais.

O levantamento estratigráfico e sedimentológico realizado a partir das camadas sedimentares assentadas no tanque natural Jirau 01, por exemplo, demonstrou que o contato lateral entre o material alóctone (camadas siltico-argilosa e fossilífera) e as ombreiras graníticas era conformado por resquílios de lascas de descamação (*sheet structure* e/ou anteriormente de fraturas conjugadas) que se encontram profundamente saprolitizadas. É provável que o adensamento de estruturas secundárias seguia o eixo central, conformando área de preferencial ao avanço da frente de intemperismo, definindo ou pré-estabelecendo a morfologia dos tanques naturais escarpados em subsuperfície.

É importante ressaltar que os depósitos de tanque constituem importantes feições geomorfológicas que preservam informações que podem auxiliar na interpretação da dinâmica paleoambiental local durante o Quaternário. O tanque natural fossilífero Jirau 01, área de referência no Sítio Paleontológico Jirau, ainda resguarda no seu interior um relevante material que constitui o depósito de tanque. A importância do registro sedimentar reside no recorte preservado do quadro paleopaisagístico, um perfil constituído por sedimentos alóctones, culminando na camada fossilífera associada ao Pleistoceno Final - Holoceno Inicial. A análise das camadas que constituem o depósito de tanque, junto a interpretação estratigráfica, sedimentológica e tafonômica, permitiu elaborar apontamentos iniciais sobre as condições ambientais e os processos erosivos e deposicionais envolvidos no preenchimento do tanque natural.

O levantamento sistemático elaborado na presente tese em relação ao conjunto de condicionantes geoambientais, destacando a disposição de *sets* de fraturamento e os lineamentos estruturais sobre o embasamento granítico, e a ampla ocorrência de formas de dissolução nas áreas de investigação, constituem informações relevantes sobre o desenvolvimento dos tanques naturais vinculado ao processo de intemperismo químico (conceito de dupla etapa) em condições subedáficas. No entanto, o conjunto de dados e informações citadas acima sugere somente a fase inicial do desenvolvimento dos tanques de maiores dimensões, nesse caso, a concepção da forma ou da feição geomorfológica pré-estabelecida em subsuperfície. Nesse contexto, a análise subsequente dos depósitos de tanque denota uma enorme importância, uma vez que estabelece a continuidade da sequência evolutiva dos tanques naturais após a sua exposição/exumação. O registro sedimentar no interior do tanque natural auxilia a compreender parte da dinâmica da paisagem e as condições paleoambientais e paleoclimáticas que perduraram durante o Pleistoceno Final - Holoceno Inicial.

Assim, a presente tese de doutorado buscou reconstituir a sequência evolutiva dos tanques naturais de maiores dimensões no município de Itapipoca, baseando-se no conceito de duplo estágio de aplainamento e no conjunto de informações coletadas em campo, principalmente os dados sobre o controle litológico-estrutural nas áreas de investigação. Os tanques naturais de Itapipoca, além de constituir um relevante marco histórico e de âmbito social ao município cearense, representam igualmente em um importante capítulo sobre a Geomorfologia do Quaternário, em especial no que se refere a este trecho do semiárido do Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDELSALAM, M.G.; LIÉGEOIS, J.P.; STERN, R.J. The Saharan Metacraton. **Journal of African Earth Sciences**, v. 34, n. 3-4, p. 119-136. 2002.
- ALMEIDA, A.R.; ULBRICH, H.H.G.J. O batólito granítico de Quixeramobim - CE, aspectos estruturais internos e mecanismo de alojamento crustal. **Revista de Geologia da UFC**, v. 16, n. 2, p. 81-98. 2003.
- ALMEIDA, F.F.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B.B. Províncias Estruturais Brasileiras. *In*: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 8., 1977, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: SBG - Núcleo Nordeste, 1977. p. 363-391.
- ALMEIDA, F.F.; M.; HASUY, Y.; BRITO NEVES, B.B.; FUCK, R.A. Brazilian structural provinces: an introduction. **Earth-Science Reviews**, n. 17, p. 1-21. 1981.
- ALMEIDA, R.T. Um sítio arqueológico histórico (A historical archaeological site). **CLIO: Revista de Pesquisa Histórica**, v. 3, n. 1, p. 61-63. 1980.
- ALVES, Rosembergh da Silva. **Os mamíferos pleistocênicos de Fazenda Nova, Brejo da Madre de Deus, Pernambuco: aspectos tafonômicos, taxonômicos e paleoambientais**. Recife, 2007. 127f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.
- ALVIM, G.F. Jazigos brasileiros de mamíferos fósseis. **Notas preliminares e estudos da Divisão de Geologia e Mineralogia**. DNPM, Rio de Janeiro, v. 18, p. 8-16. 1939.
- AMARAL, I. A propósito de formas escavadas em leitos fluviais e em vertentes de rochas graníticas do Deserto de Moçâmedes (Angola), na margem direita do Rio Curoca. **Garcia de Orta - Série de Geografia**, Lisboa, v. 1, n. 2, p. 1-18. 1974.
- AMARAL, I. Formas de «Inselberge» (ou montes-ilhas) e de meteorização superficial e profunda em rochas graníticas do Deserto de Moçâmedes (Angola), na margem direita do Rio Curoca. **Garcia de Orta - Série de Geografia**, Lisboa, v. 1, n. 1, p. 1-34. 1973.
- AMARAL, I. Paisagens morfológicas do Deserto de Moçâmedes (Angola) entre os Rios Curoca e Cunene (1ª. parte). **Garcia de Orta - Série de Geografia**, Lisboa, v. 4, n. 1-2, p. 1-28. 1977.
- AMARAL, Wagner da Silva. **Análise geoquímica, geocronologia e geotermobarométrica das rochas de alto grau metamórfico, adjacentes ao arco magmático de Santa Quitéria, NW da Província Borborema**. Campinas, 2010. 234 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade de Campinas, Campinas, 2010.
- ARAI, M. A Grande Elevação Eustática do Mioceno: e sua influência na origem do Grupo Barreiras. **Revista do Instituto de Geociências - USP**, v. 6, n. 2, p. 1-6. 2006.

ARAUJO C.E.G.; CORDANI, U.G.; WEINBERG, R.F.; BASEI, M.A.S.; ARMSTRONG, R.; SATO, K. Tracing Neoproterozoic subduction in the Borborema Province (NE-Brazil): Clues from U-Pb geochronology and Sr-Nd-Hf-O isotopes on granitoids and migmatites. **Lithos**, v. 202-203, p. 167-189. 2014.

ARAUJO, C.E.; COSTA, F.G.; PINÉO, T.R.; CAVALCANTE, J.C.; MOURA, C.A. Geochemistry and $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ zircon ages of granitoids from the southern portion of the Tamboril–Santa Quitéria granitic–migmatitic complex, Ceará Central Domain, Borborema Province (NE Brazil). **Journal of South American Earth Sciences**, v. 33, n. 1, 21-33. 2012.

ARAÚJO-JÚNIOR, H.I. Classifying vertebrate assemblages preserved in Quaternary tank deposits: Implications for vertebrate taphonomy and paleoecology. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 445, p. 147-152. 2015b.

ARAÚJO-JÚNIOR, H.I., PORPINO K.O., BERGQVIST, L.P. Taphonomic analysis of a late Pleistocene vertebrate accumulation from Lage Grande Paleontological Site, Pernambuco State, northeastern Brazil: New remarks on preservational aspects of tank deposits. **Quaternary International**, n. 317, p. 88-101. 2013b.

ARAÚJO-JÚNIOR, H.I.; MOURA, G.J.B. Anuros (Amphibia, Anura) do Pleistoceno Final-Holoceno inicial de Itapipoca, Estado do Ceará, Brasil: Taxonomia, paleoecologia e tafonomia. **Revista Brasileira de Paleontologia**, v. 17, n. 3, p. 373-388. 2014.

ARAÚJO-JÚNIOR, H.I.; PORPINO, K.O.; BERGQVIST, L.P. Vertebrate taphonomy and paleoecology in an Upper Pleistocene tank deposit of Paraíba, Brazil: Taphonomic modes, evidence of temporal and spatial resolutions and paleoecological patterns of the Brazilian Intertropical Region. **Palaeogeography Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 437, p. 1-17. 2015.

ARAÚJO-JÚNIOR, H.I.; PORPINO, K.O.; BERGQVIST, L.P.; AVILLA, L.S. Nova ocorrência de mamíferos do Quaternário nos tanques de Taperoá (Paraíba) e Alagoinha (Pernambuco), Nordeste do Brasil: Implicações Paleoambientais. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 40, n. 2, p. 37-46. 2017.

ARAÚJO-JÚNIOR, H.I.; PORPINO, K.O.; XIMENES, C.L.; BERGQVIST, L.P. Análise multivariada como ferramenta tafonômica no estudo das associações quaternárias de mamíferos do Nordeste do Brasil. **Gaea - Journal of Geoscience**, v. 7, n. 2, p. 104-111. 2011.

ARAÚJO-JÚNIOR, H.I.; PORPINO, K.O.; XIMENES, C.L.; BERGQVIST, L.P. Unveiling the taphonomy of natural tank deposits: a case study in the Pleistocene of northeastern Brazil. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, n. 378, p. 52-74. 2013a.

ARAÚJO-JÚNIOR, H.I.; BISSARO-JÚNIOR, M.C.; SANTOS, T.T.; ALVES, R.S.; BERGQVIST, L.P. Tafonomia da megafauna pleistocênica brasileira: fluvial transport index (FTI) em análises de representatividade óssea. **Revista Brasileira de Paleontologia**, v. 15, p. 95-104, 2012.

ARAÚJO-JÚNIOR, Herminio Ismael de. **Modelo tafonômico para vertebrados de depósitos de tanque do Nordeste do Brasil**. Rio de Janeiro, 2015a. 193 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015a.

ARAÚJO-JÚNIOR, H.I. Classifying vertebrate assemblages preserved in Quaternary tank deposits: Implications for vertebrate taphonomy and paleoecology. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 445, p. 147-152. 2016.

ARAÚJO-JÚNIOR, Herminio Ismael de. **Tafonomia da acumulação fossilífera de vertebrados pleistocênicos do Tanque do Jirau, Itapipoca, Estado do Ceará, Brasil**. Rio de Janeiro, 2012. 185 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

ARCHANJO, C.J.; HOLLANDA, M.H. Deformação e magmatismo na Zona de Cisalhamento Tauá (Ceará Central). *In*: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 25.; SIMPÓSIO DA PROVÍNCIA BORBOREMA, 3., 2013, Gravata. **Anais...** Gravata: SBG - Núcleo Nordeste, 2013. 1 CD Rom.

ARCHANJO, C.J.; LAUNEAU, P.; HOLLANDA, M.H.B.M.; MACEDO J.W.P.; LIU, D. Scattering of magnetic fabrics in the Cambrian alkaline granite of Meruoca (Ceará state, Northeastern Brazil). **International Journal of Earth Sciences**, v. 98, n. 8, p. 1793-1807. 2009.

ARTHAUD, M.H., FUCK, R.A., DANTAS, E.L., SANTOS, T.J.S., CABY, R.; ARMSTRONG, R. The Neoproterozoic Ceará Group, Ceará Central domain, NE Brazil: depositional age and provenance of detrital material. New insights from U-Pb and Sm-Nd geochronology. **Journal South American Earth Sciences**, n. 58, p. 223-237. 2015.

ARTHAUD, M.H.; CABY, R.; FUCK, R.A.; DANTAS, E.L.; PARENTE, C.V. Geology of the northern Borborema Province, NE Brazil and its correlation with Nigeria, NW Africa. *In*: PANKHURST, R.J.; TROUW, R.A.J.; BRITO NEVES, B.B.; DE WIT, M.J. (org.). **West Gondwana: Pre-Cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region**. London: Geological Society, 2008. p. 49-67.

ARTHAUD, Michel Henri. **Evolução neoproterozóica do Grupo Ceará (Domínio Ceará Central - NE do Brasil): da sedimentação a colisão continental brasileira**. Brasília, 2007. 170 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

BARNES, H. L. Cavitation as a geological agent. **American Journal Science**, v. 254, n. 8, p. 493-505. 1956.

BARRETO, A.M.F.; SILVA, F.M.; ALMEIRA, J.A.C.; LINS E SILVA, A.C.B. Os depósitos de cacimbas de Pernambuco: Aspectos geomorfológicos, geológicos, paleontológicos e paleoambientais. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 42, 2004, Belo Horizonte. **Resumos...** Belo Horizonte: SBG. 2004. p 1-2.

BARRETO, A.M.F.; SILVA, F.M.; KINOSHITA, A.; BAFFA, O.; MACARIO, J. Datação por EPR em dentes de *Haplomastodon* e *Xenorhinotherium* de lagoa de Dentro, Puxinanã, Paraíba. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA*, 18., 2003, Brasília. **Resumos...** Brasília: Universidade de Brasília, 2003. v. 1, p. 60-61.

BARTON, D.C. Notes on the disintegration of granite in Egypt. **Journal of Geology**, n. 24, p. 382-393. 1916.

BASTOS, F.H. Evidências morfológicas de condições paleoclimáticas úmidas no semiárido brasileiro. **Revista de Geografia** (Recife), v. 35, n. 4, p. 324-343. 2018.

BASTOS, F.H.; LIMA, D.L.S.; CORDEIRO, A.M.N.; MAIA, R.P. Relevos graníticos do Nordeste brasileiro: uma proposta taxonômica. *In: CARVALHO JUNIOR, O.A.; GOMES, M.C.V.; GUIMARÃES, R.F.; GOMES, R.A.T. Revisões de Literatura Geomorfológica Brasileira*. União de Geomorfologia Brasileira, 2022. p. 737-762.

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, p. 981-994. 2000

BELTRAMI, C.V.; ALVES, L.E.M.; FEIJÓ, F.J. Bacia do Ceará. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 8, n. 1, p. 117-125. 1994.

BERGQVIST, L.P.; GOMIDE, M.; CARTELLE, C.; CAPILLA, R. Faunas-locais de mamíferos pleistocênicos de Itapipoca / Ceará, Taperoá / Paraíba e Campina Grande / Paraíba: Estudo comparativo, bioestratinômico e paleoambiental. **Geociências**, v. 2, n. 6, p. 23-32. 1997.

BIGARELLA, J.J.; ANDRADE-LIMA, D.; RIEHS, P.J. Considerações a respeito das mudanças paleoambientais na distribuição de algumas espécies vegetais e animais no Brasil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, n. 47, p. 411-464. 1975.

BIGARELLA, João José. **Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais**. Vol. 1. Florianópolis: Ed. UFSC, 1994.

BLAIR, T.C.; MCPHERSON, J.G. Grain-size and textural classification of coarse sedimentary. **Journal of Sedimentary Research**, v. 69, n. 1, p. 6-19. 1999.

BORNHARDT, Friedrich Wilhelm Conrad Eduard. **Zur Oberflächengestaltung und Geologie Deutsch Ostafrikas**. Berlin: Reimer. 1900.

BRAGA, A. P. G.; PASSOS, C.A.B.; SOUZA, E.M.; FRANÇA, J.B.; MEDEIROS, M.F. **Projeto Fortaleza: relatório final**. Geologia. Recife: CPRM, v. 1. 1977.

BRAGA, I.F.; GOMES, I.P. **Geologia e recursos minerais da Folha Itapipoca - SA. 24-YD-II, Escala 1:100.000, Estado do Ceará**. Fortaleza: CPRM, p. 1-73 (1 mapa). 2018.

BRANNER, J.C. Da ocorrência de restos de mamíferos fósseis no interior dos Estados de Pernambuco e Alagoas. **Boletim Geográfico**, v. 68, p. 941-943. 1948.

BRANNER, J.C. Decomposição de rochas no Brasil II. **Boletim Geográfico**, v. 58, p. 1103-1112. 1948a.

BRANNER, J.C. Decomposição de rochas no Brasil II. **Boletim Geográfico**, v. 59, p. 1266-1300. 1948b.

BRANNER, J.C. Decomposition of rocks in Brazil. **Geological Society of America Bulletin**, v. 7, p. 255-314. 1896.

BRANNER, J.C. On the occurrence of fossil remains of mammals in the interior of the States of Pernambuco and Alagoas, Brazil. **American Journal of Science**, v. 13, p. 133-137. 1902.

BRANNER, J.C. The fluting and pitting of granites in the tropics. **American Philosophical Society**, v. 52, n. 209. 1913.

BRANNER, J.C. As caneluras e caldeirões dos granitos nos trópicos. **Boletim Geográfico**, v. 20, n. 171, p. 621-633. 1962.

BRANNER, John Casper. **Geologia elementar**. Rio de Janeiro: Livraria Francisco Alves. 1915.

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

BRITO NEVES, B.B. América do Sul: quatro fusões, quatro fissões e o processo acrescionário andino. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 29, p. 379-292. 1999.

BRITO NEVES, B.B.; CORDANI, U.G. Tectonic evolution of South America during the late proterozoic. **Precambrian Research**, v. 53, p. 23-40. 1991.

BRITO NEVES, B.B.; SANTOS, E.J.; VAN SCHMUS, W.R. Tectonic history of the Borborema Province. In: CORDANI, U.G., MILANI, E.J., THOMAZ FILHO, A.; CAMPO, D.A. (org.). **Tectonic Evolution of the South America**. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Geologia, p. 151-182, 2000.

BÜDEL, J. Die "Doppelten Einebnungsflächen" in den fenchten tropen. **Zeitschrift für Geomorphologie**, v. 1, n. 2, p. 201-228. 1957.

BÜDEL, Julius. **Climatic geomorphology**. Princeton: Princeton University Press, 1982.

BURLAMAQUE, F.L.C. Notícia acerca dos animaes de raças extinctas descobertos em vários pontos do Brasil. **Trabalhos da Sociedade Velloiana**, v. 20, p. 1-16. 1855.

BURLAMAQUE, F.L.C. Notícia acerca dos animaes de raças extinctas descobertos em vários pontos do Brasil. **Trabalhos da Sociedade Velloiana**, v. 20, p. 17-21. 1856.

- CAMPBELL, E.M. Granite landforms. **Journal of the Royal Society of Western Australia**, v. 80, n. 3, p. 101-112. 1997.
- CAMPBELL, E.M.; TWIDALE, C.R. The various origins of minor granite landforms. **Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe**, La Coruña, n. 20, p. 281-306. 1995.
- CAMPOS, M. **Projeto Rio Jaguaribe: relatório final**. Geologia. Recife: CPRM, v. 15, 1976.
- CAPANEMA, G.S. Decomposição de penedos no Brasil. **Boletim Geográfico**, n. 49, p. 8-20. 1947.
- CAPANEMA, Guilherme Schüch de. **Decomposição de penedos no Brasil**. Lição popular proferida em 25 de junho, Rio de Janeiro. 1866.
- CARRILLO, J.D.; FAURBY, S.; SILVESTRO, D.; ZIZKA, A.; JARAMILLO, C.; BACON, C.D.; ANTONELLI, A. Disproportionate extinction of South American mammals drove the asymmetry of the Great American Biotic Interchange. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 117, n. 42, p. 26281-26287. 2020.
- CARTELLE, C. Pleistocene Mammals of the Cerrado and Caatinga of Brazil. *In*: Eisenberg, J.F.; Redford, K.H. (org.). **Mammals of the Neotropics: the Central Tropics**. Chicago: The University of Chicago Press, p. 27- 46. 1999.
- CARVALHO, Ismar de Souza. **Paleogeografia: Cenários da Terra**. Rio de Janeiro: Interciência, 2023.
- CASAL, Manuel Aires de. **Corografia brazilica, ou Relação historico-geografica do Reino do Brazil**. Rio de Janeiro, Impressão Régia, 1817a.
- CASAL, Manuel Aires de. **Corografia brazilica, ou Relação historico-geografica do Reino do Brazil**. Rio de Janeiro, Impressão Régia, 1817b.
- CASTRO, Neivaldo Araújo de. **Evolução geológica proterozóica da região entre Madalena e Taparuaba, domínio tectônico Ceará Central (Província Borborema)**. São Paulo, 2004. 221 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- CAVALCANTE, J.C.; VASCONCELOS, A.M.; MEDEIROS, M.F.; PAIVA, I.G. **Atlas digital de geologia e recursos minerais do Ceará**. Fortaleza: CPRM, 2003. 1 CD-ROM. Escala 1:500.000.
- CAVALCANTE, José Carvalho. **Limites e evolução geodinâmica do sistema jaguaribeana, província Borborema, Nordeste do Brasil**. Natal, 1999. 183 f. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 1999.
- CHRISTOFOLETTI, Antonio. **Geomorfologia fluvial**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1981.

CHRISTOFOLETTI, Antonio. **Geomorfologia**. São Paulo: Editora Hucitec, 1980.

CIONE, Luis Alberto.; GASPARINI, Germán Mariano; SOIBELZON, Esteban; SOIBELZON, Leopoldo Héctor; TONNI, Eduardo Pedro. **The great American biotic interchange: A South American perspective**. Dordrecht: Springer. 2015.

CLAUDINO-SALES, V.C. Evolução morfoestrutural do relevo da margem continental do estado do Ceará, Nordeste do Brasil / Evolution morfoestrutural of the relief of the continental edge of the Ceará State, Northeast of Brazil. **Caminhos de Geografia**, v. 8, n. 20, p. 1-21. 2007.

CLAUDINO-SALES, V.C. **Les littoraux du Ceará - Evolution géomorphologique de la zona côtière de l'Etat du Ceará, Nord-est du Brésil**. Paris, 2002. 534 f. Thèse (Doctorat en Géographie) - Université Paris-Sorbonne, Paris, 2002.

CLAUDINO-SALES, V.C. Megageomorfologia do Nordeste Setentrional Brasileiro. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 35, n. 4, p. 442-454. 2018.

CLAUDINO-SALES, V.C.; CÔRREA, A.C.B.; MONTEIRO, K.A.; MAIA, R.P. 30. Estado da arte dos estudos geomorfológicos no nordeste brasileiro: uma síntese (e várias teses). *In*: CARVALHO JUNIOR, O.A.; GOMES, M.C.V.; GUIMARÃES, R.F.; GOMES, R.A.T. (org.). **Revisões de Literatura Geomorfológica Brasileira**. União de Geomorfologia Brasileira, 2022. p. 849-878.

CLAUDINO-SALES, Vanda Carneiro de. **Megageomorfologia do Estado do Ceará**. São Paulo: Nova Edições Acadêmicas, 2016.

CLAUDINO-SALES, Vanda Carneiro de. **Megageomorfologia do Noroeste do Ceará: História da Paisagem Geomorfológica**. Verlag/ Editora. Novas Edições Acadêmicas, 2016.

CLOOS, Hans. **Das Batholithenproblem**. Berlin: Borntraeger. 1923.

CONDE, V.C.; LANA, C.C.; PESSOA NETO, O.C.; ROESNER, E.H.; MORAIS NETO, J.M.; DUTRA D.C. Bacia do Ceará. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 15, n. 2, p. 347-355. 2007.

CORDEIRO, A.M.N.; ARAÚJO, R.B.; BASTOS, F. H.; SAMPAIO, A.C.P. Identificação das feições graníticas do município de Irauçuba - Ceará. **Revista da Casa da Geografia de Sobral**, v. 21, n. 2, p. 51-61. 2019a.

CORDEIRO, A.M.N.; CARVALHO, I.P.; BASTOS, F. H.; LIMA, D.L.S. O papel das estruturas litológicas na dinâmica e evolução do Maciço de Uruburetama, Ceará, Brasil. **Revista da Casa da Geografia de Sobral**, v. 21, n. 2, p. 81-93. 2019b.

CORDEIRO, A.M.N.; BASTOS, F.H.; MAIA, R.P. Formações Concrecionárias e Aspectos Genéticos e Evolutivos do Maciço do Quincuncá, Província Borborema, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, n. 2, p. 359-372. 2018.

CORRÊA, A.C.B.; TAVARES, B.A.C.; MONTEIRO, K.A.; CAVALCANTI, L.C.S.; LIRA, D.R. Megageomorfologia e morfoestrutura do Planalto da Borborema. **Revista do Instituto Geológico**, v.31, n. 1-2, p. 35-52. 2010.

COSTA, F.G.; ARAÚJO, C.E.G.; AMARAL, W.S.; VASCONCELOS, A.M.; RODRIGUES, J.B. U-Pb (LA-ICPMS) zircon ages and Nd isotopes for granitoids of the Tamboril-Santa Quitéria Complex, Ceará Central domain: implication for Neoproterozoic syncollisional magmatism in north Borborema Province. **Geologia USP - Série Científica**, v. 13, n. 2, p. 159-174. 2013.

COSTA, F.G.; DE ARAUJO, C.E.G.; VASCONCELOS, A.M.; PALHETA, E.S.M.; JUSTO, A.P., 2010. O Complexo Tamboril e Santa Quitéria: Evidências de Slab Breakoff durante colisão continental neoproterozóica, Norte da Província Borborema. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 45., 2010. Belém. **Anais...** Belém: SBG, 2010.

COSTA, I.G.; BELTRAMI, C.V.; ALVES, L.E.M. A evolução tectono-sedimentar e o "habitat" do óleo da Bacia do Ceara. *In*: SEMINÁRIO DE INTERPRETAÇÃO EXPLORATÓRIA, 1., Rio de Janeiro, 1989. **Anais...** Rio de Janeiro: Petrobras/Depex, v. 1, p. 75-85. 1990.

COSTA, L.R.F.; MAIA, R.P.; BARRETO, L.L.; CLAUDINO SALES, V.C. Geomorfologia do Nordeste setentrional brasileiro: uma proposta de classificação. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 1, p. 185-208. 2020.

CUNHA, Euclides da. **Os sertões: campanha de Canudos**. Rio de Janeiro; São Paulo: Laemmert C. 1905.

CUNHA, F.S.S; SILVA, F.C.A. Análise estrutural das Zonas de Cisalhamento da Região de Forquilha, Domínio Ceará Central da Província Borborema. Boletim de Resumos Expandidos. *In*: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS. 10., Curitiba, 2005. **Anais...** Curitiba: SBG, p. 507-510. 2005.

DANTAS, M.A.T.; BERNARDES, C., ASEVEDO, L.S.; RABITO, T.P.; FRANÇA, L.M.; ARAGÃO W.S.; SANTOS, F.S.; XIMENES, C.L. Isotopic palaeoecology ($\delta^{13}\text{C}$) of three faunivores from Late Pleistocene of the Brazilian intertropical region. **Historical Biology**, v. 34, n. 3, 507-514. 2021.

DANTAS, M.A.T.; CHERKINSKY, A.; LESSA, C.M.B.; SANTOS, L.V.; COZZUOL, M.A.; OMENA, É.C.; BOCHERENS, H. Isotopic paleoecology ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) of a late Pleistocene vertebrate community from the Brazilian Intertropical Region. **Revista Brasileira de Paleontologia**, v. 23, n. 2, p. 138-152. 2020.

DANTAS, M.A.T.; DUTRA, R.P.; CHERKINSKY, A.; FORTIER, D.C.; KAMINO, L.H.Y.; COZZUOL, M.A.; SOUZA RIBEIRO, A.; VIEIRA, F.S. Paleoecology and radiocarbon dating of the Pleistocene megafauna of the Brazilian intertropical region. **Quaternary Research**, v. 79, p. 61-65. 2013.

DEMANGEOT, Jean. **Os Meios Naturais do Globo**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2000.

DERRUAU, Max. **Geomorfología**. Barcelona: Ariel Geografía, 1983.

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. **Mapa Geológico do Estado do Ceará**. Fortaleza: DNPM; CPRM, 1 mapa, color., Escala 1:500.000, 1983.

DOMINGUES, A.J.P. Provável origem das depressões observadas no Sertão do Nordeste. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 14, n. 3, p. 65-75. 1952.

FALCONER, John Downie. **The Geology and Geography of Northern Nigeria**. London: MacMillan, 1911.

FARIA, F.H.C.; CARVALHO, I.S.; ARAÚJO-JÚNIOR, H.I. Genesis and taphonomic biases of Quaternary tank deposits of northeastern Brazil. **Quaternary Internacional**, v. 550, p. 184-193. 2020b.

FARIA, F.H.C.; KINOSHITA, A.; CARVALHO, I.S.; ARAÚJO-JÚNIOR, H.I.; PEGORIN, P.; MARIA G FIGUEIREDO, A.; BAFFA, O. ESR dating of late Quaternary megafauna fossils from João Dourado, Bahia, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, 101. 2020a.

FERNANDES, A.C.S., EWBANK, C.O., SILVA, M.J., HENRIQUES, D.D.R. Uma lembrança de infância: os "fósseis colossais" e o papel de Frederico Leopoldo César Burlamaque como paleontólogo brasileiro. **Filosofia e História da Biologia**, v. 5, n. 2, p. 239-259. 2010.

FERNANDES, A.C.S., RAMOS, R.R.C., SILVA, J.L.L., SILVA A.P.L. Do Nordeste para o Rio de Janeiro: Os tanques das primeiras remessas de fósseis de megafauna enviadas ao Museu Nacional. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA DE VERTEBRADOS, 7, 2012, Recife. **Boletim de Resumos...** Recife: SBPV, Edição Especial, p. 63-63. 2012.

FERNANDES, A.C.S., XIMENES, L.C., ANTUNES, M.T. Na Ribeira do Acaraú: João Batista de Azevedo Coutinho de Montauray e a descoberta documentada de megafauna no Ceará em 1784. **Filosofia e História da Biologia**, v. 8, n. 1, p. 21-37. 2013.

FERNANDES, A.C.S.; FONSECA, V.M.M.; HENRIQUES, D.D.R. History of Paleontology in the Museu Nacional. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 30, n. 1, 194-196. 2007.

FERREIRA, Bruno. **Geologia, geomorfologia e paleontologia da margem pernambucana do lago de Itaparica, Nordeste do Brasil**. Recife, 2010. 139 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, 2010.

FERREIRA, V.P.; SIAL, A.N.; JARDIM DE SÁ, E.F. Geochemical and isotopic signatures of Proterozoic granitoids in terranes of the Borborema Structural Province, Northeast Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 11, n. 5, p. 439-455. 1998.

FETTER, A.H.; SANTOS T.J.S.; SCHMUS, W.R.V.; 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. 6, n. 2, p. 265-273. 2003.

FETTER, Allen Hutcheson. **U/Pb and Sm/Nd Geochronological Constraints on the Crustal Framework and Geologic History of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the Assembly of Gondwana**. Kansas, 1999. 164 f. Thesis (Geological Science PhD) - Departament of Geology, Kansas University. 1999.

FORASIEPI, Analía; MARTINELLI, Agustín.; BLANCO, Jorge. **Bestiario fósil. Mamíferos del Pleistoceno de la Argentina**, Buenos Aires: Albatros. 2007.

FREIRE ALEMÃO. Uruburetama - Aspecto das montanhas que ficam a noroeste de São Francisco, onde se vê o Frade. Tirado da janela da Casa da Câmara. Manuscrito, 1f.; 22,00 x 32,50 cm. **Biblioteca Digital da Fundação Biblioteca Nacional**. 1860. Disponível em: <https://bdlb.bn.gov.br/acervo/handle/20.500.12156.3/428073>

FREITAS, Marcus Vinicius de. **Charles Frederick Hartt, um naturalista no Império de Pedro II**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2002.

GEBAUER E. Die Kesselsteine im Iser- und Riesengebirge. **Lotos - Zeitschrift für Naturwissenschaften**, v. 85, p. 1-18. 1937.

GODARD, Alain. **Pays et paysages du granite**. Paris: Presses Universitaires de France, 1977.

GOLDSTEIN, A; MARSHAK, S. Analysis of fracture array geometry. *In*: MARSHAK, S.; MITRA, G. (org.). **Basic methods of structural geology**. New Jersey: Prentice-Hall, 1988. p. 249-267.

GOUDIE, Andrew; VILES, Heather. **Landscapes and geomorphology: A very short introduction**. New York: Oxford University Press, 2010.

GRAHAM, Maria Dundas Callcott. **Journal of a Voyage to Brazil and residence there, during part of the years 1821, 1822, 1823**. London: Printed for Longman, Rees, Orme, Brown, and Green, 1824.

GUÉRIN, C. La faune pléistocène de la Lagoa da Pedra à Conceição das Creoulas / Salgueiro, Pernambouc, Brésil. **Clio - Arqueológica**, v. 1, n. 9. p. 15-20. 1993.

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.

HARTT, Charles Frederick. **Geologia e geografia física do Brasil**. São Paulo, Rio de Janeiro, Recife e Porto Alegre: Companhia Editora Nacional (Brasileira), 1941.

- HARTT, Charles Frederick. **Geology and physical geography of Brazil**. Boston: Fields, Osgood & CO, 1870.
- HASSENFRATZ, J.H. Sur l'arrangement de plusieurs gros blocs que l'on observe dans les montagnes. **Annales de Chimie**, v. 11, p. 95-107. 1791.
- HENDERSON, James. **A history of the Brazil comprising its geography, commerce, colonization, aboriginal inhabitants**. London, Published by Longman, Hurst, Rees, Orme and Brown, 1821.
- HUBP, J.L. **Diccionario geomorfológico**. Geografía para el Siglo XXI (Obra general). Serie Textos universitários. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México. 2011.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Geomorfologia**. Rio de Janeiro: IBGE, 2009.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Semiárido Brasileiro**. Rio de Janeiro: IBGE, 2018. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/mapas-regionais/15974-semiarido-brasileiro.html?edicao=24416&t=sobre>
- ICPT - International Committee for Phytolith Taxonomy - NEUMANN, K.; STRÖMBERG, C.A.E.; BALL, T.; ALBERT, R.M.; VRYDAGHS, L.; CUMMINGS, L.S. (org.). International Code for Phytolith Nomenclature (ICPN) 2.0. **Annals of Botany**, v. 124, n. 2, p. 189-199. 2019.
- JARDIM DE SÁ, Emanuel Ferraz. **A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e o seu Significado Geodinâmico na Cadeia Brasileira/Pan-Africana**. Brasília, 1994. 803 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília. 1994.
- JENNESS, J. **Polar Plots ArcGIS Extension. Jenness Enterprises**. 2014. Disponível em: http://www.jennessent.com/arcgis/Polar_Plots.htm. Acesso em 28 mai. 2020.
- JUTSON, John Thomas. **An outline of the physiographical geology (physiography) of Western Australia**. Geological Survey of Western Australia Bulletin 61, 1914.
- KINOSHITA, A.; BARRETO, A.M.F.; ALMEIDA, J.A.C.; FIGUEIREDO, A.M.; NICOLUCCI, P.; GRAEFF, C.F.O.; BAFFA, O. ESR dating at K and X band of northeastern Brazilian megafauna. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 62, p. 225-229. 2005.
- KINOSHITA, A.; BARRETO, A.M.F.; ALVES, R.; FIGUEIREDO, A.M.; SARKIS, J. E.S.; DIAS, M.L.; BAFFA, O. ESR dating of teeth from northeastern Brazilian megafauna. **Radiation Measurements**, v. 43, p. 809-812. 2008.
- KOSTER, H. 1816. **Travels in Brazil**. London: Longman, Hurst, Rees, Orme, and Brown.

- KRATIF, A. Uma excursão científica ao interior dessa província pelo Senhor J.L. Brunet. **Diário de Pernambuco - A Carteira**, 09 de maio de 1858, p. 1.
- LEITE, B. Água de Cacimba no Nordeste. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 16, n. 3, p. 389-390. 1954.
- LIMA, A.G.D. Rios de leito rochoso: aspectos geomorfológicos fundamentais Bedrock Rivers: fundamental geomorphologic aspects. **Ambiência**, v. 6, n. 2, p. 339-354. 2010
- LIMA, D.L.S.; BASTOS, F.H.; CORDEIRO, A.M.N.; MAIA, R.P. Geomorfologia granítica do Maciço de Uruburetama, Ceará, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n. 2, p. 373-395. 2019.
- LIMA, Danielle Lopes de Sousa. **Geomorfologia em estruturas graníticas: o caso do Maciço de Uruburetama, Ceará, Brasil**. Fortaleza, 2018. 258 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Estadual do Ceará. 2018.
- LIMA, J.S.; SILVA, J.L.L. Mamíferos fósseis pleistocênicos em tanque arenítico no município de Delmiro Gouveia, Alagoas, Brasil. **Estudos Geológicos**, v. 26, n. 2, p. 77-90. 2016.
- LIMA, M.G. VASCONCELOS, P.; FARLEY, K. JARDIM DE SÁ, E.F. Datação do intemperismo do Nordeste oriental do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 44., 2011, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SBG. 2011. v.1, p. 20. 2011.
- LIMA, Maria da Guia. **A história do intemperismo na Província Borborema Oriental, Nordeste do Brasil: implicações paleoclimáticas e tectônicas**. Natal, 2008. 594 f. Tese (Doutorado em Geodinâmica) - Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008.
- LISTO, D.G.S; BALDER, R.F.T.M.; CORRÊA, A.C.B.; RAMOS, D.A.M.C.; CALEGARI, M.R. Weathering pits as a geochronometer of environmental changes in the State of Pernambuco, Northeastern Brazil. **Quaternary International**, 2022.
- LIU, Chan Chiang. **Análise estrutural de lineamentos em imagens de sensoriamento remoto: aplicação ao estado do Rio de Janeiro**. São Paulo, 1984. 157 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade de São Paulo, 1984.
- LOGAN, J.R. Notices of the geology of the Straits of Singapore. **The Quarterly Journal of the Geological Society of London**, v. 7, p. 310-344. 1851.
- LOGAN, J.R. The rocks of "Palo Ubin". **Genootschap van Kunsten Wetenschappen** (Batavia), v. 22, p. 3-43. 1849.
- MABBUTT, J.A.A stripped landsurface in western Australia. **Transactions of the Institute of British Geographers**, v. 29, p. 101-114. 1962.

MABESOONE, J.M.; CASTRO, C. Desenvolvimento geomorfológico do Nordeste Brasileiro. **Boletim do Núcleo Nordeste da Sociedade Brasileira de Geologia**, v. 3, p. 5-35. 1975.

MABESOONE, J.M.; OLIVEIRA, L.D.D.; DAMASCENO, J.M. Desenvolvimento dos tanques fossilíferos no semi-árido norterio-grandense. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36., 1990, Natal. **Anais...** Natal: SBG. 1990. v. 2, p. 733-741. 1990.

MACHADO, Ricardo Mattos. **Potencialidades para o desenvolvimento do geoturismo no município de Itapipoca (CE)**. Fortaleza, 2019. 181 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do Ceará. 2019.

MAIA, R.P.; BEZERRA, F.H.R.; CLAUDINO-SALES, V.C. Geomorfologia do Nordeste: Concepções clássicas e atuais acerca das superfícies de aplainamento. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 27, p. 6-19. 2010.

MAIA, R.P.; NASCIMENTO, M.A.L. Relevos graníticos do nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, n. 2, p. 373-389. 2018.

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. 16, n. 2, p. 239-253. 2015.

MAIA, R.P.; BÉTARD, F.; BEZERRA, F.H.R. Geomorfologia dos maciços de Portoalegre e Martins - NE do Brasil: inversão do relevo em análise. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, n. 2, p. 273-285. 2016.

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

MAIA, Rubson Pinheiro; BASTOS, Frederico de Holanda.; NASCIMENTO, Marcos Aantônio Leito do; LIMA, Danielle Lopes de Sousa Lima; CORDEIRO, Abner Monteiro Nunes. **Paisagens graníticas do Nordeste brasileiro**. Fortaleza: Edições UFC, 2018.

MAIA, Rubson Pinheiro; BEZERRA, Francisco Hilário Rego. **Structural Geomorphology in Northeastern Brazil**. Springer Cham. 2020.

MATOS, R.M.D. Tectonic evolution of the Equatorial South Atlantic. **American Geophysical Union - Geophysical Monograph**, v. 115, p. 331-354. 2000.

MAYOR RODRÍGUEZ, Juan Antonio. **Génesis de cavidades graníticas en ambientes endógenos y exógenos**. La Coruña, 2011. 396 f. Tese (Doutorado em Geología). Instituto Universitario de Geología Isidro Parga Pondal, Universidad de Coruña. 2011.

MENEZES, Carlos Alberto de. **Biographia do professor americano Carlos Frederico Hartt, chefe da Comissão Geológica do Brasil, falecido no Rio de Janeiro a 18 de março de 1878**. Rio de Janeiro: Typografia do Apóstolo, 1878.

MIGONÍ, Piotr. **Geomorphological landscapes of the world**. New York: Springer, 2010.

MIGONÍ, Piotr. **Granite landscapes of the world**. New York: Oxford University Press Inc, 2006.

MOLNAR, P. Late Cenozoic increase in accumulation rates of terrestrial sediment: how might climate change have affected erosion rates? **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, n. 32, p. 67-89. 2004.

MORAES RÊGO, L.F. O Reconhecimento Geológico da parte ocidental do Estado da Bahia. **Boletim do Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil**, n. 17, p. 33-54. 1926.

MORAES, L.J. Estudos geológicos no Estado de Pernambuco. **Boletim do Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil**, n. 32, p. 1-98. 1928.

MORAES, Luciano Jacques de. **Serras e montanhas do Nordeste**. Rio de Janeiro: Inspetoria Federal de Obras Contra as Secas, 1924.

MORAIS NETO, J.M.; PESSOA NETO, O.C.; LANA, C.C.; ZALAN, P.V. Bacias sedimentares brasileiras: Bacia do Ceara. **Phoenix**, v. 57, p. 1-6. 2003.

MORAIS NETO, João Marinho. 1999. **As coberturas sedimentares terciárias do interior da Paraíba, e Rio Grande do Norte e a gênese da Antéclise da Borborema**. Ouro Preto, 1999. 170 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, 1999.

MOURA FÉ, Marcelo Martins de. **Evolução geomorfológica do sítio natural de Fortaleza, Ceará**. Fortaleza, 2008. 242 f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal do Ceará. 2008.

MOURA, J.R.S. Geomorfologia do Quaternário. *In*: GUERRA, A.J.T. e CUNHA, S.B. (org.). **Geomorfologia: Uma Atualização de Bases e Conceitos**, 7ª ed.; Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 335-364. 2007.

MOURA-FÉ, M.M. Evolução morfoestrutural cretácica da Ibiapaba setentrional, região noroeste do estado do Ceará. **Geo UERJ**, n. 31, p. 389-416. 2017.

NALETO, J.L.C. **Geologia e recursos minerais da folha Irauçuba SA.24-Y-D-V Escala 1:100.000: Estado do Ceará**. Fortaleza: CPRM, p. 1-79 (1 mapa). 2018.

NEIVA, A.; PENNA, B. Viagem científica pelo norte da Bahia, sudoeste de Pernambuco, sul do Piauí e de norte a sul de Goiaz (Estudos feitos à requisição da Inspetoria de Obras contra a seca). *In*: **Memórias do Instituto Oswaldo Cruz**. Rio de Janeiro - Manguinhos, tomo 8, fascículo 3, p. 74-224. 1916.

NEVES, S.P. Diferenciação de magmas graníticos em Zonas de Cisalhamento: o caso de Tauá, Ceará. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 19, n. 3, p. 303-309. 1989.

NEVES, Sérgio Pacheco. **Granitos Orogênicos: da geração dos magmas à intrusão e deformação**. Rio de Janeiro: Synergia. 2012.

NOGUEIRA, Johnson Fernandes. **Estrutura, geocronologia e alojamento dos batólitos de Quixadá, Quixeramobim e Senador Pompeu - Ceará Central**. Rio Claro, 2004. 123 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2004.

O'LEARY, D.W.; FRIEDMAN, J.D.; POHN, J.A. Lineament linear lineation: some proposed new standards for old terms. **Bulletin of Geological Society of America**, v.87, n.10, p. 1463-1476. 1976.

OLIVEIRA, F.F. Um testemunho de 30 mil anos. **Revista do Instituto do Ceará**, V. 85, p. 285-289. 1971.

OLIVEIRA, Karen Maria Leopoldino. **Characterization of deepwater reservoirs in a frontier basin in the Brazilian equatorial margin: from seismic processing to machine learning approach**. Fortaleza, 2020. 136 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará, 2020.

OLIVEIRA, A.I.; LEONARDO, O.H. **Geologia do Brasil**. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura - Serviço de Informação Agrícola, 1943.

OLIVEIRA, L.D.D. Considerações sobre o emprego da terminologia da "formação cacimbas" e caldeirões para os tanques fossilíferos do nordeste do Brasil. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA, 11., 1989, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SBP. 1989. v. 1, p. 535-539. 1989.

OLIVEIRA, L.D.D.; DAMASCENO, J.M.; LINS, F.A.P.L.; MEDEIROS, W.E.; MOREIRA, J.A. Estudo microfossilífero dos tanques da Fazenda Capim Grosso, São Rafael - RN, auxiliado por métodos geofísicos. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA, 11., 1989, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SBP. 1989. v. 1, p. 551-563.

OLIVEIRA, L.D.D.; HACKSPACHER, P.C. Gênese e provável idade dos tanques fossilíferos de São Rafael-RN. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA, 11., 1989, Curitiba. **Anais...** Curitiba, SBP, v. 1, p. 541-549. 1989.

OLIVEIRA, P.E.; 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, Palaeoecology**, n. 152, p. 319-337. 1999.

OLIVEIRA, P.E.; PESSENDA, L.C.R.; BARRETO, A.M.F.; OLIVEIRA, E.V.; SANTOS, J.C.D. Paleoclimas da caatinga brasileira durante o quaternário tardio. *In*: CARVALHO, I.S.; GARCIA, M.J.; LANA, C.C.; STROHSCHOEN J.R. (org.).

Paleontologia Cenários da vida - Paleoclimas. Rio de Janeiro: Interciência, v. 5, p. 501 - 516, 2014.

OLLIER, C.D. Some features of granite weathering in Australia. **Zeitschnft für Geomorphologie**, v. 9, p. 285-304. 1965.

OLLIER, Clifford David. **Weathering.** New York: Longman, 1984.

PARENTE, C.V.; ALMEIDA, A.R.; ARTHAUD, M.H. **Geologia da folha Quixeramobim SB.24-V-D-III: escala 1:100.000.** Brasília: CPRM, 2008. Programa Geologia do Brasil - PGB; Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - PLGB.

PAULA COUTO, C. Relatório e prestação de contas de excursão. **Arquivo do Museu Nacional**, não publicado. Rio de Janeiro, 15 p. 1961.

PAULA COUTO, C. Considerações sobre o Pleistoceno sul-americano. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 23, n. 3, p. 569-574. 1961.

PAULA COUTO, C. Explorações paleontológicas no Pleistoceno do Nordeste. **Sessões da Academia Brasileira de Ciências**, v. 34, n. 3, p. 8. 1962.

PAULA COUTO, C. Fossil Pleistocene to sub-recent mammals from northeastern Brazil. I-Edentata Megalonychidae. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 52, n. 1, p. 144-151. 1980.

PAULA COUTO, Carlos de. **Paleontologia Brasileira: Mamíferos.** Rio de Janeiro: Instituto Nacional do Livro, 1953.

PAULA COUTO, Carlos de. **Tratado de Paleomastozoologia.** Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 1979.

PEDRAZA, J.G. Los modelos genéticos evolutivos del Sistema Central Español: Implicaciones morfotectónicas. **Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe**, La Coruña, n. 19, p. 91-118. 1994.

PEDRAZA, J.G.; SANZ, Miguel Angel.; MARTÍN, Aurora. **Formas graníticas de la Pedriza.** Madrid: Agencia de Medio Ambiente de la Comunidad de Madrid, 1989.

PEDRAZA, Javier Gilsanz. **Geomorfología: Principios, Métodos y Aplicaciones.** Madrid: Ed. Rueda, 1996.

PEEL, R.F. The landscape in aridity. **Transactions of the Institute of British Geographers**, n. 38, p. 1-23. 1966.

PESSOA NETO, O.C., Estratigrafia de seqüências da plataforma mista neogênica na Bacia Potiguar, margem equatorial brasileira. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 33, p. 263-278. 2003.

- PEREIRA, J.V.C. Vultos da Geografia do Brasil - Barão de Capanema. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 7, n. 1, p. 140-142. 1945.
- PESSOA NETO, O.D.C; SOARES, U.M; SILVA, J.D., ROESSNER, E.H., FLORENCIO, C.P; SOUZA, C.D. Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 15, n. 2, p. 357-369. 2007.
- PEULVAST, J. P; BÉTARD, F. A history of basin inversion, scarp retreat and shallow denudation: the Araripe Basin as a keystone for understanding long-term landscape evolution in NE Brazil. **Geomorphology**, v. 233, p. 20-40. 2015.
- PEULVAST, J.P.; CLAUDINO SALES, V. Aplainamento e geodinâmica: revisitando um problema clássico em geomorfologia. **Mercator**, v. 1, n. 1, p. 113-150. 2002.
- PEULVAST, J.P.; CLAUDINO-SALES, V. Dispositivos Morfo-Estruturais e Evolução Morfotectônica da Margem Passiva Transformante do Nordeste Brasileiro. *In*: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 3., 2000, Campinas, **Anais...** Campinas, UGB. 2000.
- PEULVAST, J.P.; CLAUDINO-SALES, V.; BÉTARD, F; GUNNELL, Y. Low post Cenomanian denudation depths across the Brazilian Northeast: Implications for long-term landscape evolution at a transform continental margin. **Global and Planetary Change**, v. 62, n. 1-2, p. 39-60. 2008.
- PEULVAST, J.P.; CLAUDINO-SALES, V.C. **Carta morfoestrutural do Ceará e áreas adjacentes do Rio Grande do Norte e da Paraíba**. Fortaleza: CPRM, Atlas digital de geologia e recursos minerais do Ceará. Mapas na escala 1:500.000. Serviço Geológico do Brasil, CD Rom, 2003.
- PEULVAST, J.P.; CLAUDINO-SALES, V.C. Stepped surfaces and palaeolandforms in the Northern Brazilian «Nordeste»: Constraints on models of morphotectonic evolution. **Geomorphology**, v. 62, p. 89-122. 2004.
- PEULVAST, J.P.; CLAUDINO-SALES, V.C. Surfaces d'aplanissement et geodynamique. **Géomorphologie (Paris) JCR**, Paris, v. 4, p. 249-274. 2005.
- PEULVAST, J.P.; CLAUDINO-SALES, V.C.; BEZERRA, F.H.R.; BÉTARD, F. Landforms and neotectonics in the Equatorial passive margin of Brazil. **Geodinamica Acta**, v. 19, p. 51-71. 2006.
- PEULVAST, Jean-Pierre; BÉTARD, François. **Landforms and landscape evolution of the equatorial margin of Northeast Brazil**. Cham: Springer, 2015.
- POMEROL, Charles; LAGABRIELLE, Yves; RENARD, Maurice.; GUILLOT, Stéphane. **Princípios da Geologia: Técnicas, modelos e teorias**, 14ª edição. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- RIBEIRO, R.; KINOSHITA, A.; ARAÚJO-JÚNIOR, H.I.; FIGUEIREDO, A.M.G.; CARVALHO, I.S.; BAFFA, O. ESR dating of Toxodon teeth from Baixa Grande, Bahia, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 112, 103616. 2021.

- RIBEIRO, R.; KINOSHITA, A.; FIGUEIREDO, A.M.G.; CARVALHO, I.S.; BAFFA, O. Electron Spin Resonance dating of the Late Quaternary megafauna fossils from Baixa Grande, Bahia, Brazil. **Quaternary International**, v. 305, p. 91-96. 2013.
- RODRIGUES, S.W.O.; ARCHANJO, C.J.; GROHMANN, C.H. Quantificação da Deformação Finita nos Metagranitoides Cariris Velhos na Região de Alagoa Grande (PB). **Geologia USP - Série científica**, v. 10, n. 3, p. 57-78. 2010.
- RODRIGUES, W.F.; MAIA, R.P.; GOMES, D.D.M. Condicionamento morfoestrutural do Inselberg Pedra da Andorinha, sertão norte do Ceará, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n. 4, p. 861-876. 2019.
- ROLIM, J.L. Pesquisas de Mamíferos Pleistocênicos no Nordeste Brasileiro. **Coleção Mossoroense**, v. 183, p. 5-11. 1982.
- ROLIM, José Lins. **Paleontologia e Estratigrafia do Pleistoceno continental do Nordeste Brasileiro "Formação Cacimbas"**. Porto Alegre, 1974. 117 f. Dissertação (Mestrado em Paleontologia) - Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1974.
- 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.
- ROTTI, A.; VEZZOSI, R.I.; MOTHE, D.; AVILLA, L. Rising from the ashes: The biggest South American deers (Cetartiodactyla: Cervidae) once roamed Northeast Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 108, 103154. 2021.
- RUELLAN, F. Evolução geomorfológica da baía de Guanabara e das regiões vizinhas. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 6, n. 4, p. 445-508. 1944.
- SABINS JUNIOR., Floyd. **Remote sensing, principles and interpretation**. San Francisco, CA.: W. H. Freeman, 1978.
- SAMPAIO, L.F.; BÓ, P.F.D.; BASILICI, G.; MARINHO, T.S. Interpretação paleoambiental dos calcetres da Formação Marília na região de Uberaba (MG). **Geologia USP - Série Científica**, v. 17, n. 2, p. 193-210. 2017.
- SANTOS JÚNIOR, V., ROCHA, L.C.M., OLIVEIRA, D.L., GONZAGA, S.P.F., ARAÚJO, M.R. Os vestígios arqueológicos e paleontológicos em tanques naturais das microrregiões de Angicos, oeste e Serra de Santana, Rio Grande do Norte, Brasil. **Revista Tarairiú**, v. 1, n. 10, p. 76-89. 2015.
- SANTOS JÚNIOR, V.; PORPINO, K.O.; ABRAAHÃO, S. A megafauna extinta e os artefatos culturais de um tanque natural na região central do Rio Grande do Norte. **Contexto (Mossoró)**, v. 3, p. 176-193. 2008.

SANTOS JÚNIOR, Valdecí. **Registros rupestres da área arqueológica de Santana (RN)**. Recife, 2005. 229 f. Dissertação (Mestrado em Arqueologia) - Programa de Pós-graduação em Arqueologia, Universidade Federal de Pernambuco, 2005.

SANTOS, E.J. Ensaio preliminar sobre terrenos e tectônica acrescionária na Província Borborema. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 39., 1996. Salvador. **Anais...** Salvador: SBG, 1996, v. 6, p. 47-50.

SANTOS, E.J.; BRITO NEVES, B.B. Província Borborema. *In*: ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y. (org.). **O Pré-cambriano do Brasil**. São Paulo: Edgard Blucher, p.123-186. 1984.

SANTOS, F.L.; NASCIMENTO, F.R.; HACKSPACHER, P.C.; RIBEIRO, M.C.S.; SILVA, B.V.; GODOY, D.F. Termocronologia aplicada à evolução geomorfológica do nordeste setentrional do Brasil: uma breve revisão. *In*: CARVALHO JUNIOR, O.A.; GOMES, M.C.V.; GUIMARÃES, R.F.; GOMES, R.A.T. (org.). **Revisões de Literatura Geomorfológica Brasileira**. União de Geomorfologia Brasileira, 2022. p. 681-704.

SANTOS, J.M.; SALGADO, A.A.R. Gênese da superfície erosiva em ambiente semiárido - Milagres/BA: considerações preliminares. **Revista de Geografia (Recife)**, v. especial, n. 1, p. 236-247, 2010.

SANTOS, M.F.C.F.; BERGQVIST, L.P.; LIMA-FILHO, F.P.; PEREIRA, M.M.V. Feições tafonômicas observadas em fósseis pleistocênicos do Rio Grande do Norte. **Revista de Geologia**, v. 15, p. 31-41. 2002.

SANTOS, Maria de Fátima Cavalcante Ferreira dos. **Geologia e paleontologia de depósitos fossilíferos pleistocênicos do Rio Grande do Norte**. Natal, 2006. 81 f. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica). Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2006.

SANTOS, R.S. Fauna Cenozoica da Região Nordeste do Brasil. **Coleção Mossoroense**, v. 15, n. 233, p. 1-141. 1982.

SANTOS, R.V.; OLIVEIRA C.G.; PARENTE C.V.; GARCIA, M.G.M.; DANTAS, E. L. Hydrothermal alteration related to a deep mantle source controlled by a Cambrian intracontinental strike-slip fault: evidence for the Meruoca felsic intrusion associated with the Transbraziliano Lineament, Northeastern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 43, p. 33-41. 2013.

SANTOS, T J.S., FETTER, A.H., NOGUEIRA NETO, J.A. Comparisons between the northwestern Borborema Province, NE Brazil, and the southwestern Pan-African Dahomey Belt, SW Central África. *In*: PANKHURST, R.J.; TROUW, R.A.J.; BRITO NEVES, B.B.; WIT, M.J. (org.). **West Gondwana: Pre-cenozoic correlations across the South Atlantic Region**. London: Geological Society, 2008. p. 101-120. (Special Publications, 294).

SHIMABUKURO, S.; ARAI, M.A. Discordância Tortonianiana e sua relação com o arcabouço estratigráfico do Grupo Barreiras e unidades correlatas (Neógeno do Brasil).

In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA, 17., 2001, Rio Branco.
Boletim de Resumos... Rio Branco: SBP, 2001, p. 54.

SILVA F.M.; FILGUEIRAS C.F.C.; BARRETO A.M.F.; OLIVEIRA E.V. Mamíferos do Pleistoceno Superior de Afrânio, Pernambuco, nordeste do Brasil. **Quaternary and Environmental Geosciences**, v. 2, n. 2, p. 1-11. 2010.

SILVA FILHO, Wellington Ferreira da. **Domínios morfoestruturais da plataforma continental do Estado do Ceará**. Porto Alegre, 2004. 288 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

SILVA, D.; CORRÊA, A.; ALVES, R.; BARRETO, A.; MELO, J.; SOUZA, A. Análise Geomorfológica e Sedimentológica dos Depósitos de Tanques em Fazenda Nova, Brejo da Madre de Deus-PE. *In*: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 6., 2006, Goiânia. **Anais...** Goiânia: UGB, 2006. p. 1-11.

SILVA, D.G.; CORRÊA, A.C.B. Evolução paleoambiental dos depósitos de tanques em Fazenda Nova, Pernambuco - Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 2, n. 2, p. 43-56. 2009.

SILVA, D.G.; CORRÊA, A.C.B.; AMORIM, R.F. Caracterização morfológica e dinâmica ambiental das marmitas de dissolução (weathering pit) no distrito de Fazenda Nova, Pernambuco - Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 18, n. 2, p. 349-362. 2017.

SILVA, D.G.; MELO, R.F.T; CORREA, A.C.B. A influência da Densidade de Drenagem na Interpretação da Evolução Geomorfológica do Complexo de Tanques do Município de Brejo da Madre de Deus Pernambuco, Nordeste do Brasil. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 26, p. 294-306. 2009.

SILVA, Danielle Gomes da. **Evolução paleoambiental dos depósitos de tanques em Fazenda Nova, Município de Brejo da Madre de Deus - Pernambuco**. Recife, 2007. 154f. Tese (Doutorado em Geografia) - Departamento de Ciências Geográficas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2007.

SILVA, Fabiana Marinho. **Tafonomia em tanque de Fazenda Nova, município de Brejo da Madre de Deus, Estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil**. Recife, 2013. 95 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2013.

SKLAR, L.S.; DIETRICH, W.E. Sediment and rock strength controls on river incision into bedrock. **Geology**, v. 29, n. 12, p.1087-1090. 2001.

SOBREIRA, Caesar. **Diálogo das grandezas do Brasil: primeira edição do apógrafo de Lisboa**. Recife: Cepe Editora, 2019.

SOBRINHO, T.P. Estrutura geológica do Ceará: noções estratigráficas e geogenia. **Revista do Instituto do Ceará**, n.55, p. 159-175. 1941.

- SOUSA, Antônio Sávio Magalhães. **As unidades fitoecológicas do município de Itapipoca/CE: fatores condicionantes do estado de conservação**. Fortaleza, 2009. 116 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.
- SOUZA CUNHA, F.L. Relatório de excursão ao Nordeste. Rio de Janeiro, **Arquivo do Museu Nacional**, não publicado, p. 8. 1961.
- SPIX, Johann Baptist von; MARTIUS, Carl Friedrich Philipp von. **Reise in Brasilien in den Jahren 1817 bis 1820**. München: I.J. Lentner, 1828.
- SPIX, Johann Baptist von; MARTIUS, Carl Friedrich Philipp von. **Travels in Brazil in the years 1817-1820**. London: A. & R. Spottiswoode, 1824.
- SPIX, Johann Baptist von; MARTIUS, Carl Friedrich Philipp von. **Viagem pelo Brasil: 1817-1820**. São Paulo: Edições Melhoramentos, 1968.
- TERRY, J.P.; GOFF, J. Megaclasts: Proposed revised nomenclature at the coarse end of the Udden-Wentworth grain-size scale for sedimentary particles Grain-size and textural classification of coarse sedimentary. **Journal of Sedimentary Research**, v. 84, n. 3, p. 192-197. 2014.
- THOMAS, M.F. Some geomorphological implications of deep weathering patterns in crystalline rocks in Nigeria. **Transactions of the Institute of British Geographers**, n. 40, p. 173-191. 1966.
- THOMAS, M.F. The Study of Inselbergs. **Zeitschrift für Geomorphologie**, Supplementary Band, v. 31, p. 1-41. 1978.
- TRICART, J.; RAYNAL, R.; BESANÇON, J. Cônes rocheux, pédiments, glaciais. **Annales de Géographie**, n. 443, p. 1-24. 1972.
- TWIDALE, C.R. Granite landform evolution: Factors and implications. **Geologische Rundschau**, v. 75, n. 3, p. 769-779. 1986a.
- TWIDALE, C.R. Granite platforms and low domes: newly exposed compartments or degraded remnants? **Geografiska Annaler**, v. 68, n. 4, p. 399-411. 1986b.
- TWIDALE, C.R. Granitic bornhardts: Their morphology, characteristics and origins. **The Bulletin of the Geological Society of Malaysia**, v. 42, p. 237-255. 1998.
- TWIDALE, C.R. La Iniciación subsuperficial de las formas graníticas y sus implicaciones en las teorías generales de evolución del paisaje. **Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe**, La Coruña, n. 13, p. 49-68, 1989.
- TWIDALE, C.R. Origin of Wave Rock, Hyden, Western Australia. **Transactions of the Royal Society of South Australia**, n. 92, p. 115-123. 1968.

TWIDALE, C.R. The research frontier and beyond: granitic terrains. **Geomorphology**, v. 7, p. 187-223. 1993.

TWIDALE, C.R. The two-stage concept of landform and landscape development involving etching: origin, development and implications of an idea. **Earth-Science Reviews**, v. 57, p. 37-74. 2002.

TWIDALE, C.R.; BOURNE, A.; TWIDALE, N. Shore platforms and sealevel changes in the Gulfs region of South Australia. **Transactions of the Royal Society of South Australia**, n. 101, p. 63-74. 1977.

TWIDALE, Charles Rowland. **Granite landforms**. Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 1982.

TWIDALE, Charles Rowland.; VIDAL-ROMANÍ, Juan Ramón. **Landforms and geology of granitic terrains**. Leiden: Balkema, 2005.

UÑA ALVAREZ, E.; ROMANI, J.V. Procesos degradativos en antiguas superficies grabadas sobre granitos: Indicadores de magnitud y patrones de estado. **Geogaceta**, v. 28, p. 745-748. 2000.

VAUCHEZ, 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. 3-4, p. 247-266. 1995.

VIDAL ROMANÍ, J.R.; TWIDALE, C.R. Sheet fractures, other stress forms and some engineering implications. **Geomorphology**, v. 31, n. 1-4, p. 13-27. 1999.

VIDAL ROMANÍ, J.R.; TWIDALE, C.R., CAMPBELL, E.M.; CENTENO, J.D.D. 1995. Pruebas morfológicas y estructurales sobre el origen de las fracturas de descamación. **Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe**, La Coruña, n. 20, p. 307-346. 1995.

VIDAL ROMANÍ, J.R.; YEPES TERMIÑO, J. Historia de la morfogénesis granítica. **Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe**, La Coruña, n. 29, p. 331-360. 2004.

VIDAL-ROMANÍ, J.R. Estudio teórico sobre el origen de las características morfológicas de las pias (gnamma, vasque). **Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe**, La Coruña, n. 9, p. 133-168. 1985.

VIDAL-ROMANÍ, J.R. Formas menores en rocas graníticas un registro de su historia deformativa. **Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe**, La Coruña, n. 15, p. 317-328. 1990.

VIDAL-ROMANÍ, J.R. Forms and structural fabric in granite rocks. **Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe**, La Coruña, n. 33, p. 175-198. 2008.

VIDAL-ROMANÍ, J.R. Geomorfología granítica en Galicia (NW España). **Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe**, La Coruña, n. 13, p. 89-163, 1989.

VIDAL-ROMANÍ, J.R. Microformas graníticas tipo tafoni (cachola) y gnamma (pia) - Un micromodelado sin relación con el clima o la estacionalidad. **Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe**, La Coruña, n. 7, p. 273-277, 1984.

VIDAL-ROMANÍ, J.R.; UÑA ALVAREZ, E.; VAQUEIRO RODRÍGUEZ, J. An endogenous origin for the form tafone developed in magmatic rocks. *In*: REUNIÓN NACIONAL DE GEOMORFOLOGÍA, 8., 2014, Cáceres. **Resumos...** Cáceres, Relieves Graníticos y Cársticos, 2014a. p. 486-489.

VIDAL-ROMANÍ, J.R.; VAQUEIRO RODRÍGUEZ, M.; SANJURJO SÁNCHEZ, J. Granite landforms in Galicia. *In*: GUTIÉRREZ, F.; GUTIÉRREZ, M. (org.). **Landscapes and landforms of Spain**. Dordrecht: Springer, p. 63-69. 2014b.

VIDAL-ROMANÍ, J.R.; VAQUEIRO RODRÍGUEZ, M.; VÁZQUEZ, R.C. **Geología 18 - Ría de Aldán**. Salamanca: Colección Geología - Sociedad Geológica de España, 2018.

VIDAL-ROMANÍ, Juan Ramón; TWIDALE, Charles Rowland. **Formas y paisajes graníticos**. La Coruña: Universidad da Coruña Servicio de Publicaciones, 1998.

VIEIRA, A. Alguns aspectos da paisagem da Serra de Montemuro. Formas de pormenor do modelado granítico. *In*: Escola Superior de Educação da Guarda (org.). **Livro de Homenagem a José Miguel Carreira Amarelo**. Guarda: ESEG Publicações, p. 193-205. 2003

VILLAR, D.D. **Análisis morfométrico de pilancones: Consideraciones genéticas, evolutivas y paleoambientales**. Madrid, 2007. 319 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, Madrid. 2007.

VITTE, A.C. Considerações sobre a teoria da etchplanação e sua aplicação nos estudos das formas de nas regiões tropicais quentes e úmidas. **Revista Terra Livre**, São Paulo, v. 1, n. 16, p. 11- 24. 2001.

VITTE, A.C. Etchplanação dinâmica e episódica nos trópicos quentes e úmidos. **Revista do Departamento de Geografia da USP**, São Paulo, n. 16, p. 105-118. 2005.

WALDHERR, F.R.; ARAÚJO-JÚNIOR, H.I.; RODRIGUES, S.W.O. Origem e morfologia de tanques naturais do Nordeste do Brasil. **Pesquisas em Geociências**, v. 44, n. 3, p. 467-488. 2017a.

WALDHERR, F.R., ARAÚJO-JÚNIOR, H.I., RODRIGUES, S.W.O., TUPINAMBÁ, M.A.S., VAZ, O.R. Tanques naturais: Considerações sobre origem e morfologia e descrição da primeira ocorrência fora do Nordeste do Brasil. *In*: Simpósio De Geologia Do Sudeste, 10., 2017, Diamantina. **Anais...** Diamantina, SBG, 2017b.

WALDHERR, F.R.; ARAÚJO-JÚNIOR, H.I.; RODRIGUES, S.W.O.; XIMENES, C.L. La importancia de los tanques naturales (mega gnammas) en la preservación de fósiles de la Megafauna cuaternaria en el Noreste de Brasil. **Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe**, La Coruña, n. 41, p. 99-122. 2019.

- WALDHERR, F.R.; SILVA, T.M.; XIMENES, C.L.; ARAÚJO-JÚNIOR, H.I.; RODRIGUES, S.W.O. Geomorphological aspects of the Jirau 01 fossiliferous natural tank, municipality of Itapipoca, Ceará state, Brazil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 23, n. 2, p. 1317-1333. 2022.
- WANG X.F.; 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** n. 432, p. 40-43. 2004.
- WANG, W.; HUANG, R.; FENG, J. A new method for determining weathering rates in weathering pits. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 45, n.5, p. 1262-1272. 2020.
- WAYLAND, E.J. Peneplains and some erosional platforms. **Geological Survey of Uganda: Annual Report Bulletin**, p. 77-79, 1933.
- WHIPPLE, K.X.; HANCOCK, G.S.; ANDERSON, R.S. River incision into bedrock: mechanics and relative efficacy of plucking, abrasion, and cavitation. **Geological Society of America Bulletin**, v.112, n.3, p. 490-503. 2000a.
- WILLIS, Bailey. **East African plateaus and rift valleys**. In Studies in Comparative Seismology. Carnegie Institute, Washington DC: Publication 470, 1936.
- WOHL, E.E. Bedrock channel incision along Picaninny creek, Australia. **Journal of Geology**, v.101, p. 749-761. 1993.
- XIMENES, C.L. A área paleontológica quaternária de Itapipoca, Ceará. *In*: PALEO NORDESTE, 2006, Sobral. **Resumos...** Sobral: UVA, 2006b. p. 26.
- XIMENES, C.L. Levantamento das ocorrências de fósseis de vertebrados no Estado do Ceará. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA, 13., 1993, São Leopoldo. **Boletim de Resumos...** São Leopoldo: SBP, 1993. p.151.
- XIMENES, C.L. Novas ocorrências de fósseis de megafauna no neo-quaternário do estado do Ceará, Brasil. *In*: PALEO NORDESTE 2006, Sobral. **Resumos...** Sobral: UVA, 2006a, p. 25.
- XIMENES, C.L. Tanques fossilíferos de Itapipoca, CE: Bebedouros e cemitérios de megafauna pré-histórica. *In*: WINGE, M.; SCHOBENHAUS, C.; SOUZA, C. R. G.; FERNANDES, A. C. S.; BERBERT-BORN, M.; QUEIROZ, E. T.; CAMPOS, D. A. (org.). **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. Brasília: SIGEP - Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos, 2009. p. 465-478.
- XIMENES, C.L.; SANTOS, A.S.T. Itapipoca 1961: A expedição João Cativo e seu legado para a paleontologia brasileira. *In*: CARVALHO, I. (org.). **Paleontologia: Cenários de Vida - Paleoclimas**. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. p. 795-806.
- XIMENES, C.L.; WALDHERR, F.R.; CASTRO, H.S.; MACHADO, R.M.; ARAÚJO-JÚNIOR, H.I. Uso de drone para imageamento, prospecção e caracterização de tanques

naturais na área paleontológica quaternária de Itapipoca, estado do Ceará: Resultados preliminares. *In*: SIMPÓSIO VIRTUAL DE PALEONTOLOGIA DO QUATERNÁRIO, 1., 2020, Rio de Janeiro. **Livro de Resumos...** Rio de Janeiro: UERJ, 2020. p. 1.

XIMENES, Celso Lira. **Geologia de uma área localizada na porção norte dos Municípios de Tururu e Itapipoca, CE, e caracterização de seus jazigos fossilíferos.** Fortaleza, 1996. 69 f. Monografia (Graduação em Geologia) - Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará. 1996.

XIMENES, Celso Lira. **Proposta metodológica para um programa de micro-reservatórios alternativos de água nos sertões semi-áridos brasileiros, associado ao resgate de fósseis.** Fortaleza, 2003. 146 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2003.

ANEXO A - La importancia de los tanques naturales (mega gnammas) en lapreservación de fósiles de la Megafauna cuaternaria en el Noreste de Brasil.

WALDHERR, F.R.; ARAÚJO-JÚNIOR, H.I.; RODRIGUES, S.W.O.; XIMENES, C.L. La importancia de los tanques naturales (mega gnammas) en lapreservación de fósiles de la Megafauna cuaternaria en el Noreste de Brasil. **Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe**, La Coruña, n. 41, p. 99-122. 2019.

La importancia de los tanques naturales (mega gnammas) en la preservación de fósiles de la Megafauna cuaternaria en el Noreste de Brasil

Importance of natural tanks (mega gnammas)
in the preservation of fossils of the Quaternary
Megafauna in the Northeast of Brazil

RODRIGUES WALDHERR, F.¹, ISMAEL DE ARAÚJO-JÚNIOR, H.², WILIANS DE OLIVEIRA RODRIGUES, S.³ & LIRA XIMENES, C.⁴

¹Programa de Pós-graduação em Geografia, Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Av. Athos da Silveira Ramos, 274, Cidade Universitária, CEP 21941-916, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: felipewald@gmail.com

²Departamento de Estratigrafia e Paleontologia, Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rua São Francisco Xavier, 524, Maracanã, CEP 20550-013, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: herminio.ismael@yahoo.com.br

³Departamento de Geologia, Instituto de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás. Rua Mucuri, s/n, Parque Itatiaia, CEP 74968-755, Aparecida de Goiânia, GO, Brasil. E-mail: swor@ufg.br

⁴Museu de Pré-História de Itapipoca (MUPHI), Rua Dom Aureliano Matos, 224, Praça Perilo Teixeira, Centro, CEP 62500-004, Itapipoca, CE, Brasil. E-mail: clx.ximenes@gmail.com

<https://doi.org/10.17979/cadlaxe.2019.41.1.5819>

enviado: 2/2/2019 aceptado 23/7/2019

Abstract:

Tanks (mega gnammas) of natural origin excavated in rock constitute medium-sized forms very frequent in the granite reliefs of Northeast Brazil. The study of the accumulated

sediments inside these natural tanks has become a source of data of great interest for the knowledge of the quaternary paleontology of Brazil. This type of cavity in areas of granite substrate, once exposed on the surface have acted as local depocenters for water flows and associated sediments, sometimes fossiliferous, which has turned these hollows into true thanatocoenoses. The systematic study of the fossiliferous accumulations has become the main tool to reconstruct the paleoenvironmental and paleoecological conditions during part of the Quaternary period in the Brazilian Intertropical Region.

Key-words: Natural tanks, Meso forms, Granite geomorphology, Quaternary, Brazilian Northeast.

Resumen:

Los tanques (mega gnammas) de origen natural excavados en roca constituyen formas de tamaño medio muy frecuentes en los relieves graníticos del Noreste de Brasil. El estudio de los sedimentos acumulados en el interior de esos tanques naturales se ha convertido en una fuente de datos de gran interés para el conocimiento de la paleontología cuaternaria de Brasil. Este tipo de cavidades habituales en zonas de sustrato granítico, una vez expuestas en superficie han actuado como depocentros locales para los flujos de agua y sus sedimentos asociados, a veces fosilíferos, lo que ha convertido estas concavidades en auténticas tanatocenosis. El estudio sistemático de las acumulaciones fosilíferas se ha convertido así en la principal herramienta para reconstruir las condiciones paleoambientales y paleoecológicas durante parte del período Cuaternario en la Región Intertropical Brasileña.

Palabras-clave: Tanques naturales, Formas medias, Geomorfología granítica, Cuaternario, Noreste brasileño.

INTRODUCCIÓN

Las primeras referencias a tanques naturales (mega *gnammas*) y los depósitos fosilíferos asociados a ellas en el Noreste de Brasil se remontan a finales del siglo XVIII (XIMENES, 2006a; FERNANDES et al., 2013a) e inicios del siglo XIX (CASAL, 1817 a y b; HENDERSON, 1821; GRAHAM, 1824; SPIX & MARTIUS, 1824, 1828). Las expediciones científicas de naturalistas que recorrieron el noreste brasileño, durante los siglos XIX y XX, utilizaron el término *tanque* (*lato sensu*) para denominar estas depresiones naturales en zonas de sustrato rocoso granítico, asociadas a las que se han encontrado numerosos yacimientos fosilíferos de edad pleistocena (BURLAMAQUE, 1855, 1856; KRATIF, 1858; CAPANEMA, 1866; HARTT, 1870; BRANNER, 1902, 1915; MORAES, 1924, 1928). Actualmente se usa el mismo término (*tanques*) para referirse, de forma generalizada, tanto a concavidades naturales desarrolladas en el sustrato granítico-gneísico como, ocasionalmente, sobre rocas sedimentarias del Nordeste de Brasil (MABESOONE et al., 1990; SANTOS et al., 2002; XIMENES, 2003, 2009; ARAÚJO-JÚNIOR & PORPINO, 2011; ARAÚJO-JÚNIOR et al., 2011, 2013a, 2013b, 2015, 2016; LIMA et al., 2013; LIMA & SILVA, 2016).

Aunque el término *tanque* (*lato sensu*) se reserva de manera habitual en los trabajos paleontológicos para este tipo de formas menores y medias en relieves granítico-gneísicos, no existe todavía consenso o un estudio sistemático sobre los diferentes tipos de cavidades y en especial para explicar su génesis y origen. Esto ha dado lugar a una gran variedad de interpretaciones así como una variada nomenclatura que es empleada,

igeneralizadamente, en el Noreste de Brasil (por ejemplo: *cacimba*, *caldeirão*, *marmita*, *oriçanga*, *panela*, *buraco*, *bacia de dissolução* y *depressão de intemperismo*). WALDHE-RR et al. (2017a, 2017b, 2018) basándose en ideas previas sobre la génesis de rocas graníticas (TWIDALE & VIDAL ROMANÍ, 2005 y más especialmente VIDAL ROMANÍ, (2008), las han adaptado al caso brasileño desarrollando una clasificación de procesos responsables del origen y morfología de estas cavidades naturales situadas en el Noreste y Sureste de Brasil. El término "*tanque natural*" (*stricto sensu*) o macro *gnamma* se refiere por tanto a cavidades naturales (de origen no fluvial) debidas o bien a procesos de corrosión química o, con mayor verosimilitud, a procesos de origen tectónico desarrollados durante la etapa intrusiva del granito (VIDAL ROMANÍ, 2008). Durante esta tiene lugar la formación de volúmenes de deterioro físico en la roca producidos por migración y concentración de cargas, en zonas localizadas del granito, relacionadas con la *sheet structure* o en cualquier caso con la superficie de diaclasas o fracturas. Estas zonas son así puntos de debilidad del sustrato rocoso y una vez alcanzadas condiciones subedáficas son alteradas (VIDAL ROMANÍ, 2008) y la roca afectada evacuada, dejando la cavidad libre en superficie hasta que, posteriormente, es rellenada por los sedimentos fosilíferos. Los términos "*marmitas*" o "*caldeirões*" se utilizarían para designar otro tipo de cavidades naturales (formas fluviales) debidas a procesos de evorsión y/o cavitación, o sea, de un tipo de abrasión provocado por movimiento turbillonar sobre el lecho rocoso de los ríos. Es por esta razón que las cavidades asociadas al término *marmitas* tienen características morfológicas muy distintas a los que presentan, los llamados aquí tan-

ques naturales. Según los autores brasileños, los *tanques naturais* (*stricto sensu*) pueden ser subdivididos en “*tanque natural raso*” o “*tanque natural escarpado*” (en idioma español: tanque natural “somero” y tanque natural “profundo”), teniendo en cuenta los procesos genéticos involucrados, la morfología de la cavidad y su forma expuesta al basamento cristalino (WALDHERR *et al.* 2017a, 2017b, 2018).

Ya analizando el tema de este trabajo con otra perspectiva, las cavidades desarrolladas sobre el sustrato granítico una vez expuestas en superficie se transforman en puntos de coalescencia de flujos y de los materiales arrastrados, convirtiéndose, aunque a pequeña escala, en auténticas tanatocenosis. Los depósitos sedimentarios confinados en los *tanques naturais* (*stricto sensu*) han proporcionado desde el siglo XVIII información y datos paleoambientales sobre el período Cuaternario en el extremo septentrional del continente sudamericano. De manera general los tanques y sus depósitos sedimentarios constituyeron también un importante hito para la consolidación de los estudios paleontológicos en Brasil.

Este trabajo trata de aportar información sobre las recientes investigaciones relacionadas con los tanques naturales en Brasil y presenta un registro histórico de estos importantes rasgos geomorfológicos, así como de su relevancia para la Paleontología, debido a la preservación en ellos de registros fosilíferos del Pleistoceno Final. De este modo, la finalidad de este trabajo es suplir la ausencia existente sobre el conocimiento e importancia de los tanques naturales, además, constituye una posible contribución al estudio de este tipo de formas específicas que se encuentran sobre el basamento granítico-gneísico del Noreste de Brasil.

Ubicación Geográfica

Los tanques naturales y sus depósitos fosilíferos asociados, se localizan en parte de la región del Noreste de Brasil, más precisamente los Estados de Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe y la parte norte del Estado de Bahía (Figura 1). Desde un punto de vista geomorfológico los denominados *tanques naturais* (*stricto sensu*) constituyen casos singulares de formas menores y medias en el relieve granítico-gneísico del Noreste de Brasil. La situación de estas cavidades naturales corresponde a los compartimientos geomorfológicos denominados “*Depressão Sertaneja*” y “*Planalto da Borborema*” (OLIVEIRA & HACKSPACHER, 1989; BERQGVIST *et al.*, 1997; BARRETO *et al.*, 2004; XIMENES, 2003, 2009; SILVA *et al.*, 2017; WALDHERR *et al.*, 2017a, MAIA & NASCIMENTO, 2018). La primera o “*Depressão Sertaneja*” es una depresión de gran extensión que varía topográficamente de plana a suavemente ondulada, constituyendo superficies con altitudes entre 50 y 300 metros, interrumpida de manera ocasional por relieves residuales, *inselbergs* y *bornhardts* (MAIA & BEZERRA, 2014). Por lo que se refiere a la segunda unidad geomorfológica o “*Planalto da Borborema*” está formado por sierras y superficies aplanadas que se ubican en el interior del continente a elevaciones que superan los 650 metros (ver CORRÊA *et al.*, 2010). Generalmente los tanques naturales se ubican cerca de macizos rocosos, o asociados a lajas de exfoliación o, ocasionalmente, con los llamados regionalmente mares de piedras o bloques (caos de bloques). Sin embargo, en un reciente relevamiento en terreno se registró el primer hallazgo de tanques naturales con depósitos sedimentarios



Fig. 1. Mapa de la distribución geográfica de los tanques (lato sensu) fosilíferos estudiados en la región Nordeste de Brasil. A) Los puntos amarillos representan depósitos de tanques evaluados en trabajos previos sobre términos taxonómicos, tafonómicos o paleoecológicos; los puntos rojos son tanques representados en B-D; B) Tanque de Jirau, ubicado en el Sitio Paleontológico de Jirau, Itapipoca, Estado de Ceará; C) Tanque ubicado en el Sitio Paleontológico de Curimatás, Pocinhos, Estado de Paraíba; D) Tanque ubicado en el Sitio Paleontológico de Lage Grande, Alagoinha, Estado de Pernambuco. Escalas en B-D: Escala humana. Fuente: Google Earth (modificado de ARAÚJO-JÚNIOR, 2016; WALDHERR et al., 2017a).

asociados en el Sureste de Brasil (WALDHERR et al., 2017b; WALDHERR, 2018).

Basamento Geológico

El basamento geológico del área de estudio ocupa por completo la Provincia Estructural Borborema y la parte septentrional del Crátón de São Francisco (Figura 2). Según ALMEIDA et al. (1981), la Provincia Borborema comprende un área del Noreste septentrional ubicada al este de la Cuenca Sedimentaria del Parnaíba y al norte del Cratón de São Francisco. RODRIGUES et al. (2010) definen la Pro-

vincia como una amplia región brasileña constituida por litologías metamórficas e ígneas, formada por un sistema ramificado de orógenos neoproterozoicos, separados por terrenos de edad proterozoica donde, eventualmente, se distinguen núcleos del Arcaico (ALMEIDA et al., 1981; BRITO NEVES et al. 2000). Los autores destacan además la complejidad estratigráfica y geocronológica del área que define una serie de compartimentos tectónicos caracterizados por diferentes aspectos geológicos y geofísicos (RODRIGUES et al., 2010). El Crátón de São Francisco está constituido por un bloque del Arcaico que sobrevivió a

las orogénesis del Proterozoico, y por fragmentos de un orógeno paleoproterozoico, desarrollado durante el acontecimiento Transamazónico, alrededor de 2,1 Ga (ALKMIM, 2004). Según TEIXEIRA *et al.* (2000), el basamento cristalino del Cráton de São Francisco está formado por una compleja disposición de terrenos de alto

grado metamórfico, constituidos por gneises, granitoides y granulitas de edad arcaica, conjuntos del tipo granito *greenstone* y franjas móviles de rocas supracorticales paleoproterozoicas. En la parte noreste del Cráton de São Francisco se encuentran afloramientos de rocas plutónicas con una gran variedad composicional.

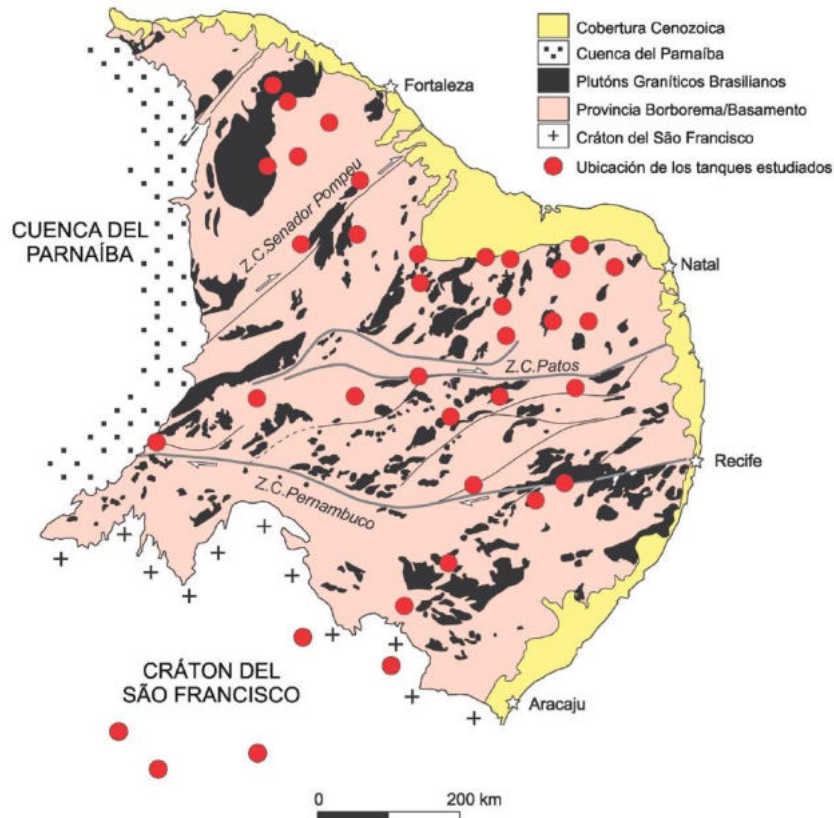


Fig. 2. La Provincia Borborema (Noreste de Brasil) destacando la ubicación de los tanques (lato sensu) con contenido fosilífero mencionados en este trabajo junto con la distribución de los macizos de rocas plutónicas del Brasiliano-Pan Africano y su relación con las zonas de cizallamiento (líneas continuas en negro) (modificado de ARCHANJO *et al.*, 2008; WALDHERR *et al.*, 2017a).

Los tanques naturales y depósitos sedimentarios

En el Noreste de Brasil la mayoría de los tanques naturales (*stricto sensu*) se presentan con formas ovaladas, elípticas y/o circulares (XIMENES, 2003, 2009; WALDHERR et al., 2017a; MAIA & NASCIMENTO, 2018; MAIA et al., 2018). En algunos casos las cavidades naturales tienen paredes internas con contornos angulares, lo que prueba una relación directa con el sistema de fracturas y diaclasas. En otros casos el relieve interno de los tanques es mucho más suave y redondeado, lo que sugiere una relación más

directa con procesos de corrosión química por debajo del frente de alteración en el contacto suelo-roca. Los tanques naturales pueden ser integrados al modelo polifásico propuesto por VIDAL ROMANÍ (2008), que propone un origen subsuperficial relacionado tentativamente con procesos subedáficos o, más verosíblemente, generados por la migración y concentración de cargas durante la intrusión del granito en la litosfera (VIDAL ROMANÍ, 2008). Posteriormente, estas depresiones iniciadas en profundidad, en condiciones confinantes, quedarán expuestas a los procesos exógenos aunque ya en condiciones subaéreas (Figura 3).



Fig. 3. Tanque natural con paredes escarpadas y con el desarrollo de un exutório a la izquierda de la fotografía. Esta forma se ha desarrollado en el borde de un domo granítico en la localidad de Curimatás, municipio de Pocinhos, Estado de Paraíba; se aprecia su formación por la coalescencia de cavidades que le dan un aspecto lobulado al tanque (Foto: Herminio de Araújo-Júnior).

Los tanques naturales pueden variar de forma y tamaño en el relieve granítico en el noreste brasileño. En algunos casos los tanques naturales son el resultado de coalescencia de dos o más cavidades, creando formas lobuladas en el terreno granítico-gneísico. Según VIDAL ROMANÍ & TWIDALE (1998) las formas análogas a los tanques llegan a orden de 1 metro y con

profundidad media de 0,5 metro. Sin embargo una gran parte de los tanques naturales estudiados en Brasil poseen mayores dimensiones. En XIMENES (2009) se han analizado y registrado cavidades con dimensiones que varían entre 10 a 20 metros de longitud, 5 a 8 metros de anchura y con profundidades alcanzando los 10 metros (Figuras 4, 5 y 6).



Fig. 4. Tanque natural escarpado de gran profundidad ubicado en el Sitio Paleontológico Lajinhas, municipio de Itapipoca, Estado de Ceará. La fotografía ha sido tomada desde la zona de desagüe de la cavidad (exutorio) lo que da al tanque un aspecto de sillón (Foto: Celso Lira Ximenes).



Fig. 5. Tanque natural escarpado de gran profundidad en el Sitio Paleontológico João Cativo, municipio de Itapipoca, Estado de Ceará. Los tanques naturales han sido utilizados históricamente como reservorios de agua en épocas de sequía en Noreste de Brasil (Foto: Felipe Rodrigues Waldherr).

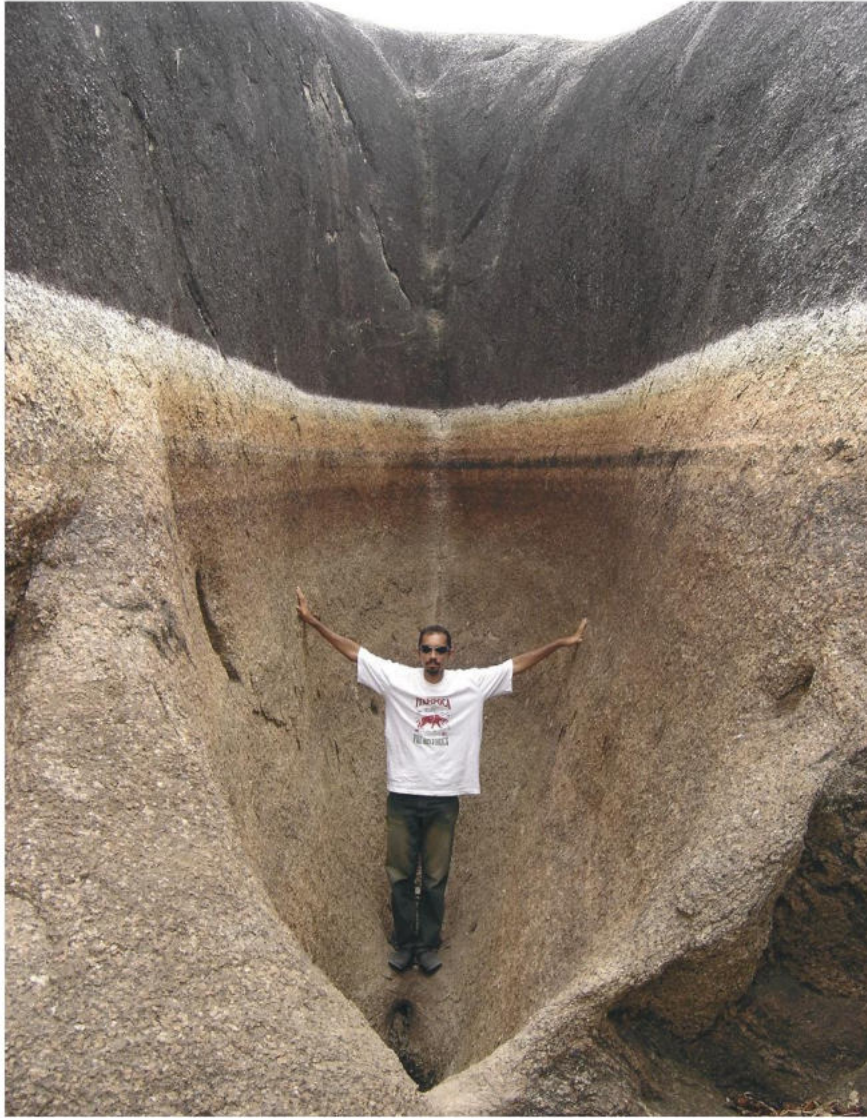


Fig. 6. La parte interna de un tanque natural escarpado de gran profundidad en el Sitio Paleontológico Jirau, municipio de Itapipoca, Estado de Ceará. Es posible notar el control estructural por la fractura-diaclasa y la morfología de fondo cóncavo (Foto: Celso Lira Ximenes).

Los tanques naturales y sus depósitos fosilíferos constituyen importantes yacimientos paleontológicos y, eventualmente, arqueológicos en el Noreste de Brasil (SANTOS JÚNIOR, 2005; SANTOS JÚNIOR *et al.*, 2008; 2015). Por ejemplo en el municipio de Itapipoca, parte norte del Estado de Ceará, los tanques naturales son formas frecuentes en torno del macizo residual de Uruburetama, conformando estrechas depresiones colmatadas por depósitos sedimentarios donde, ocasionalmente, aparecen o se conservan restos de la megafauna del Cuaternario (Figuras 7, 8 y 9). Según los estudios de XIMENES (2003, 2006b, 2009, 2011) las características geológicas y geomorfológicas locales han favorecido la formación de una de las más grandes concentraciones de este tipo de cavi-

dades asociadas a depósitos paleontológicos de todo Brasil, distribuidas en un área superior a los 800 km² sobre el basamento cristalino. Según este autor las condiciones paleoclimáticas fueron favorables para el desarrollo de una fauna diversificada de vertebrados y (ver XIMENES 2009) en Itapipoca se han encontrado más de 30 taxons ya identificados de mamíferos, reptiles, anfibios y aves. En virtud de la concentración de depósitos fosilíferos en los tanques naturales, junto con el abundante material paleontológico recogido y expresiva representatividad de diferentes especies paleomamíferas, el área ubicada entre las drenajes de los ríos Cruxati y Mundaú, en municipio de Itapipoca, se ha llamado también como el "Valle de la Megafauna" (XIMENES, 2003, 2006b, 2009).



Fig. 7. Proceso de apertura de una cacimba sobre el depósito sedimentario de un tanque natural en el Sitio Paleontológico Jirau, municipio de Itapipoca, Estado de Ceará (Foto: Celso Lira Ximenes).



Fig. 8. Restos fósiles (fémur y tibia) de un perezoso-gigante (*Eremotherium laurillardii*) dentro del depósito de un tanque natural. Este tanque es conocido como Jirau 1, y está ubicado en el yacimiento paleontológico Jirau, municipio de Itapipoca, Estado de Ceará. El contenido fosilífero fue recogido en el año 2006 por el Profesor Celso Lira Ximenes (Foto: Celso Lira Ximenes).



Fig. 9. Restos fósiles (dos ejemplares de fémur) del perezoso-gigante (*Eremotherium laurillardii*) expuestos en el Museu de Prê-História de Itapipoca (MUPHI), municipio de Itapipoca, Estado de Ceará (Foto: Celso Lira Ximenes).

Terminologías

Las primeras referencias sobre los tanques (*lato sensu*) en la literatura brasileña datan de finales del siglo XVIII y principios del siglo XIX, y se refieren a la apertura de las depresiones por parte de los habitantes locales con la finalidad de construir depósitos de agua en épocas de sequía, que resultaban en hallazgos inesperados de contenido fósil de mamíferos cuaternarios (CASAL, 1817 a y b; HENDERSON, 1821; SPIX & MARTIUS, 1824, 1928, GRAHAM, 1824; BURLAMAQUE, 1855, 1856; KRATIF, 1858; CAPANEMA, 1866; HARTT, 1870; BRANNER, 1902, 1915; ver también XIMENES, 2006a, FERNANDES et al., 2012, 2013a, 2013b y referencias incluidas). A lo largo de los siglos, en Brasil, los tanques ya fueron denominados de diversas maneras: *cacimbas*, *caldeirões*, *oriçangas*, *panelas*, *potes*, *buracos*, *bacias de dissolução* o *depressões de intemperismo*.

Entre los años 1848 y 1862, el Museo Nacional emprendió varias expediciones científicas hacia el Noreste del país (FERNANDES et al. 2010). El resultado de esta iniciativa fue el rescate de una cantidad considerable y variada de fósiles de la megafauna brasileña. En 1855, el coordinador del Museo Nacional, Frederico Burlamaque, recibió un total de 85 ataúdes que contenían huesos fósiles, y una de las remesas más voluminosas había sido recuperada de un poblado llamado Tanque de Aldeia y de regiones circundantes a Alagoas (FERNANDES et al. 2010, 2012). En 1853, otra remesa fue enviada desde la localidad llamada Caldeirão, municipio de Santa Brígida, Bahía. Sin embargo, el abundante material asociado al contenido fosilífero nunca se registró en la recepción oficial del Museo Nacional (FERNANDES et al. 2010, 2012). Otras lo-

calidades de las que proceden materiales fosilíferos, rescatados de tanques naturales durante el mismo período de tiempo, fueron: Tanque Velho y Tanque dos Elefantes, municipio de Pão de Açúcar, en Alagoas, y el poblado de Tanque Velho, en Sitios Nuevos, de Canhoba, en Sergipe (FERNANDES et al. 2012). Se puede plantear la hipótesis de que la generalización del término *tanque* (y *caldeirão*) está también asociada a los nombres de las localidades, donde los primeros fósiles fueron recuperados de manera sistemática en Brasil.

De acuerdo con OLIVEIRA (1989) el término tanque fue empleado por primera vez por Luciano Jacques de Moraes en 1924, en el trabajo titulado *Serras e Montanhas do Nordeste*. Sin embargo, trabajos más antiguos, como del Cura Manuel Aires de Casal, en 1817, ya utilizaban el término tanque asociado a las pequeñas depresiones (CASAL, 1817 a y b, FERNANDES et al., 2013b). Los naturalistas Spix y Martius, en sus escritos originales en lengua germana mantuvieron los términos *tanques* y *caldeirões* (SPIX & MARTIUS, 1828, 1968), mientras que en los trabajos elaborados en lengua inglesa (HARTT, 1870, BRANNER, 1902) se utilizaron los términos *tanks*, *cauldrons*, *pot-holes* y *rock basins*. Posteriormente, los trabajos en lengua inglesa fueron traducidos, y mantuvieron los términos *tanques* y *caldeirões*, siendo publicados, respectivamente, en 1941 por la *Editora Nacional* y en 1948 en el periódico *Boletim Geográfico* (HARTT, 1941, BRANNER, 1948).

A pesar de la clasificación morfológica, varios términos han sido verificados en la literatura en lengua inglesa, a ejemplo de *Rock Basins*, *Rock Holes*, *Weather Pits*, *Water Eyes*, *Pot Holes*, *Cauldrons* o *Granite Pits*. El término gnamma de origen abo-

rigen en Australia, traducido al portugués como “pozo de agua”, ha sido aceptado y utilizado a nivel internacional (BIGARELLA, 1994; TWIDALE Y CAMPBELL, 2005). En España se llaman *Pilas*, *Hoyos*, *Cazuelas* y *Pilancones*, en Galicia (España) y en Portugal se denominan *Pias*, y en Cataluña (España) *Cadolles* o *Cassoletes*. En estudios realizados en Angola por el geógrafo portugués, Profesor Ilídio de Amaral, las cavidades fueron llamadas como *Oriçangas* (AMARAL, 1973, 1974). Según VIDAL ROMANÍ & TWIDALE (1998) en francés se llaman *Tanques* y *Vasques Rocheuses*; en alemán se denominan *Verwitterungsnäpfe*, *Opferkessel*, *Baumverfallspingen*, *Felsschüssel* y *Dellen*; y en polaco, de *Kociolli*.

Importancia de los tanques naturales en la paleontología

El descubrimiento de restos fósiles preservados en los tanques naturales del Noreste de Brasil marcó un hito en la historia del desarrollo de la Paleontología en América del Sur. En el año 1784, el entonces gobernador de la capitania de Ceará, João Batista de Azevedo Coutinho de Montauray, fue el responsable de enviar los fósiles recogidos de los tanques naturales del valle del Río Acaraú, municipio de Sobral, actual Estado de Ceará, para el Reino de Portugal, específicamente para el *Museu Real da Ajuda*, en Lisboa. Los fósiles en cuestión corresponden al primer descubrimiento documentado, a nivel epistolar, de la megafauna pleistocénica de Brasil (FERNANDES et al. 2013a). A principios del siglo XIX, el cura portugués Manuel Aires de Casal realizó uno de los primeros registros sobre la aparición de fósiles de animales “de la antigüedad” que se encontraron en los tanques del Noreste de Brasil (CASAL, 1817 a y

b; FERNANDES et al., 2013b). En la clásica obra titulada *Reise in Brasilien (Viagem pelo Brasil, 1817-1820)*, escrita por los naturalistas alemanes Spix y Martius, se realizó una de los primeros registros de fósiles recogidos de la megafauna del Cuaternario. Los restos fósiles, que fueron encontrados y retirados de tanques cercanos a la Serra de Itauba y en la localidad de Monte Santo, en el interior del Estado de Bahía, correspondían a la “parte craneal” y al “fémur de un mastodonte” (SPIX & MARTIUS, 1824, 1828). Durante los siglos XIX y XX, innumerables expediciones organizadas por el Museo Nacional partieron de Río de Janeiro hacia el Noreste del país con la finalidad de recolectar y transportar los fósiles a la antigua capital del Imperio de Brasil. De los investigadores extranjeros que llegaron a principios del siglo pasado a observar la singularidad de los tanques, se destaca el estadounidense John Casper Branner. Este geólogo también llegó a describir los fósiles de mamíferos hallados en el interior de Pernambuco y de Alagoas (BRANNER, 1902).

Recientemente, ARAÚJO-JÚNIOR et al. (2013a) distinguieron los tanques naturales de los depósitos de tanque. Para estos autores, los tanques naturales consisten en las depresiones producidas por el proceso de meteorización físico-química de las rocas del basamento, mientras que los depósitos de tanque comprenden el contenido sedimentario que rellenó esas depresiones durante el Pleistoceno Final - Holoceno inicial. El estudio de las acumulaciones fosilíferas de esos depósitos configura una de las principales herramientas para el entendimiento de las condiciones paleoambientales y los aspectos paleoecológicos de la Región Intertropical Brasileña (RIB; *sensu* CARTELLE, 1999) durante el Cuaternario.

Estos depósitos están generalmente estratificados y son fosilíferos preservándose en ellos restos de una diversificada fauna que incluye principalmente la megafauna desde el Pleistoceno Final al Holoceno inicial, por ejemplo: megateriítidos, gliptodósidos, gonfoteriídeos, toxodósidos, macrauqueniídeos y felídeos. En algunos casos, los fósiles de la megafauna están asociados a restos de pequeños mamíferos, anfibios, cocodrilos, quelonios, lagartos y aves. En la Tabla 1 se presenta una lista de todos los grupos de vertebrados que fueron identificados hasta el momento en los depósitos hallados en tanques del Noroeste de Brasil.

Los depósitos de tanque son el tipo más singular de depósito fosilífero hallado hasta el momento en América del Sur. Eventualmente los tanques naturales desarrollados en rocas de basamento del Noreste de Brasil conservan en su interior pequeños cuerpos sedimentarios fosilíferos de edad cuaternaria. La mayor parte de los **fósiles de la megafauna pleistocena** conocida en el Noroeste

de Brasil ha sido encontrada en depósitos de tanque (ARAÚJO-JÚNIOR & PORPINO, 2011; ARAÚJO-JÚNIOR *et al.*, 2013a), aunque otros, proceden de una amplia variedad de tipos de depósitos comunes en la región, por ejemplo, cuevas, lagunas, ojos de agua y diques (BERGQVIST *et al.*, 1997; OLIVEIRA *et al.*, 2014).

La secuencia de formación de este tipo de depósitos fosilíferos es indudablemente compleja puesto que la sedimentación se producirá solo una vez que se haya desarrollado la concavidad. Ello hace suponer que ya en el Pleistoceno estaban formados los tanques y además libres de sedimentos y por tanto de restos fósiles. La estratificación observada en los depósitos indica que el proceso sedimentario se realizó en el seno del agua por lo que eventualmente los tanques actuaron como zonas de acumulación de agua adonde concurrían los distintos organismos que terminaron muriendo allí, acumulándose sus restos en el tanque que serían recubiertos posteriormente por sedimentos.

Mamíferos		Reptiles
Xenarthra – Pilosa	Proboscidea	Testudines
Eremotherium*	Notiomastodon*	Geochelone***
Glossotherium*	Notoungulata	Crocodylia
Catonyx*	Toxodon*	Caimaninae indet.**
Ocnotherium*	Perissodactyla	Ophidia
Nothrotherium**	Equus*	Ophidia indet.***
Xenarthra – Cingulata	Hippidion*	Lacertilia
Glyptotherium*	Tayassu**	Lacertilia indet.***
Panochthus*	Artiodactyla	Aves
Glyptodon*	Palaeolama*	Rheiformes
Hoplophorus*	Mazama**	<i>Rhea?</i> **
Neuryurus*	Ozotocerus**	Acciptriformes
Pampatherium*	Blastocerus**	Acciptriformes indet.***
Holmesina*	Carnivora	Anfibios
Dasypus***	Smilodon*	Amura
Euphractus***	Panthera**	Rhinella***
Tolypeutes***	Leopardus***	
Pachyarmatherium**	Protocyon**	
Litopterna	Cerdocyon***	
Xenorhinotherium*		

Tabla 1. Diversidad de los vertebrados identificados en los depósitos de tanque del Noreste de Brasil. * vertebrados con un tamaño superior a 100 kg; ** vertebrados con un peso entre 10 kg y 100 kg; *** vertebrados con un peso menor que 10 kg (fuente: PAULA- COUTO, 1980; BERGQVIST et al. 1997; DANTAS et al. 2005; SILVA, 2008; OLIVEIRA et al. 2009; ARAÚJO-JÚNIOR & PORPINO, 2011, ARAÚJO-JÚNIOR et al. 2013a, 2013b, 2015; RIBEIRO, 2014; SILVA, 2014).

CONCLUSIÓN

Los tanques naturales (*stricto sensu*) constituyen importantes formas menores-medias en el relieve granítico del noreste brasileño. El descubrimiento de un importante registro **fósil en depósitos sedimentarios** dentro de estos tanques naturales, y que ha sido recogido en documentación epistolar que data del siglo XVIII, configura un marco relevante para el desarrollo

de la Paleontología en Brasil. En general, los tanques naturales tienden a preservar el contenido fósil debido a su profundidad, capacidad de retención de material sedimentado transportado y forma similar a un refugio, resguardando los fósiles de la meteorización. El levantamiento sistemático de datos realizado en la década de 1850 por el Museo Nacional, junto con los estudios académicos posteriores sobre tanques naturales y depósitos contenidos en

esos tanques suministran una información muy valiosa, de carácter estratigráfico, sedimentológico y paleontológico, ayudando a la interpretación parcial de las condiciones paleoambientales y de paleofauna que predominaron durante el Pleistoceno Final en el Noreste del Brasil.

Agradecimientos: Al equipo de la Biblioteca do Centro de Tecnologia e Ciência (CTC / C) y al Núcleo de Memória, Informação e Documentação (MID) de la Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) por auxiliar la investigación documental y poner a disposición las obras utilizadas; al equipo de la Biblioteca Professor Mauricio de Almeida Abreu del Programa de Pós-graduação em Geografia de la Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGG-UFRJ) por poner a disposición y auxiliar con las obras necesarias para la elaboración del presente trabajo académico; al Profesor Dr. Juan Ramón Vidal Romani, del Instituto Universitario de Geología Isidro Parga Pondal, de la Universidad de La Coruña - España, por haber colaborado con la revisión y un análisis crítico de este artículo.

BIBLIOGRAFÍA

- ALKMIM, F.F. 2004. O que faz de um cratón um cratón? O Cratón do São Francisco e as revelações almedianas ao delimitá-lo. In: Mantesso-Neto, V, Bartorelli, A., Carneiro, C.D.R. & Brito Neves, B.B. (Ed.). *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Editora Beca, p. 17-36.
- ALMEIDA, F.F.M., HASUY, Y., BRITO NEVES, B.B., FUCK, R.A. 1981. Brazilian structural provinces: An introduction. *Earth-Science Reviews*, 17: 1-21.
- AMARAL, I. 1973. Formas de «Inselberge» (ou montes-ilhas) e de meteorização superficial e profunda em rochas graníticas do Deserto de Moçâmedes (Angola), na margem direita do Rio Curoca. *Garcia de Orta - Série de Geografia*, 1(1): 1-34.
- AMARAL, I. 1974. A propósito de formas escavadas em leitos fluviais e em vertentes de rochas graníticas do Deserto de Moçâmedes (Angola), na margem direita do Rio Curoca. *Garcia de Orta - Série de Geografia*, 2(1): 1-18.
- ARAÚJO-JÚNIOR, H.I., PORPINO, K.O. 2011. Assembléias fossilíferas de mamíferos do Quaternário do Estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil: Diversidade e aspectos tafonômicos e paleoecológicos. *Pesquisas em Geociências*, 38: 67-83.
- ARAÚJO-JÚNIOR, H.I. 2016. Classifying vertebrate assemblages preserved in Quaternary tank deposits: Implications for vertebrate taphonomy and paleoecology. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 445: 147-152.
- ARAÚJO-JÚNIOR, H.I., PORPINO, K.O., BERGQVIST, L.P. 2013b. Taphonomic analysis of a late Pleistocene vertebrate accumulation from Lage Grande Paleontological Site, Pernambuco State, northeastern Brazil: New remarks on preservational aspects of tank deposits. *Quaternary International*, 317: 88-101.
- ARAÚJO-JÚNIOR, H.I., PORPINO, K.O., BERGQVIST, L.P. 2015. Vertebrate taphonomy and paleoecology in an Upper Pleistocene tank deposit of Paraíba, Brazil: Taphonomic modes, evidence of temporal and spatial resolutions and paleoecological patterns of the Brazilian Intertropical Region. *Palaeogeography,*

- Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 437: 1-17.
- ARAÚJO-JÚNIOR, H.I., PORPINO, K.O., XIMENES, C.L., BERGQVIST, L.P. 2013a. Unveiling the taphonomy of natural tank deposits: a case study in the Pleistocene of northeastern Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 378: 52-74.
- ARAÚJO-JÚNIOR, H.I., PORPINO, K.O., XIMENES, C.L., BERGQVIST, L.P. 2013a. Unveiling the taphonomy of natural tank deposits: a case study in the Pleistocene of northeastern Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 378: 52-74.
- ARCHANJO, C.J., HOLLANDA, M.H.B.M., RODRIGUES S.W.O., BRITO NEVES, B.B., ARMSTRONG, R. 2008. Fabrics of pre and syntectonic granite plutons and chronology of shear zones in the Eastern Borborema Province, NE Brazil. *Journal of Structural Geology*, 30: 310-336.
- BARRETO, A. M. F., SILVA, F.M., ALMEIDA, J.A.C., SILVA, A.C.B.L. 2004. Os depósitos de cacimbas de Pernambuco: Aspectos geomorfológicos, geológicos, paleontológicos e paleoambientais. In: *XLII Congresso Brasileiro De Geologia*. 42., Minas Gerais, Anais, 1-2, 2004.
- BERGQVIST, L.P., GOMIDE, M., CARTELLE, C., CAPILLA, R. 1997. Faunas-locais de mamíferos pleistocênicos de Itapipoca/Ceará, Taperoá/Paraíba e Campina Grande/Paraíba. Estudo comparativo, bioestratinômico e paleoambiental. *Geociências*, 2(6): 23-32.
- BIGARELLA, J.J. 1994. *Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais volume 1*. Florianópolis, Editora da UFSC, 425p.
- BRANNER, J.C. 1902. On the occurrence of fossil remains of mammals in the interior of the States of Pernambuco and Alagoas, Brazil. *American Journal of Science*, 13: 133-137.
- BRANNER, J.C. 1915. *Geologia elemental*. Rio de Janeiro, Livraria Francisco Alves, 404p.
- BRANNER, J.C. 1948. Da ocorrência de restos de mamíferos fósseis no interior dos Estados de Pernambuco e Alagoas. *Boletim Geográfico*, 68: 941-943.
- BRITO NEVES, B.B., SANTOS, E.J., VAN SCHMUS, W.R. 2000. Tectonic history of the Borborema Province. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A. & Campo, D.A. (Ed.). *Tectonic evolution of the South America*. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Geologia, p. 151-182.
- BURLAMAQUE, F.L.C. 1855. Notícia acerca dos animaes de raças extintas descobertos em vários pontos do Brasil. *Trabalhos da Sociedade Vellosiana*, 20: 1-16.
- BURLAMAQUE, F.L.C. 1856. Notícia acerca dos animaes de raças extintas descobertos em vários pontos do Brasil. *Trabalhos da Sociedade Vellosiana*, 20: 17-21.
- CAMPBELL, E.M., TWIDALE, C.R. 1995. The various origins of minor granite landforms. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 20: 281-306.
- CAPANEMA, G.S. 1866. Decomposição de penedos no Brasil. Lição popular proferida em 25 de junho, Rio de Janeiro, 32p.
- CARTELLE, C. 1999. Pleistocene mammals of the Cerrado and Caatinga of Brazil. In: Eisenberg, J.F. & Redford, K.H. (Ed.). *Mammals of the Neotropics*:

- The Central Neotropics*. Chicago, The University of Chicago Press, p. 27-46.
- CASAL, M.A. 1817a. *Corografia brazilica, ou Relação historico-geografica do Reino do Brazil*. Rio de Janeiro, Impressão Régia, 182p.
- CASAL, M.A. 1817b. *Corografia brazilica, ou Relação historico-geografica do Reino do Brazil*. Rio de Janeiro, Impressão Régia, 158p.
- CORRÊA, A. C.B., TAVARES, B.A.C., MONTEIRO, K.A., CAVALCANTI, L.C.S., LIRA, D.R. 2010. Megageomorfologia e morfoestrutura do Planalto da Borborema. *Revista do Instituto Geológico - São Paulo*. 31(1/2): 35-52.
- DANTAS, M.A.T., ZUCON, M.H. & RIBEIRO, A.M. 2005. Megafauna pleistocênica da Fazenda Elefante, Gararu, Sergipe, Brasil. *Geociências*, 24: 277-287.
- FERNANDES, A.C.S., EWBANK, C.O., SILVA, M.J., HENRIQUES, D.D.R. 2010. Uma lembrança de infância: os “fósseis colossais” e o papel de Frederico Leopoldo César Burlamaque como paleontólogo brasileiro. *Filosofia e História da Biologia*, 5(2): 239-259.
- FERNANDES, A.C.S., RAMOS, R.R.C., SILVA, J.L.L., SILVA A.P.L. 2012. Do Nordeste para o Rio de Janeiro: Os tanques das primeiras remessas de fósseis de megafauna enviadas ao Museu Nacional. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA DE VERTEBRADOS, 7, 2012, Recife. *Boletim de Resumos*. Recife, SBPV, Edição Especial, p. 63-63.
- FERNANDES, A.C.S., XIMENES, L.C., ANTUNES, M.T. 2013a. Na Ribeira do Acaraú: João Batista de Azevedo Coutinho de Montauray e a descoberta documentada de megafauna no Ceará em 1784. *Filosofia e História da Biologia*, 8(1): 21-37.
- FERNANDES, A.C.S., FARIA, F., ANTUNES, M.T. 2013b. Manuel Aires de Casal, o beemote de Jó e o registro das ocorrências fossilíferas brasileiras no início do século XIX. *Filosofia e História da Biologia*, 8(2): 133-150.
- GRAHAM, M. 1824. *Journal of a voyage to Brazil and residence there, during part of the years 1821, 1822, 1823*. London, Printed for Longman, Rees, Orme, Brown, and Green, 335p.
- HENDERSON, J. 1821. *A history of the Brazil comprising its geography, commerce, colonization, aboriginal inhabitants*. London, Published by Longman, Hurst, Rees, Orme and Brown, 522p.
- HARTT, C.F. 1870. *Geology and physical geography of Brazil*. Boston, Fields, Osgood & CO, 620p.
- HARTT, C.F. 1941. *Geologia e geografia física do Brasil*. São Paulo, Editora Nacional, 649p.
- MABESOONE, J.M., OLIVEIRA, L.D.D., DAMASCENO, J.M. 1990. Desenvolvimento dos tanques fossilíferos no Semi-árido Northeriograndense. In: *Congresso Brasileiro De Geologia*, 36, Natal. Anais, Natal, SBG, v. 2, p. 733-741.
- MAIA, R.P., BEZERRA, F.H.R. 2014. Condicionamento estrutural do relevo no nordeste setentrional brasileiro. *Mercurator*, 13(1): 127-141.
- MAIA, R.P. & NASCIMENTO, M.A.L. 2018. Relevos graníticos do Nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 19(2): 373-389.
- MAIA, R.P., BASTOS, F.H., NASCIMENTO, M.A.L., LIMA, D.L.S., CORDEI-

- RO, A.M.N. 2018. *Paisagens graníticas do nordeste brasileiro*. Fortaleza, Edições UFC, 104p.
- MORAES, L.J. 1924. *Serras e montanhas do Nordeste*. Rio de Janeiro, Inspetoria Federal de Obras Contra as Secas, 120p.
- MORAES, L.J. 1928. Estudos geológicos no Estado de Pernambuco. *Boletim do Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil*, 32:1-98.
- OLIVEIRA, E.V., BARRETO, A.M.F., ALVES, R.S. 2009. Aspectos sistemáticos, paleobiogeográficos e paleoclimáticos dos mamíferos quaternários de Fazenda Nova, PE, Nordeste do Brasil. *Gaea - Journal of Geoscience*, 5: 75-85.
- OLIVEIRA, L.D.D., HACKSPACHER, P.C. 1989. Gênese e provável idade dos tanques fossilíferos de São Rafael-RN. In: *Congresso Brasileiro De Paleontologia*, 11., 1989, Curitiba. Anais. Curitiba, SBP, v. 1, p. 541-549.
- OLIVEIRA, L.D.D. 1989. Considerações sobre o emprego da terminologia da “formação cacimbas” e caldeirões para os tanques fossilíferos do Nordeste do Brasil. In: *Congresso Brasileiro De Paleontologia*, 11., 1989, Curitiba. Anais... Curitiba, SBP, v.1, p. 535-539.
- OLIVEIRA, P.E., PESSEDA, L.C.R., BARRETO, A.M.F., OLIVEIRA, E.V., SANTOS, J.C. 2014. Paleoclimas da Caatinga brasileira durante o Quaternário Tardio. In: CARVALHO, I. (Ed.). *Paleontologia: Cenários de Vida - Paleoclimas*. Interciência, Rio de Janeiro, volume 5, p. 501-516.
- PAULA-COUTO, C. 1980. Fossil Pleistocene to sub-recent mammals from north-eastern Brazil. I-Edentata Megalonychiidae. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 52(1): 144-151.
- RIBEIRO, R.C. 2014. *Assembléia fossilífera do Quaternário tardio de Lagoa do Rumo, Baixa Grande, Bahia: Tafonomia e Geocronologia*. Rio de Janeiro, 150 p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- RODRIGUES, S.W.O., ARCHANJO, C.J., GROHMANN, C.H. 2010. Quantificação da deformação finita nos metagranitoides Cariris Velhos na região de Alagoa Grande (PB). *Geologia USP - Série científica*, 10(3): 57-78.
- SANTOS JÚNIOR, V. 2005. *Os Registros Rupestres da Área Arqueológica de Santana (RN)*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco: Instituto de Ciências Humanas: Programa de Pós-Graduação em Arqueologia. 2005. 229p.
- SANTOS JÚNIOR, V., PORPINO, K. O., ABRAAHÃO, S. 2008. A megafauna extinta e os artefatos culturais de um tanque natural na região central do Rio Grande do Norte. *Contexto (Mossoró)*, 3: 176-193.
- SANTOS JÚNIOR, V., ROCHA, L.C.M., OLIVEIRA, D.L., GONZAGA, S.P.F., ARAÚJO, M. R. 2015. Os vestígios arqueológicos e paleontológicos em tanques naturais das microrregiões de Angicos, oeste e Serra de Santana, Rio Grande do Norte, Brasil. *Revista Tarairiú*, 1 (10): 76-89.
- SANTOS, M.F.C.F., BERGQVIST, L.P., LIMA-FILHO, F.P., PEREIRA, M.M.V. 2002. Feições tafonômicas observadas em fósseis pleistocênicos do Rio Grande do Norte. *Revista de Geologia*, 15: 31-41.
- KRATIF, A. 1858. *Uma excursão científica ao interior dessa província pelo Senhor*

- J.L. Brunet*. Diário de Pernambuco - A Carteira, 09 de maio de 1858, 01p.
- LIMA, J.S., SILVA, J.L.L., SILVA, A.P.L., SARMENTO, J. 2013. Pesquisa paleontológica em depósito de tanque arenítico com mamíferos pleistocênicos, município de Delmiro Gouveia, AL. In: *Congresso Brasileiro De Paleontologia*, 23., 2013, Gramado. Anais... Gramado, SBP, p. 241-242.
- LIMA, J.S., SILVA, J.L.L. 2016. Mamíferos fósseis pleistocênicos em tanque arenítico no município de Delmiro Gouveia, Alagoas, Brasil. *Estudos Geocoológicos*, 26(2): 77-90.
- SILVA, D.G., CORRÊA, A.C.B., AMORIM, R.F. 2017. Caracterização morfológica e dinâmica ambiental das marmitas (weathering pit) no distrito de Fazenda Nova, Pernambuco - Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 18(2): 349-362.
- SILVA, F.M. 2014. *Tafonomia em tanque de Fazenda Nova, município de Brejo da Madre de Deus, Estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil*. Recife, 105p. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geologia. Universidade Federal de Pernambuco.
- SILVA, J.L.L. 2008. *Reconstrução paleoambiental baseada no estudo de mamíferos pleistocênicos de Maravilha e Poço das Trincheiras, Alagoas, Nordeste do Brasil*. Recife, 213p. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geologia. Universidade Federal de Pernambuco.
- SPIX, J.B.V., MARTIUS, K.F.P.V. 1824. *Travels in Brazil in the years 1817-1820*. London, A. & R. Spottiswoode, 298p.
- SPIX, J.B.V., MARTIUS, K.F.P.V. 1828. *Reise in Brasilien in den Jahren 1817 bis 1820*. München, I.J. Lentner, 468p.
- SPIX, J.B.V., MARTIUS, K.F.P.V. 1968. *Viagem pelo Brasil: 1817-1820*. São Paulo, Edições Melhoramentos, 332p.
- TEIXEIRA W., SABATÉ P., BARBOSA J.S.F., NOCE C.M., CARNEIRO M.J. 2000. Archean and paleoproterozoic tectonic evolution of the São Francisco Cráton. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A. & Campos, D.A. (Ed.). *Tectonic evolution of South America*. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Geologia, p. 101-138.
- TWIDALE, C.R., CAMPBELL, E.M. 2005. *Australian Landforms: Understanding a low, flat, arid and old landscape*. Kenthurst, New South Wales, Rosenberg Publishing, 336p.
- TWIDALE, C.R., VIDAL ROMANÍ, J.R. 2005. *Landforms and geology of granitic terrains*. Leiden, Balkema, 352p.
- VIDAL ROMANÍ, J.R. 1989. Geomorfología granítica en Galicia (NW España). *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe* (Coruña), 13: 89-163.
- VIDAL ROMANÍ J. R. 2008. Forms and structural fabric in granite rocks. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 33: 175-198.
- VIDAL ROMANÍ, J.R., TWIDALE, C.R. 1998. *Formas y paisajes graníticos*. La Coruña, Universidad da Coruña Servicio de Publicaciones, 411p.
- WALDHERR, F.R. 2018. *Reconstituição paleogeomorfológica do Maciço do Itaóca e depósitos sedimentares de seu entorno, Campos dos Goytacazes (RJ)*. Rio de Janeiro, 160p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Geolo-

- gia, Faculdade de Geologia. Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
- WALDHERR, F.R., ARAÚJO-JÚNIOR, H.I., RODRIGUES, S.W.O. 2017a. Origem e morfologia de tanques naturais no Nordeste do Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 44(3): 467-488.
- WALDHERR, F.R., ARAÚJO-JÚNIOR, H.I., RODRIGUES, S.W.O., TUPINAMBÁ, M., VAZ, O.R. 2017b. Tanques naturais: Considerações sobre origem e morfologia e descrição da primeira ocorrência fora do Nordeste do Brasil. In: *Simpósio De Geologia Do Sudeste*, 10., 2017, Diamantina. Anais... Diamantina, SBG.
- WALDHERR, F.R., ARAÚJO-JÚNIOR, H.I., RODRIGUES, S.W.O., TUPINAMBÁ, M. 2018. A origem dos tanques naturais brasileiros: O modelo polifásico subedáfico. In: *Simpósio Nacional De Geomorfologia*, 12., 2018, Crato. Anais... Crato, UGB.
- XIMENES, C.L. 2003. *Proposta metodológica para um programa de micro-reservatórios alternativos de água nos sertões semi-áridos brasileiros, associado ao resgate de fósseis*. Fortaleza, 146p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geologia. Universidade Federal do Ceará.
- XIMENES, C.L. 2006a. Novas ocorrências de fósseis de megafauna no neokuaternário do estado do Ceará, Brasil. In: *PALEO NE 2006 - Reunião Anual Regional da Sociedade Bras. De Paleontologia.*, 2006, Sobral (CE). Resumos, Sobral, UVA, p. 25.
- XIMENES, C.L. 2006b. A área paleontológica quaternária de Itapipoca, Ceará. In: *PALEO NE 2006 - Reunião Anual Regional da Sociedade Bras. De Paleontologia*, 2006, Sobral (CE). Resumos, Sobral, UVA, p. 26.
- XIMENES, C.L. 2009. Tanques fossilíferos de Itapipoca, CE: Bebedouros e cemitérios de megafauna pré-histórica. In: Winge, M., Schobbenhaus, C., Souza, C.R.G., Fernandes, A.C.S., Berbert-Born, M., Queiroz, E.T., Campos, D.A. (Ed.). *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil: SIGEP - Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos*. Brasília, p. 465-478.
- XIMENES, C.L., SANTOS, A.S.T. 2011. Itapipoca 1961: A expedição João Cativo e seu legado para a paleontologia brasileira. In: CARVALHO, I. (Ed.). *Paleontologia: Cenários de Vida - Paleoclimas*. Interciência, Rio de Janeiro, volume 5, p. 795-806.

ANEXO B - O registro histórico de cavidades do tipo tafone em terrenos graníticos no Nordeste do Brasil.

WALDHERR, F.R.; MAIA, R.P.; NASCIMENTO, M.A.L.; AULER, A.S. 2020. O registro histórico de cavidades do tipo tafone em terrenos graníticos no Nordeste do Brasil. **Humboldt - Revista de Geografia Física e Meio Ambiente**, v. 1, n. 1, p. 1-32. 2020.

O REGISTRO HISTÓRICO DE CAVIDADES DO TIPO TAFONE EM TERRENOS GRANÍTICOS NO NORDESTE DO BRASIL

THE HISTORICAL RECORD OF CAVITIES OF THE TAFONE TYPE IN GRANITE TERRAINS IN NORTHEASTERN BRAZIL

RESUMO





No Brasil o desenvolvimento de trabalhos sobre cavidades do tipo tafone, em afloramentos rochosos não carbonáticos, têm se dado de maneira bastante irregular no meio acadêmico. Embora registros sobre tafoni e estruturas menores, distribuídos em rochas graníticas e gnáissicas, sejam cada vez mais recorrentes em diferentes partes do território nacional, pouco se sabe sobre a origem, importância e o registro dessas cavidades no Brasil. Foram consultados trabalhos acadêmicos elaborados desde o início do século XIX até artigos mais recentes, incluindo teses e dissertações, sobre as cavidades naturais do tipo tafone no Nordeste do Brasil. Desta maneira, a finalidade deste trabalho é preencher a lacuna existente sobre a importância histórica dos tafoni, além de uma possível contribuição aos estudos de formas menores que ocorrem sobre o embasamento granítico-gnáissico no nordeste brasileiro. As descrições elaboradas pelo Padre Francisco Telles de Menezes, no final do século XVIII, no interior nordestino podem representar uma das primeiras menções de feições tafoniformes no Brasil, enquanto que o levantamento sistemático realizado pelo Capitão João Lopes Machado na segunda metade do século XIX, torna relevante a função dos tafoni como abrigos naturais e importantes sítios arqueológicos no estado da Paraíba.

Palavras-Chave: Tafoni, Formas Menores, Geomorfologia granítica, Nordeste do Brasil.

ABSTRACT

In Brazil, the development of works on tafoni-type cavities, in non-carbonate rock outcrops, has been very irregular in the academic environment. Although records on tafoni and smaller structures distributed in granitic and gneissic rocks are increasingly recurrent in different parts of the national territory, few is known about the origin, importance and record of these cavities in Brazil. Academic works elaborated from the beginning of the 19th century until more recent articles, including theses and dissertations, have been consulted on the natural cavities tafone type in northeastern Brazil. In this way, the purpose of this work is to fill the existing gap on the historical importance of the tafoni, besides a possible contribution to the studies of minor forms that occur on the granitic-gneiss basement in the Brazilian northeast. The descriptions elaborated by Priest Francisco Telles de Menezes, in the late XVIII century, in the northeastern interior may represent one of the earliest mentions of tafoniforms in Brazil, while the systematic survey carried out by Captain João Lopes Machado in the second half of the XIX century relevant to the function of tafoni as natural shelter cavities and important archaeological sites in the state of Paraíba.

Keywords: Tafoni, Minor forms, Granite geomorphology, Northeastern Brazil.

 Felipe Rodrigues Waldherr¹
 Ribson Pinheiro Maia²
 Marcos Antônio Leite do Nascimento³
 Augusto Sarreiro Auler⁴

1 – Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

2 – Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, CE, Brasil.

3 – Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN, Brasil.

4 – Instituto do Carste, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Correspondência: felipevald@gmail.com

Recebido em: 07-12-2018

Aprovado em: 11-08-2020



Este é um artigo de acesso aberto distribuído sob os termos da Licença Creative Commons BY-NC-SA 4.0, que permite uso, distribuição e reprodução para fins não comerciais, com a citação dos autores e da fonte original e sob a mesma licença.



INTRODUÇÃO

Os terrenos constituídos por rochas graníticas apresentam uma ampla diversidade de paisagens, tanto na escala individual como no conjunto regional de formas de relevo (MIGÓN, 2006, p. 290). Do ponto de vista fisiográfico, as formas de relevo nesses terrenos podem ser classificadas em dois grandes grupos, a saber: as "Formas Maiores" ou "Megaformas" e as "Formas Menores" ou "Microformas". A distinção entre os grupos baseia-se no inventário elaborado por diferentes autores a respeito de terrenos graníticos em distintas partes do mundo (AMARAL, 1973, p. 12, 1974, p. 03, 1977, p. 17; GODARD, 1977, p.73; VIDAL ROMANÍ, 1989, p. 91; CAMPBELL, 1997, p. 103; VIDAL ROMANÍ & TWIDALE, 1998, p. 15; PEDRAZA, 1996, p. 325; VIDAL ROMANÍ et al. 2014b, p. 65; PEDRAZA et al., 1989, p. 117; TWIDALE, 1989, p. 49, 1993, p. 196; VIEIRA, 2003, p. 197; TWIDALE & VIDAL ROMANÍ, 2005, p. 03; MAYOR RODRIGUEZ, 2011, p. 50). De acordo com Vidal Romaní (1989, p. 91) as "Microformas" ou "Formas Menores" apresentam feições morfológicas nas quais o limite dimensional, em geral, não ultrapassa a dezena de metros, tratam-se de formas de dimensões métricas ou inferiores. Entre as "Formas Menores" do relevo granítico destacam-se as importantes cavidades do tipo tafone (singular do termo tafoni), sendo amplamente discutidas em relação à origem, desenvolvimento, descrição e distribuição geográfica em numerosos trabalhos acadêmicos, principalmente no meio internacional (TSCHANG, 1974, p. 32; VIDAL ROMANÍ, 1984, p. 273, 1989, p. 111, 1990, p. 324, 2008, p. 186; VIDAL ROMANÍ & GRACIA PRETO, 1987, p. 48; VIDAL ROMANÍ & TWIDALE, 1998, p. 305; VIDAL ROMANÍ et al., 2014a, p. 486, 2014b, p. 66, 2018, p. 21; UÑA ALVAREZ, 2005, p. 332, 2012, p. 350; TWIDALE & BOURNE, 1975, p. 481; VIEIRA, 2003, p. 200; TWIDALE & VIDAL ROMANÍ, 2005, p. 235; MIGÓN, 2006, p. 139; MAYOR RODRÍGUEZ, 2011, p. 51).

No Brasil o desenvolvimento de trabalhos sobre cavidades do tipo tafone, em afloramentos rochosos graníticos, gnáissicos e migmatíticos, têm se dado de maneira bastante irregular no meio acadêmico. Em geral a ocorrência de feições tafoniformes no relevo é negligenciada pela comunidade científica por se tratar de formas pontuais, com pequenas dimensões, e, na maior parte das vezes, situadas em locais de difícil acesso (ver HARDT, 2003, p. 52). No entanto, as notícias de formas menores do tipo tafone e

estruturas menores, por exemplo, alvéolos e favos de mel (honeycombs), distribuídos em rochas não carbonáticas, vêm sendo cada vez mais recorrente em diferentes partes do Brasil. As cavidades do tipo tafone ocorrem sobre o substrato rochoso granítico-gnáissico, comumente nas laterais de monólitos e escarpas, em distintas cotas altimétricas. Outras vezes ocorrem em forma de concavidades, atribuindo a si uma configuração de abrigo, em matacões (boulders) e tors distribuídos sobre as superfícies rochosas aplainadas (lajedos) e domos graníticos incipientes. É possível observar os tafoni desde a faixa litorânea até as porções mais interioranas do território nacional, sucedendo de modo indiferente ao domínio morfoclimático predominante. A ampla distribuição geográfica permite que a feição geomórfica seja caracterizada como uma formaazonal. As exposições mais conhecidas de cavidades do tipo tafone encontram-se, notadamente, associadas a "Formas Maiores" de relevos graníticos, por exemplo, em inselbergues, na região Nordeste do Brasil (Figura 1).

Figura 1- Os inselbergues correspondem a "Formas Maiores" de relevo do Nordeste do Brasil e, ocasionalmente, apresentam em suas laterais e/ou zonas basais cavidades do tipo tafone. Os tafoni situados na região de Milagres e Itatim, no estado da Bahia, apesar de serem consideradas "Formas Menores" estão entre as maiores feições desse tipo no mundo.



Registro fotográfico - Augusto Aufer.

Desde o período do Brasil Colônia (1500 - 1822) há o registro documental de uma ampla variedade de personagens, incluindo desbravadores, missionários, militares e naturalistas, que percorreram o interior das então denominadas Capitânicas do Brasil, resultando em diversas narrativas sobre as descrições territoriais, os aspectos sociais e a

situação econômica do Nordeste do Brasil. Os relatos variam conforme a perspectiva motivacional e/ou sob as incumbências da administração do Império Ultramarino de Portugal. Nesse contexto aparece, no final do século XVIII, a figura do Padre Francisco Telles de Menezes, responsável, mesmo que de forma involuntária, por um extenso levantamento de pinturas e inscrições (registros) rupestres no interior nordestino. O Padre Francisco Telles de Menezes empreendeu e organizou durante os anos de 1799 e 1806, anotações referentes a possíveis "sinais", denominados como *inscrições lapidares*, sobre os afloramentos rochosos. A cada ponto visitado, ou relato recolhido de habitantes locais, o missionário incluía uma breve descrição ou comentário sobre os letreiros nas pedras e, ocasionalmente, de aspectos da paisagem. Algumas das descrições sugerem a ocorrência de pinturas e gravuras sobre as formas menores de relevo, por exemplo, em tafoni, matacões (boulders), *tors*, caldeirões (mamitas), eventualmente em tanques naturais e nos próprios lajedos. É possível que algumas das descrições realizadas pelo Pe. Francisco Telles de Menezes estejam associadas a uma das primeiras menções sobre as feições tafoniformes do Brasil, no caso, sobre a Pedra da Andorinha, no distrito de Taperuaba, município de Sobral, estado do Ceará.

Já na segunda metade do século XIX, sob o domínio administrativo do Império do Brasil, há o registro de um acontecimento importante para a arqueologia na então denominada Província da Paraíba. Nesse contexto histórico é apresentado o Capitão João Lopes Machado que no ano de 1874 relata, através de correspondência, a descoberta de pinturas rupestres e de uma antiga sepultura indígena resguardada em um antigo abrigo localizado na face leste da Serra de Jandaíra, município de Algodão de Jandaíra. O abrigo em questão é nomeado regionalmente como Gruta do Caboclo e corresponde a uma forma menor do tipo tafone sobre o relevo granítico. Apesar da cavidade não ser o objeto principal de estudo é possível, através do relato, observar uma breve descrição elaborada pelo militar sobre a feição tafoniforme. É oportuno mencionar que o marco inicial na história do desenvolvimento da arqueologia no estado da Paraíba é acompanhado pela descoberta e investigação de uma cavidade do tipo tafone sobre uma plataforma granítica.

O presente trabalho busca trazer novas informações sobre as pesquisas associadas às cavidades do tipo tafone no Brasil. Este estudo preocupa-se em levantar um registro histórico e traz à tona a importância das feições tafoniformes para as Ciências Naturais, através da preservação dos registros rupestres e antigas áreas de sepultamento indígena

no nordeste brasileiro. O trabalho apresenta a partir das anotações elaboradas pelo Pe. Francisco Telles de Menezes e pelo Capitão João Lopes Machado, respectivamente nos séculos XVIII e XIX, em conjunto com o levantamento de informações atuais, a ocorrência de formas tafoni no Brasil. Desse modo, a finalidade deste trabalho é preencher a lacuna existente sobre a importância histórica das feições morfológicas de cavidades do tipo tafone, além de contribuir para os estudos de formas menores que ocorrem sobre o embasamento granítico-gnáissico no Nordeste do Brasil.

MATERIAIS E MÉTODOS

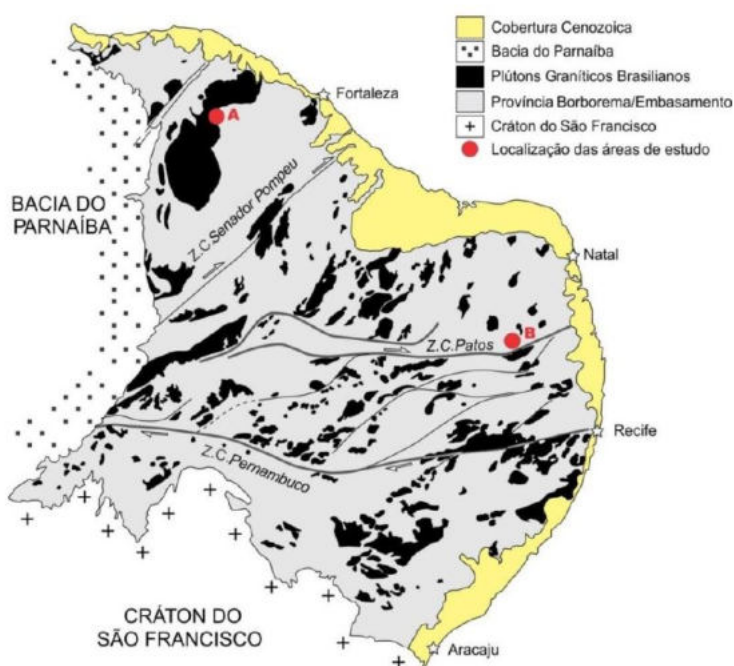
Área de Estudo

No presente trabalho foram selecionadas duas áreas de estudo localizadas no Nordeste do Brasil. A primeira área refere-se ao monólito denominado como Pedra da Andorinha, situada no distrito de Taperuaba, município de Sobral, estado do Ceará. A localização foi feita a partir das descrições e referências fornecidas pelo Padre Francisco Telles de Menezes no final do século XVIII. A segunda é constituída por uma cavidade do tipo tafone, sendo denominado como Gruta do Caboclo, localizada no município de Algodão de Jandaíra, estado da Paraíba. A cavidade corresponde a um antigo abrigo o qual foi estudado, e parcialmente descrito, pelo Capitão João Lopes Machado no século XIX, constituindo o primeiro levantamento arqueológico sistemático no estado da Paraíba.

O arcabouço geológico que constitui as áreas de estudo, no caso, a Pedra da Andorinha e a Gruta do Caboclo, corresponde a intrusões graníticas na Província Borborema (Figura 2). Segundo Almeida et al. (1981, p.19) a Província Borborema compreende uma área do Nordeste setentrional localizada a leste da Bacia do Parnaíba e ao norte do Cráton do São Francisco. Rodrigues et al. (2010, p.58) definem a Província como uma ampla região brasileira constituída por litologias metamórficas e ígneas, formada por um sistema ramificado de orógenos neoproterozoicos, separados por terrenos de idade proterozoica que, eventualmente, apresentam núcleos arqueanos (ALMEIDA et al., 1981, p. 21; BRITO NEVES et al., 2000, p. 151). Os autores ainda apresentam a complexidade estratigráfica e geocronológica da área que define uma série de compartimentos tectônicos caracterizados por diferentes aspectos geológicos e geofísicos

(RODRIGUES et al., 2010, p. 58). Na Província Borborema tem notoriedade o amplo magmatismo associado ao evento orogênico brasileiro, entre 750 e 540 Ma, durante o Neoproterozoico, com extensos e diversificados plútons graníticos nos quais ocorre a maior parte de conjuntos associados às formas maiores e menores de relevo existentes no interior nordestino.

Figura 2 - Província Borborema (Nordeste do Brasil) destacando a localização das áreas de estudo. É possível observar a distribuição de rochas plutônicas do Brasiliano-Pan Africano e as zonas de cisalhamento. A) Pedra da Andorinha, distrito de Taparuaba (Sobral), no estado do Ceará; B) Gruta do Caboclo, município de Algodão de Jandaira, no estado da Paraíba.



Modificado de ARCHANJO *et al.*, 2008.

De acordo com o mapeamento geológico elaborado por Castro (2014) o monólito da Pedra da Andorinha, no estado do Ceará, é constituído por leucodiatexito foliados a granoblásticos da unidade litoestratigráfica Serra do Feijão, datados através do método

U-Pb em zircão em 618 ± 11 Ma (CASTRO, 2004, p. 139), e associados ao Complexo Tamboril-Santa Quitéria. No entanto, em recente trabalho elaborado por Rodrigues (2018, p.54) a Pedra da Andorinha corresponde ao Granitóide Correntes, sendo interpretado como um corpo granítico tardi-colisional em forma de *stock* que intrude o conjunto de migmatitos. Segundo Gomes (2006, p.60) a litologia do *stock* é descrita como isotrópica, constituindo um sienogranito de coloração rósea à cinza esbranquiçado, com granulação que varia de média a grossa e textura granular xenomórfica e granulação fina para os minerais máficos. Já a cavidade do tipo tafone que corresponde a Gruta do Caboclo, no interior paraibano, é composta por rochas leucocráticas de coloração esbranquiçada, equigranulares e com textura fanerítica média da Suíte Intrusiva Alcalina Caxexa, datado através do método U-Pb em zircão em 578 ± 14 Ma (NASCIMENTO, 2000, p. 34), correspondente ao granito alcalino Serra do Algodão (CAVALCANTI *et al.*, 2017).

Metodologia

O presente trabalho elaborou um minucioso levantamento de registro documental, no caso, relatos escritos entre os períodos oitocentistas e novecentistas, sobre as possíveis menções de cavidades do tipo tafone no relevo granítico-gnáissico e a importância histórica das feições tafoniformes no Nordeste do Brasil. Duas importantes obras foram selecionadas, sendo a primeira denominada de "Lamentação Brasileira" (ARARIPE, 1887, p. 238), desenvolvida pelo Padre Francisco Telles de Menezes, durante os anos de 1799 e 1806, na então Capitania do Ceará, e a segunda nomeada "História da Província da Parahyba", escrita pelo historiador Maximiano Lopes Machado, onde há o registro da escavação arqueológica realizada pelo seu irmão, o militar João Lopes Machado, na então Província da Paraíba em 1874 (MACHADO, 1912, p. 105, 1977, p. 105).

Nas anotações realizadas pelo Pe. Francisco Telles de Menezes é possível sugerir através de indicações de pinturas rupestres, em afloramentos rochosos do tipo granítico-gnáissicos, a ocorrência de formas menores de relevo, por exemplo, de cavidades do tipo tafone. No presente trabalho foi elaborado o levantamento atualizado dos possíveis pontos a partir das referências fornecidas pelo missionário, considerando medidas cautelosas na interpretação em trechos relevantes da descrição no texto. A leitura de localização aproximada do ponto pré-estabelecido, no caso, Pedra da Andorinha, foi feito com base

em informações do banco de dados fornecido pelo programa Google Earth Pro e na consulta da base planialtimétrica digital, na escala 1:100.000, convertida da Folha Taperuaba (Ministério do Exército - Diretoria de Serviço Geográfico). A digitalização da Carta Topográfica Taperuaba sobre a área de estudo permitiu, através dos programas ArcGIS 10.3 e Global Mapper 15, extrair as curvas de nível, com espaçamento de 40 metros, a fim de verificar os diferentes níveis altimétricos, amplitude de relevo, distribuição de formas geomórficas e a orientação de eixos de drenagem. Os arquivos digitais, no caso, os vetores em formato *shape*, em conjunto as nomenclaturas de vias de acesso, localidades (cidades e vilas), pontos notáveis, drenagens, corpos de água e curvas de nível correspondentes ao relevo da área de estudo, expuseram os possíveis pontos referenciais para comparação aos descritos pelo missionário no final do século XVIII.

No trabalho foi feito um breve levantamento histórico das alterações de limites municipais, e até estaduais, a fim de verificar, especialmente na área de estudo, algum tipo de redimensionamento do espaço geográfico e que possa ter influenciado os pontos referenciais, por exemplo, em criação de novos distritos. Foi feita a verificação de toponímias em cartas topográficas disponibilizadas pelo IBGE o qual podem ter sido elaboradas a partir de recentes nomenclaturas, sobrepondo os antigos marcos referenciais fornecidos pelo Pe. Francisco Telles de Menezes. Na maior parte das anotações também foi necessária a consulta da obra intitulada "Vocabulário Portuguez & Latino Portuguesa", de autoria do lexicógrafo português Raphael Bluteau, devido à linguagem expressa nas anotações, sendo referentes ao século XVIII (BLUTEAU, 1728, p. 58). A obra, considerada o primeiro dicionário da língua portuguesa, encontra-se disponível para consulta nos arquivos digitais da plataforma *online* Biblioteca Brasileira Guita e José Mindlin.

Na obra do historiador Maximiano Lopes Machado, intitulada "História da Província da Paraíba" é possível consultar o registro de seu irmão, Capitão João Lopes Machado, sobre o primeiro levantamento arqueológico sistemático da Paraíba (MACHADO, 1912, p. 105, 1977, p. 105). A descrição feita pelo militar pôde ser parcialmente transcrita para o presente trabalho. Foram consultados dois artigos acadêmicos, vinculados à área de Espeleologia, para a atualização de informações e registros fotográficos da área de estudo (SANTOS & OLIVEIRA, 2015, p. 219; OLIVEIRA & SANTOS, 2017, p. 587). O abrigo em questão é nomeado regionalmente

como Gruta do Caboclo e corresponde a uma cavidade do tipo tafone sobre a paisagem granítica do interior do Estado da Paraíba.

O presente trabalho também pôde elaborar um breve levantamento bibliográfico sobre as feições geomórficas nomeadas como tafone e estruturas menores, apresentando brevemente as principais hipóteses para sua origem, descrições de cavidades, ocorrência geográfica, registro histórico no exterior e no Nordeste do Brasil. Foram consultados trabalhos acadêmicos elaborados desde o início do século XIX até artigos mais recentes, incluindo dissertações e teses. Informações mais antigas, como as menções do Padre Francisco Telles de Menezes, durante o final do século XVIII, foram consultadas no trabalho de Araripe (1887, p.238). A maior parte da compilação de materiais acadêmicos realizados no Brasil sobre a ocorrência de cavidades do tipo tafone em rochas graníticas e gnáissicas, mesmo que de forma involuntária, concentram a partir do início dos anos 2000. É oportuno mencionar que o conjunto de análises elaboradas pelo Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV-ICMBio, 2010, p. 03) foi consultado e pôde fornecer, através de registros e com base dimensionais de cavidades, que a nomenclatura do tipo "abrigo" é, aparentemente, o mais compatível com as feições tafoniformes observadas no Nordeste do Brasil.

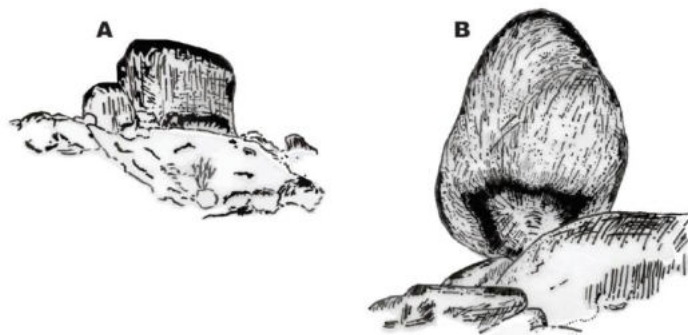
Fundamentação teórica

As cavidades do tipo tafone e as cavernas granítica-gnáissicas

O termo tafoni, plural de tafone, é proveniente do dialeto corso e significa em português "Perfuração" ou "Janela" (VIDAL ROMANÍ, 1989, p. 111; UÑA ALVAREZ, 2005, p. 332, 2012, p. 351). Para outros autores o termo procederia do idioma grego, sendo oriundo de "*Taphos*" e que traduzido ao português significaria "Tumba" (MAYOR RODRÍGUEZ, 2011, p. 51). Segundo Twidale & Vidal Romani (2005, p.238) o termo refere-se, na literatura geomorfológica, a configuração de uma caverna pouco profunda ou de uma cavidade parcialmente fechada em virtude da conservação da lateral, constituindo a aparência de uma janela ou viseira. Em geral o termo é empregado para caracterizar depressões ou cavidades que ocorrem nas laterais de domos rochosos e inselbergues. Em outros casos, a denominação tafone é aplicada a *boulders* ou matacões que são totalmente esvaziados em seu interior, ainda que pareçam intactos por fora (Figura 3).

De acordo com Vidal Romani (1984, p.274) alguns tafoni são pequenos, com poucos centímetros de largura e altura. No entanto, outros detêm vários metros de largura e são encontrados em diferentes altitudes, podendo, inclusive, acomodar confortavelmente um grupo de pessoas em seu interior. As paredes internas dos tafoni podem ser homogêneas em seu desenvolvimento, porém, outras cavidades possuem as paredes bem desagregadas ou recobertas de protuberâncias em formas alveolares ou em favos de mel (honeycombs), constituindo em estruturas menores associadas ao tafone (VIDAL ROMANÍ & TWIDALE, 1998, p. 308).

Figura 3- Os diferentes tipos de feições tafoniformes em afloramentos graníticos no deserto de Moçâmedes, nas localidades de Furnas e Mompiri, na porção sul da Angola. A) A ocorrência de tafone localizado na base de um *Castle Koppjes*; B) O tafone no interior do matacão granítico.



Modificado de AMARAL, 1974.

É importante ressaltar que diferentemente dos tafoni as cavernas graníticas são espaços subterrâneos unidos ao ar livre por amplas e estreitas aberturas e/ou através de condutos verticais (VIDAL ROMANÍ & TWIDALE, 1998, p. 305). Segundo os autores mencionados as cavernas não ocorrem de forma habitual em rochas graníticas, no entanto, são descritos diferentes tipos de abrigos graníticos em diferentes partes do mundo. De acordo com o Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV-ICMBio, 2010, p. 03) a diferença entre esses tipos de cavidades naturais, abrigo e caverna, pode ser compreendida de acordo com o desenvolvimento horizontal da cavidade, a saber: a) tipo caverna: é considerado quando o desenvolvimento horizontal (largura) é maior que a altura da entrada; b) tipo abrigo: é considerado quando o desenvolvimento horizontal (largura) da cavidade é menor que a sua altura. Assim, no presente estudo a

nomenclatura de tipo abrigo, baseadas nas dimensões espaciais, são consideradas as mais compatíveis e, aparentemente, acertadas para as feições identificadas como tafone no relevo granítico-gnáissico do nordeste brasileiro.

Embora as cavernas graníticas e gnáissicas no Brasil tenham sido descritas, em detalhe, e possuírem uma classificação de acordo com os aspectos fisiográficos e gênese, o desenvolvimento de trabalhos acadêmicos têm tido pouca visibilidade. A maior parte dos trabalhos acadêmicos que está associada à temática de cavernas graníticas e gnáissicas decorre de importantes pesquisas desenvolvidas, principalmente, na área de Espeleologia (CORRÊA NETO, 1996, p. 18; CORRÊA NETO *et al.*, 1990, p. 86; HARDT, 2002, p. 10, 2003, p. 52; HARDT & PINTO, 2009, p. 99; ZAMPAULO *et al.*, 2005, p. 153, 2007, p. 335; BERNARDI *et al.*, 2010, 2012, p. 5; ALMEIDA *et al.*, 2017, p. 559; MOCHIUTTI & TOMAZZOLI, 2017, p. 327; SILVA, 2018, p. 55). Muitas das principais cavernas em rochas graníticas, tanto no Brasil como no mundo correspondem, na verdade, a espaços interconectados entre zonas de acumulação de blocos, recebendo o nome de cavernas em tálus. Cavernas litorâneas em rochas graníticas, formada pela ação erosiva de ondas, são também muito comuns no Brasil (SILVA, 2018, p. 55).

Ocorrência das cavidades do tipo tafone

Segundo Vidal Romani & Twidale (1998, p.308) as cavidades do tipo tafone desenvolvem-se especialmente em rochas graníticas, embora, também existem formas similares em arenitos e diferentes tipos de rochas metamórficas, além de vulcânicas, incluindo ocorrência de tafoni em materiais sedimentares pouco consolidados. Em áreas de terrenos graníticos, os tafoni ocorrem particularmente nas partes basais das estruturas de esfoliação e/ou descamação, em zonas de sopé de escarpa. Entretanto, os tafoni também ocorrem em matacões, como já mencionado anteriormente, definido pelo sistema ortogonal de fraturamento e diáclase sobre o embasamento cristalino (TWIDALE & VIDAL ROMANÍ, 2005, p. 238). Em geral, os tafoni possuem uma ampla distribuição e podem ocorrer em qualquer parte do afloramento rochoso.

De acordo com Mayor Rodríguez (2011, p.56) as cavidades do tipo tafone foram registradas em uma ampla variedade de domínios morfoclimáticos e sobre distintas unidades litoestratigráficas, sendo descrita e analisada em praticamente todos os continentes. O fato de constatar a distribuição de tafoni em todo o globo terrestre, tanto

na perspectiva longitudinal quanto latitudinal reforça o caráter azonal já citado anteriormente. Há registro, através da análise de imagens obtidas pela Missão *Pathfinder*, da presença de estruturas semelhantes aos tafoni e *honeycombs* em afloramentos rochosos em Marte (RODRIGUEZ-NAVARRO, 1998, p. 3249).

As hipóteses de origem para as cavidades do tipo tafone

De acordo com Bigarella (1994, p.171) os tafoni e outras cavidades, ou buracos de intemperismo, encontrados em inselbergues maciços, localizam-se ao longo de diáclases subhorizontais e em locais de menor resistência aos processos físico-químicos de alteração, incluindo o intemperismo salino. Já no dicionário geomorfológico elaborado por Hubp (2011, p.382) os tafoni são cavidades resultantes do intemperismo e erosão diferencial, preferencialmente em domínios morfoclimáticos áridos e em zonas litorâneas. Embora as hipóteses para a origem dos tafoni tenham sido associadas, durante muito tempo, a causas exógenas condicionadas pelo ambiente subaéreo, a saber: a) variação de temperatura ambiental; b) variação de temperatura dentro e fora do tafone; c) fatores termo-mecânicos; d) mecanismos de crioclastia; e) hipótese de haloclastia, f) fator sombra; g) ação eólica; h) abrasão marinha; i) superfícies endurecidas; j) umidade ambiental; k) processos biológicos e antrópicos (MAYOR RODRÍGUEZ, 2011, p. 63; VIDAL ROMANÍ, 2008, p. 194; VIDAL ROMANÍ *et al.*, 2018, p. 22), alguns trabalhos tem discutido o possível desenvolvimento das cavidades através da corrosão química sob um perfil edáfico (origem em subsuperfície), sendo o resultado do avanço irregular da frente de alteração e do acúmulo de umidade do material inconsolidado que constitui o regolito sobre as zonas de debilidade de embasamento cristalino, por exemplo, fraturas, diáclases e corpos intrusivos (TWIDALE 1968, p. 115, 1982a, p. 300, 1982b, p. 272, 1986, p. 775, 1989, p. 54, 1993, p. 188, 2007, p. 144; TWIDALE & BOURNE, 1975, p. 481; TWIDALE *et al.*, 2002, p. 61, ROQUÉ *et al.*, 2013, p. 100). Outros autores têm cogitado a possibilidade de uma origem endógena, sendo atribuído o desenvolvimento das cavidades tafoni através da migração e concentração de cargas em subsuperfície em pontos específicos entre a *sheet structure* por via tectônica e/ou edáfica (VIDAL ROMANÍ, 1984, p. 275, 1989, p. 126, 1990, p. 319, 2008, p. 22; VIDAL ROMANÍ & GRACIA PRIETO, 1987, p. 48; VIDAL ROMANÍ & TWIDALE, 1998, p. 311; VIDAL ROMANÍ & YEPES TERMIÑO, 2004, p. 343; VIDAL ROMANÍ *et al.*, 2014a, p. 487, 2018, p. 22; TWIDALE & VIDAL ROMANÍ, 2005, p. 246; ROQUÉ *et al.*, 2013, p. 103;

MAYOR RODRÍGUEZ, 2011, p. 74). Atualmente tem sido realizado um esforço entre os pesquisadores, integrando distintas hipóteses vinculadas tanto ao meio endógeno quanto exógeno, na compreensão dos principais processos envolvidos na formação das cavidades do tipo tafone e estruturas menores (alvéolos e *honeycombs*).

O Registro histórico de cavidades do tafone no meio acadêmico internacional

As cavidades do tipo tafone foram descritas pela primeira vez pelo engenheiro de minas e geólogo espanhol Casiano de Prado, no ano de 1864, para as formas de relevo granítico na Sierra de Guadarrama, localizada na parte central da Península Ibérica (VIDAL ROMANÍ, 1998, p. 158; TWIDALE & VIDAL ROMANÍ, 2005, p. 238). De acordo com os autores anteriormente citados a nomenclatura "Horados", em língua espanhola, foi empregada inicialmente por Prado para identificar cavidades que ocorriam sobre os boulders ou matacões graníticos. No entanto, o termo que viria a ser reconhecido internacionalmente seria o adotado por H. Reusch, o introdutor do termo tafoni na linguagem científica (AMARAL, 1974, p. 13).

No final do século XIX, o trabalho intitulado *Notes sur la géologie de la Corse*, escrito pelo geólogo norueguês H. Reusch, foi primeiro a (re)utilizar o termo regional tafoni para nomear as cavidades de dimensões variadas sobre o relevo da Ilha de Córsega, região administrativa da França (REUSCH, 1882, p. 65). Entre as principais citações sobre os tafoni na literatura acadêmica internacional, realizadas no final do século XIX, destacam-se o trabalho de Hult em 1899, na Galícia, Noroeste da Espanha, e de Choffat em 1895, na localidade de Faro D'Anha, porção setentrional de Portugal. No entanto, o trabalho normalmente apontado como referência ao tema dos tafoni, integrando-os ao contexto geomorfológico, compete ao geógrafo alemão Albrecht Penck em 1894 na Ilha de Córsega (VIDAL ROMANÍ & TWIDALE, 1998, p. 308). Desde então as cavidades tipo tafone têm sido analisadas e descritas em outros continentes, em uma ampla variedade de contextos climáticos e litológicos.

Os tafoni são denominados por uma ampla variedade de nomes em diversas partes do mundo. Na literatura inglesa as cavidades do tipo tafone são chamadas de *Cavernous Weathering* e *Careous Weathering*. Na Espanha são denominados de *Cacholas* e *Cacheiras*, termos provenientes do idioma galego. De acordo com Mayor Rodriguez (2011, p.51) os tafoni são chamados, em francês, de *Cavernes Eoliques*, enquanto que na

língua germânica são denominados de *Kavernösen Verwitterung*, *Hohlblockbildungen* e *Hohlverwitterung*. No Brasil, apesar do termo tafone ter sido mantido na literatura acadêmica nacional, as feições tafoniformes são também denominadas de cavidades e/ou buracos de intemperismo (BIGARELLA, 1994, p. 162).

As pesquisas de cavidades do tipo tafone no Brasil

No Brasil os trabalhos que envolvem a temática de cavidades do tipo tafone e estruturas menores sobre o substrato rochoso granítico-gnáissico, ainda que de maneira indireta, tem tido um aumento significativo em relação às publicações e ao desenvolvimento de pesquisas no meio acadêmico, principalmente a partir dos anos de 2000 (GUERRA, 1965, p. 18; BIGARELLA, 1994, p. 171; SILVA *et al.*, 2002, p. 202, 2013, p. 190; AULER, 2007, p. 01; AULER *et al.*, 2007, p. 15; CAVALCANTI & MARIANO NETO, 2007, p. 67; CAVALCANTE, 2014, p. 27; GUIMARÃES, 2009, p. 37; IGUAL, 2011, p. 04; GONÇALVES *et al.*, 2011, p. 87; CHAVES *et al.*, 2016; CHAVES, 2017, p. 88; SANTOS & OLIVEIRA, 2015, p. 219; BARBOSA *et al.*, 2016, p. 1274; OLIVEIRA & SANTOS, 2017, p. 587; LIMA, 2018, p. 127; MAIA *et al.* 2015, p. 242; MAIA & NASCIMENTO, 2018, p. 374).

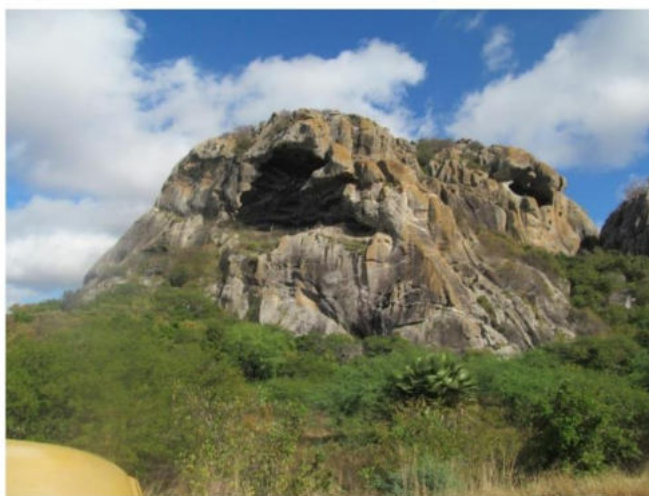
Em recente publicação sobre as formas do relevo granítico no Nordeste do Brasil, elaborado por Maia & Nascimento (2018, p.380), é proposto uma classificação de acordo com a literatura acadêmica internacional para as cavidades do tipo tafone, considerando suas especificidades, em afloramentos rochosos, a saber: tafone de parede, tafone basal, *honeycombs* e alvéolos.

Segundo os autores brasileiros os tafoni de parede, em geral, possuem formato alongado e horizontalizado, como uma reentrância erosional na forma de um abrigo cárstico. As cavidades são associadas ao intemperismo inicial ao longo das juntas, fraturas ou outras zonas menos resistentes, especialmente nas áreas onde a água pode residir. Dessa maneira, o intemperismo cavernoso no interior da rocha parte de um ponto central e expande progressivamente através de descamação das superfícies interiores e da sua desintegração granular. Por conta do fator genético, podem ocorrer em distintas cotas topográficas (Figura 4).

Enquanto que os tafoni basais estão associados a paleoníveis de dissolução epigênica, sendo observados, normalmente, em setores intermediários a basais das

escarpas graníticas. Ocorrem na forma de rasas reentrâncias que se estendem por uma das faces laterais dos inselbergues. Diferentemente dos tafoni que se desenvolvem em fraturas (tafone lateral), esses estão associados à paleoníveis de intemperismo, mantendo o registro da antiga superfície sobre as escarpas do monólito. As cavidades basais podem ser também associadas aos *boulders* ou blocos de granito, sendo caracterizadas como aberturas côncavas que se expandem de forma ascendente da base do bloco granítico, consumindo seu interior. Essa expansão amplia-se até o ponto de romper a lateral do bloco, gerando assim um acesso à parte interna do bloco (por exemplo, janela ou viseira).

Figura 4 - Tafoni de parede em Inselbergue na localidade de Quixadá, estado do Ceará. É possível observar parcialmente a ocorrência de estruturas menores na parede interna da cavidade natural.



Registro fotográfico - Rúbson Pinheiro Maia.

Já as estruturas menores são denominadas como alvéolos e favos de mel (*honeycombs*) e correspondem a feições tafoniformes de menor expressão espacial. Segundo Maia & Nascimento (2018, p.381) ocupam, geralmente, o interior de cavidades maiores com tamanhos individuais que variam de escala centimétrica a decimétrica. As formas são caracterizadas por concavidades circulares densamente distribuídas na forma de nichos de intemperismo.

RESULTADOS

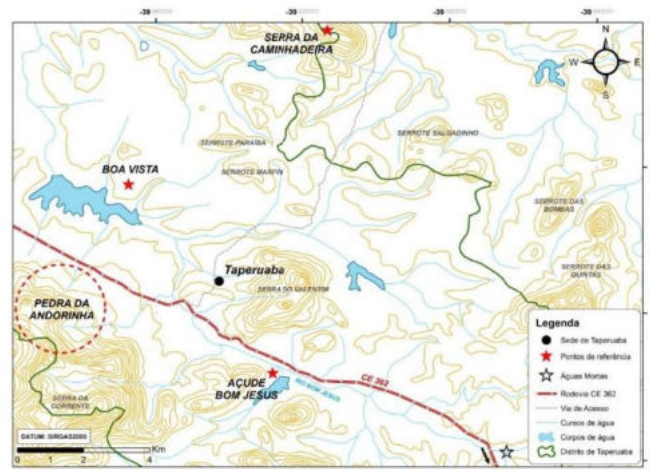
Registros históricos de cavidades do tipo tafone no Nordeste do Brasil

No Brasil é possível que uma das primeiras menções sobre as feições tafoniformes sobre o embasamento cristalino, em rochas graníticas e/ou gnáissicas, tenha sido realizada no final do século XVIII, de forma involuntária, pelo Padre Francisco Telles de Menezes. Na obra intitulada "Lamentação Brazílica" o missionário empreende, entre os anos de 1799 e 1806, um minucioso levantamento de inscrições e pinturas (registros) rupestres sobre os afloramentos rochosos, percorrendo o interior das então Capitânicas do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Piauí e Pernambuco.

No Ceará, por exemplo, o Padre Francisco Telles de Menezes registrou o total de 121 *inscrições e letreiros lapidares*, entre pinturas e gravuras rupestres, na tentativa de interpretação de sinais ou marcos, distribuídos na paisagem nordestina, que o levassem a tesouros e riquezas ocultas pelos holandeses e jesuítas. As anotações do missionário encontram-se disponíveis para consulta na obra de Tristão de Alencar Araripe intitulada "Cidades Petrificadas e Inscrições Lapidares no Brasil" (ARARIPE, 1887, p. 238). Entre as descrições de pinturas rupestres realizadas pelo Padre Francisco Telles de Menezes em afloramentos rochosos tem destaque, devido à singularidade de detalhes anotados sobre a feição geomórfica, o sítio e açude de Bom Jesus, na então localidade de Aracatiaçu, na Capitania do Ceará. O missionário descreve a localidade da seguinte maneira:

É este lugar entre Caminhadeira e Boa Vista que é no caminho de Águas Mortas, onde dizem haver muitos letreiros nas pedras; e perto deles está **uma pedra quadrada ou facetada sobre trempes de pedras**, e também **outra pedra** que tange sendo tocada, **rodeada de barroquinhas abertas** a picão **pela parte superior**. (ARARIPE, 1887, p. 240) (ver Figuras 5 e 6).

Figura 5 - A porção central do distrito de Taperuaba, município de Sobral, estado do Ceará. Os pontos estabelecidos constituem os prováveis marcos de referência mencionados pelo Padre Francisco Telles de Menezes. É possível observar a localização da feição geomórfica do monólito da Pedra da Andorinha, provavelmente descrita pelo missionário no final do século XVIII. A localidade de Águas Mortas segue na direção sudeste.



Mapa elaborado pelo próprio autor.

Figura 6 - Pedra da Andorinha, localizada no distrito de Taperuaba, estado do Ceará. O monólito constituído por sienogranito pode ter em sua descrição, realizada no final do século XVIII, as primeiras menções sobre as formas tafoniformes no Brasil. É possível visualizar também a presença de caneluras na parede rochosa.



Registro fotográfico - Rúbson Pinheiro Maia.

O trecho descrito pelo missionário como "pedra quadrada ou facetada sobre trempes de pedras" (ARARIPE, 1887, p. 240) corresponde ao monólito símbolo do distrito de Taparuaba, sendo denominado popularmente como Pedra da Andorinha (Figuras 6 e 7). O monólito que alcança os 520 metros de altitude pode ser classificado como uma forma maior no relevo granítico, constituindo uma paisagem de inselbergue sobre o mosaico de superfícies aplainadas nivelado em cotas altimétricas inferiores (lajedos) e incipientes domos rochosos, ambos sendo coroados por matacões (*boulders*) e *tors*. Enquanto que o trecho "outra pedra que tange sendo tocada rodeada de barroquinhas abertas a picão pela parte superior" (ARARIPE, 1887, p. 240) corresponde às cavidades do tipo tafone de tamanhos variados que ocorrem nas laterais, na porção média e superior, do monólito. O termo *barroquinhas*, utilizado pelo Padre Francisco Telles de Menezes, pode ser interpretado também como depressões, covas ou mesmo grotas que ocorrem no relevo (BLUTEAU, 1728, p. 58).

Figura 7 - Pedra da Andorinha, localizada no distrito de Taparuaba, estado do Ceará. É possível observar a ampla variedade de cavidades do tipo tafone no monólito sienogranítico e o depósito de tálus de configuração radial no entorno.



Registro fotográfico - Rúbson Pinheiro Maia.

Registro de pinturas rupestres sobre as formas menores do relevo em outras localidades de acordo com as anotações do Padre Francisco Telles de Menezes

Nas anotações realizadas pelo Padre Francisco Telles de Menezes é possível sugerir através de indicações de pinturas rupestres, sobre os afloramentos rochosos graníticos e/ou gnáissicos, a ocorrência de formas menores de relevo, por exemplo, cavidades do tipo tafone, matacões (*boulders*), *tors*, caldeirões (marmitas) e, aparentemente, tanques naturais no Nordeste do Brasil. No entanto, é necessário um trabalho cuidadoso de levantamento de informações em campo devido à linguagem expressa nas anotações, referentes ao século XVIII, a utilização de toponímias recentes em cartas topográficas, sobrepondo os antigos marcos, e as alterações de limites municipais e até estaduais que refletem no dimensionamento do espaço geográfico e local de investigação. Por vezes, as próprias anotações denotam informações vagas sobre o ponto da inscrição rupestre e sua localidade, resultando em maiores dificuldades para o levantamento de dados mais precisos. Apesar disso, é possível elaborar com base na descrição, em detalhe do Padre Francisco Telles de Menezes, sobre as possíveis áreas de ocorrência de tafoni associados aos *letreiros e inscrições lapidares* nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Piauí, Pernambuco e Paraíba (ARARIPE, 1887, p. 238).

A cavidade do tipo tafone e o marco inicial da arqueologia no estado da Paraíba

Na segunda metade do século XIX, o Capitão João Lopes Machado é responsável pela importante descoberta arqueológica na Gruta dos Caboclos, localidade de Algodão de Jandaíra, na então Província da Paraíba (Figura 8). O levantamento empreendido pelo militar ocorreu no dia 09 de junho de 1874, e mesmo que tenha sido executado de forma amadora é considerada a primeira escavação arqueológica sistemática realizada em território paraibano (MACHADO, 1912, p. 105, 1977, p. 105; SANTOS & OLIVEIRA, 2015, p. 220).

Segundo o historiador Maximiano Lopes Machado o registro é feito pelo seu irmão, o Capitão João Lopes Machado, através de correspondência o qual descreve, em detalhe, a ascensão, características da cavidade, escavação e descoberta de ossos descomunais no

pavimento da Gruta do Caboclo (MACHADO, 1912, p. 105, 1977, p. 105). Apesar da cavidade não ser o objeto principal de estudo do Capitão João Lopes Machado a feição tafoniformes (tafone de parede) torna-se importante do ponto de vista histórico e geomorfológico, respectivamente como antigo sítio de sepultamento indígena e abrigo contra as intempéries, resguardando importantes e vulneráveis informações arqueológicas, por exemplo, de pinturas rupestres na parede interna sobre os alvéolos e favos de mel (*honeycombs*).

Figura 8 - A Gruta do Caboclo no município de Algodão de Jandaira, estado da Paraíba. É considerado o primeiro sítio de levantamento arqueológico paraibano. A gruta corresponde a uma cavidade do tipo tafone de parede com grandes dimensões na rocha granítica.



Registro fotográfico - Humberto Anastácio.

De acordo com Oliveira & Santos (2017, p.587) o sítio arqueológico Gruta do Caboclo está localizado a 30 metros de altitude na face leste da Serra do Algodão e trata-se de uma concavidade formada na rocha granítica estendendo-se por aproximadamente 20 metros, possuindo em média 12 metros de altura e 11 metros de largura, onde as paredes internas, arqueadas para a base, ocorrem estruturas menores já mencionadas e denominadas como *honeycombs* (Figuras 9 e 10). É importante salientar que o registro arqueológico é acompanhado, mesmo que de forma inconsciente, pelo levantamento da distribuição geográfica de cavidades do tipo tafone em rochas graníticas no Nordeste do Brasil.

Figura 9 - Registro fotográfico da face interna da Gruta do Caboclo, no município de Algodão de Jandaira, estado da Paraíba. É possível observar uma série de estruturas menores, por exemplo, alvéolos e favos de mel que variam de dimensão espacial, associadas a cavidade do tipo tafone na rocha granítica.



Registro fotográfico -Humberto Anastácio

Figura 10 - Face interna, em detalhe, da Gruta do Caboclo no município de Algodão de Jandaira, estado da Paraíba. É possível verificar o registro de pinturas rupestres nas estruturas menores denominadas como alvéolos. Os alvéolos também apresentam aspectos diferenciados na parede. Na parte de cima aparentemente são mais espaçosos e as formas retangulares, enquanto que os alvéolos inferiores possuem dimensões reduzidas e formas elípticas.



Registro fotográfico - Juvandi de Souza Santos.

Na obra intitulada Brejo de Areia, de autoria de Horácio de Almeida, os depoimentos sobre a Gruta do Caboclo não são isolados (ALMEIDA, 1958, p. 53).

Segundo o levantamento realizado pelo historiador paraibano, o emérito professor de latim Joaquim da Silva, em 1881, chegou a referir-se ao abrigo por meio de um questionário formulado pelo Barão de Ramiz Galvão. No depoimento constam informações que no interior da Gruta do Caboclo havia pinturas e caracteres a tinta encarnada, e que os primeiros visitantes encontraram pequenas esteiras, já apodrecidas, cruzes de ossos, varinhas marcadas com riscos e tinta encarnada que revelam ter sido o abrigo destinado ao sepultamento de cadáveres dos "primitivos habitantes da terra" (ALMEIDA, 1958, p. 53). Apesar de representar um importante sítio arqueológico do estado da Paraíba e do Brasil, o tafone que corresponde a Gruta do Caboclo tem sido alvo recorrente de depredações e pode ser incluindo ao preocupante quadro de patrimônios históricos da sociedade que atualmente se encontram abandonados ou esquecidos (SANTOS & OLIVEIRA, 2015, p. 220; OLIVEIRA & SANTOS, 2017, p. 589).

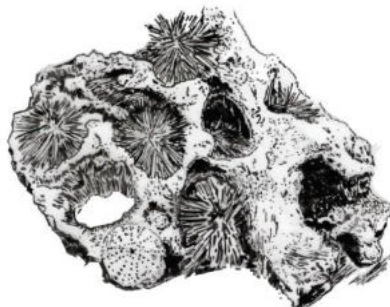
Os termos associados às estruturas menores (alvéolos e honeycombs) no Brasil

O termo utilizado como favos de mel (*honeycombs*, em inglês) para definir estruturas menores sobre afloramentos rochosos é empregado, inicialmente em 1870, pelo geólogo norte-americano Charles Frederick Hartt na obra intitulada "Geologia e Geografia Física do Brasil". Segundo as observações de Hartt (1870, p.36; 1941, p.58) é possível verificar depressões em formas de taça escavada na rocha, sendo o resultante do trabalho de perfuração da espécie de ouriços marinhos, denominados *Echinometra* (E. Michelin Desor), sobre o gnaisse de resistência desigual no entorno das ilhas de Maricá, em Cabo Frio, no estado do Rio de Janeiro (Figura 11). Segundo o autor alguns dos trechos assumem um franco aspecto de favos de mel (*honeycombs*) em sua superfície, devido a tais ninhos. Nesse caso, em específico, os favos de mel correspondem também ao registro icnológico (icnofósseis) de perfurações feito por organismos vivos, resultando na modificação sobre a superfície do substrato rochoso.

Outra menção sobre as formas menores é feita pelo geólogo estadunidense John Casper Branner no início do século XX. Na obra intitulada "Geologia Elementar", Branner descreve a ocorrência de superfícies cavernosas em morros graníticos próximos à localidade de Tanquinho, no estado da Bahia (BRANNER, 1915, p. 38). O autor comenta que as covas apresentam, usualmente, poucos centímetros de profundidade, no

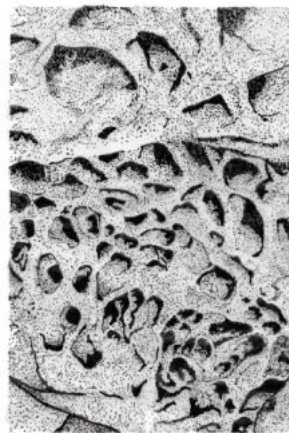
entanto, algumas vezes, transformam-se em verdadeiras cavernas (Figura 12). Branner considera que o processo de evaporação de soluções aquosas salinizadas, exercido de maneira contínua, resulta no desenvolvimento de covas, no caso, em tafone e *honeycombs*, nas superfícies das rochas (BRANNER, 1915, p. 38).

Figura 11 - A presença de perfurações, em forma de cavidade, gerada a partir da ação química-física de ouriços marinhos (*Echinometra*) em bloco rochoso. Em geral, o intenso reafeiçoamento sobre a superfície rochosa tende a apresentar uma feição tafoniforme. Além de ser considerado um registro icnológico, a ocorrência desse tipo de cavidade no interior do continente sugere, no local, a hipótese de oscilações marinhas pretéritas.



Modificado de BRANNER, 1915.

Figura 12 - Exemplo da ocorrência de formas menores do tipo favos de mel (*honeycombs*) na parte interna de um tafone, sobre a superfície rochosa.



Modificado de VV. AA., 1989.

Registros documentais, cavidades do tipo abrigo e os tafoni nas Geociências

O registro histórico de cavidades do tipo tafone encontra respaldo em obras documentais e numerosos relatos datados entre os séculos XVIII e XIX. No presente estudo foi realizado um levantamento cuidadoso sobre a possível menção de formas menores do relevo granítico-gnáissicos em breves informes na obra do Padre Francisco Telles de Menezes e, através de correspondência, do Capitão João Lopes Machado. Embora o material documental, referente aos séculos XVI e XVII, tenha sido também consultado, os relatos não apresentavam descrições, ou informações suficientes, que pudessem ser associados às cavidades do tipo tafone. No entanto, a ampla variedade de obras feitas por viajantes e estrangeiros no Brasil podem ainda conter registros a respeito do tema.

Outra temática levantada corresponde à discussão entre as cavidades do tipo caverna e do tipo abrigo para as formas tafoni que ocorrem no relevo. De acordo com as orientações do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV-ICMBio) a nomenclatura acertada para denominar a cavidade do tipo tafone é o termo abrigo. As características dimensionais apresentadas para o tipo abrigo, aparentemente, são as que mais se aproximam das feições tafoniformes em rochas granítico-gnáissicas, resultando na facilidade do reconhecimento na paisagem e, portanto, da forma em atividades de pesquisa de campo e, conseqüentemente, na padronização do termo para a área de pesquisa acadêmica. No entanto, é importante salientar que nem todo abrigo pode ser considerado um tafone, por exemplo, de cavidades do tipo abrigo em terrenos constituídos predominantemente por rochas calcárias.

As cavidades do tipo tafone e estruturas menores (alvéolos e *honeycombs*) correspondem a uma área convergente de estudo. No meio acadêmico pouco se tem debatido sobre essas formas, resultando, por vezes, em observações unilaterais e inférteis. É possível estabelecer, por meio da pesquisa sobre tafoni, conexões com diferentes áreas nas Geociências para o debate de ideias, de forma holística, que possam contribuir para o entendimento e importância dessas formas no Brasil.

CONCLUSÕES

As cavidades do tipo tafone são importantes feições geomorfológicas que ocorrem sobre o substrato rochoso granítico-gnáissico, comumente nas laterais e/ou zonas basais de monólitos, incluindo as concavidades que ocorrem em matacões (*boulders*) e *tors* sobre lajedos e incipientes domos rochosos. Embora as formas tafoniformes sejam observadas com recorrência na paisagem brasileira, principalmente, no Nordeste do Brasil, pouco se tem discutido sobre a sua origem e importância histórica. O registro de cavidades do tipo tafone no Brasil está vinculado ao pioneirismo de dois personagens, levados por diferentes percepções motivacionais, durante os séculos XVIII e XIX. As breves descrições elaboradas pelo missionário Padre Francisco Telles de Menezes e do militar Capitão João Lopes Machado são consideradas, atualmente, obras importantes para o desenvolvimento, notoriamente, da área de arqueologia, no Brasil. Ambos os personagens empreenderam, por meios próprios, e em distintos períodos históricos, o levantamento sistemático de pinturas e gravuras rupestres sobre formas menores do relevo granítico-gnáissico no Nordeste do Brasil.

Embora os tafoni não tenham sido o principal objeto de estudo, são as formas menores do relevo que auxiliam na preservação de marcos simbólicos, associados às pinturas rupestres e antigas áreas de sepultamento, que devido a particular configuração fisiográfica, semelhante a abrigos, resguardam parte da história pré-colonial e colonial do nordeste brasileiro. O presente trabalho constitui um levantamento sobre o tema histórico de cavidades do tipo tafone no Brasil, particularmente no Nordeste. O registro e a importância das formas menores de relevo, além de contribuir na discussão da área da Geomorfologia, permite estabelecer conexões com diferentes áreas do conhecimento científico, por exemplo, Geologia, Espeleologia, Paleontologia, Biologia, Geografia e História, e que tenham interesse em desenvolver pesquisas associadas às cavidades do tipo tafone no Brasil. Desse modo, a finalidade deste trabalho é abordar e discutir sobre a lacuna existente sobre os tafoni em território nacional, além de uma possível contribuição aos estudos de formas menores que ocorrem sobre o embasamento granítico-gnáissico no Nordeste do Brasil.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos. à equipe da biblioteca do Centro de Tecnologia e Ciência (CTC/C) e ao Núcleo de Memória, Informação e Documentação (MID) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) pelo auxílio na pesquisa documental e disponibilização das obras utilizadas; à Humberto Anastácio por gentilmente ceder as figuras 8 e 9; e à Juvandi de Souza Santos e Thomas Bruno Oliveira que gentilmente cederam a figura 10.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Fernando Flávio Marques de; HASUY, Yociteru; BRITO NEVES, Benjamin Bley de; FUCK, Reinhardt Adolfo. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews*, Amsterdam, n.17, p. 1-29. april. 1981.
- ALMEIDA, Horácio de. Brejo de Areia: memórias de um município. Rio de Janeiro, Ministério de Educação e Cultura, 1958. 303p.
- ALMEIDA, Luís Henrique Sapiensa; LEMOS, Marcelo Sant'ana; DIAS, Flávia; GUERRA, Luisa; ARAGÃO, Teresa Maria Franca Moniz de. Espeleologia e arqueologia em grutas em rochas cristalinas no município de Resende (RJ). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 34., 2017. Ouro Preto. Anais... Ouro Preto: SBE, 2017. p. 559-565.
- AMARAL, Ilídio do. Formas de Inselberge (ou montes-ilhas) e de meteorização superficial e profunda em rochas graníticas do Deserto de Moçâmedes (Angola), na margem direita do Rio Curoca. *Garcia de Orta - Série de Geografia*, Lisboa, n. 1, 1, p. 1-34. 1973.
- AMARAL, Ilídio do. A propósito de formas escavadas em leitos fluviais e em vertentes de rochas graníticas do Deserto de Moçâmedes (Angola), na margem direita do Rio Curoca. *Garcia de Orta - Série de Geografia*, Lisboa, n. 2, 1, p. 1-18. 1974.
- AMARAL, Ilídio do. Paisagens Morfológicas do Deserto de Moçâmedes (Angola) entre os Rios Curoca e Cunene (1ª. parte). *Garcia de Orta - Série de Geografia*, Lisboa, n. 4, 1-2, p. 1-28. 1977.
- ARARIPE, Tristão de Alencar. Cidades Petrificadas e inscrições lapidares no Brazil. *Revista Trimensal do Instituto Historico e Geographico Brasileiro*, Rio de Janeiro, Tomo L, 1, p. 213-294. 1887.
- ARCHANJO, Carlos José; HOLLANDA, Maria Helena Bezerra Maia de; RODRIGUES Sérgio Wilians de Oliveira; BRITO NEVES, Benjamin Bley; ARMSTRONG, Richard. Fabrics of pre and syntectonic granite plutons and chronology of shear zones in the Eastern Borborema Province, NE Brazil. *Journal of Structural Geology*, n. 30, 3, p. 310-336. march. 2008.
- AULER, Augusto Sarreiro. Expedição cadastra tafoni na Bahia. *Conexão Subterrânea - Boletim Redespeleo*, n. 49, p. 1. abril. 2007.

- AULER, Augusto Sarreiro; CASSIMIRO, Roberto; LIMA, Thiago Ferreira; MAIO, Mark. 2007. Morphology and genesis of large tafoni in eastern Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GRANITE CAVES, 2007, A Coruña. Anais... A Coruña: IUX/CEM, 2007. p. 15-15.
- BARBOSA, Elisabete do Nascimento; MENESES, Leonardo Figueiredo de; CAVALCANTE, Márcio Balbino. Um olhar sobre a Geodiversidade do Parque Estadual da Pedra da Boca (PE/PB). Revista de Geociências do Nordeste, n. 2, volume especial, p. 1269-1278. 2016.
- BERNARDI, Leopoldo Ferreira de Oliveira; PELLEGRINI, Thais Giovanni; TAYLOR, Erika Linzi Silva; BORGES, Cristina Machado; SANCHEZ, Tito Vidaurre; FERREIRA, Rodrigo Lopes. 2010. Aspectos Ecológicos do Ecossistema de uma Caverna Granítica em Pinhão Assado, Itamonte, Minas Gerais. In: CONGRESSO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UFLA, 19., 2010, Lavras. Anais... Lavras, SBPC, 2010.
- BERNARDI, Leopoldo Ferreira de Oliveira; PELLEGRINI, Thais Giovanni; TAYLOR, Erika Linzi Silva; FERREIRA, Rodrigo Lopes. Aspectos Ecológicos de uma Caverna Granítica no Sul de Minas Gerais. Espeleo-Tema, Campinas, n.23, 1, p. 5-11. 2012.
- BIGARELLA, João José. Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais volume 1. Florianópolis: Editora UFSC, 1994. 425p.
- BLUTEAU, Raphael. 1728. Vocabulario portuguez & latino: aulico, anatomico, architectonico volume 2. Coimbra, Collegio das Artes da Companhia de Jesus. Disponível em: <http://dicionarios.bbm.usp.br/pt-br/dicionario/edicao/1>. Data de acesso em: 05 jul. 2018.
- BRANNER, John Casper. Geologia Elementar. Rio de Janeiro: Livraria Francisco Alves, 1915. 404p.
- BRITO NEVES, Benjamin Bley; SANTOS, Edilton José dos; VAN SCHMUS, William Randall. Tectonic history of the Borborema Province. In: COR-DANI, Umberto Giuseppe; MILANI, Edison José; THOMAZ FILHO, Antônio; CAMPO, Diogenes de Almeida. (Org.). Tectonic Evolution of the South America. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia, 2000. 856p. p. 151-182.
- CAMPBELL, Elizabeth Mary. 1997. Granite landforms. Journal of the Royal Society of Western Australia, n.80, 3, september. p. 101-112.
- CASTRO, Neivaldo Araújo de. Evolução geológica Proterozóica da região entre Madalena e Taparuaba, Dominio Tectônico Ceará Central (Província Borborema). 2004. 221f. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2004.
- CASTRO, Neivaldo Araújo de. CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Mapa Geológico Folha Taparuaba SB.24-V-B-II. Programa Geologia do Brasil. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, escala 1:100.000. 2014.
- CAVALCANTE, Rogério; CUNHA, André Luiz Carneiro da; COSTA Alan Pereira da; DANTAS, Alexandre Ranier. CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Mapa

- Geológico Folha Picuí - SB.24-Z-B-VI. Recife, Projeto ARIM Seridó - Estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte, escala 1:100.000. 2017.
- CAVALCANTE, Márcio Balbino; MARIANO NETO, Belarmino. Parque Estadual da Pedra da Boca / PB: Um olhar sobre o planejamento do ecoturismo em unidades de conservação na Paraíba. *Revista Okara: Geografia em debate*, João Pessoa, n. 1, 2, p. 62-78. 2007.
- CAVALCANTE, Márcio Balbino. Uso da Geodiversidade em Unidades de Conservação: O caso do Parque Estadual da Pedra da Boca - PB. *Revista Estudos Geoambientais online*, n. 1, 1, p. 27-41. jan/abr. 2014.
- CECAV-ICMBio. Identificação de cavidades naturais subterrâneas - Suporte técnico ao processo de licenciamento. *EspeleoInfo - Boletim Eletrônico do CECAV*. n. 3, p. 3-3. dezembro. 2010.
- CHAVES, José Jeferson da Silva; LIMA, Joceane da Silva; BATISTA, Cintia Cleub Neves. 2016. Patrimônio geomorfológico em unidades de conservação: O caso do Parque Estadual da Pedra da Boca, município de Araruna (PB). In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 11., 2016, Maringá. Anais... Maringá, SINAGEO, 2016.
- CHAVES, José Jeferson da Silva. Estudo Geomorfológico sobre as cavidades naturais da Paraíba. 2017. 113f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba.
- CORRÊA NETO, Atlas Vasconcelos. Cavernas em granitos, gnaisses e depósitos de tálus. *O Carste*, n. 8, 1, p. 18-20. junho. 1996.
- CORRÊA NETO, Atlas Vasconcelos; RAMOS, Renato Rodriguez Cabral; GONÇALVES, Sérgio Barbosa; SILVA, Valéria Gallo de. Cavernas e grutas do Maciço da Tijuca, R.J.: Dados iniciais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36., 1990, Natal. Anais... Natal, SBG, 1990. p. 86-87.
- GODARD, Alain. *Pays et paysages du granite*. Paris: Presses Universitaires de France, 1977. 232p.
- GOMES, Iaponira Paiva. Caracterização petrográfica e petroquímica dos granitos tardi e pósteotônicos da região de Santa Quitéria-Ceará. 2006. 219f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, 2006.
- GONÇALVES, Frederico; RODET, Joel; OLIVEIRA, Dan Christien; MAGALHÃES JÚNIOR, Antônio. Cavidades em granitos no município de Santa Maria Madalena - RJ. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 31., 2011, Ponta Grossa. Anais... Ponta Grossa, SBE, 2011. p. 85-93.
- GUERRA, Antônio Teixeira. Paisagens físicas da Guanabara. *Revista Brasileira de Geografia*, n. 27, 4, p. 539-568. outubro/dezembro. 1965.
- GUIMARÃES, Thais de Oliveira. Caracterização física da área do Parque Estadual da Pedra da Boca - Araruna (PB). 2009. 71f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Geografia) - Departamento de Geociências, Universidade Federal da Paraíba, 2009.
- HARDT, Rubens. Grutas em rochas cristalinas / metamórficas. Estudo de Casos na Serra do Mar e da Mantiqueira SP/MG. 2002. 34f. Monografia (Trabalho de Conclusão

de Curso em Geografia) – Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia e Ciências e Letras de Ouro Fino, 2002.

- HARDT, Rubens. Cavernas em Granito e Gnaisse. Aplicação de um Sistema de Classificação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 27., 2003, Januária. Anais... Januária, SBE, 2003. p. 52-55.
- HARDT, Rubens; PINTO, Sérgio dos Anjos Ferreira. Carste em litologias não carbonáticas. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, n.10, 2, p. 99-105. 2009.
- HARTT, Charles Frederick. *Geology and Physical Geography of Brazil*. Boston: Fields, Osgood & CO, 1870. 620p.
- HARTT, Charles Frederick. *Geologia e Geografia Física do Brasil*. São Paulo: Editora Nacional, 1941. 649p.
- HUBP, José Lugo. *Diccionario Geomorfológico*. México, D. F.: Geografia para el Siglo XXI - Serie Textos Universitarios, 2011. 479p.
- IGUAL, Ericson Cernawsky. Gruta do Riacho Subterrâneo, Itu - SP (CNC SBE SP 700): A maior caverna em granito do Hemisfério Sul. *Boletim Eletrônico Teto Baixo*, n.2, p. 4-6. maio. 2011.
- LIMA, Danielle Lopes de Sousa. 2018. *Geomorfologia em estruturas graníticas: O caso do Maciço de Uruburetama, Ceará, Brasil*. 2018. 258f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Ceará.
- MACHADO, Maximiano Lopes. *Historia da Provincia da Parahyba*. João Pessoa: Imprensa Official Parahyba, 1912. 525p.
- MACHADO, Maximiano Lopes. *História da Província da Paraíba*. João Pessoa: Editora Universitária UFPB, 1977. 525p.
- MAIA, Rubson Pinheiro; NASCIMENTO, Marcos Antônio Leite. Relevos graníticos do Nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, n.19, 2, p. 373-389. 2018.
- MAIA, Rubson Pinheiro; BEZERRA, Francisco Hilário Rêgo; NASCIMENTO, Marcos Antônio Leite; CASTRO, Henrique Sampaio de; MEIRELES, Antônio Jeovah Andrade; ROTHIS, Luis Martin. Geomorfologia do campo de inselbergues de Quixadá, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, n.16, 2, p. 239-253. 2015.
- MAYOR RODRÍGUEZ, Juan Antonio. *Génesis de Cavidades Graníticas en Ambientes Endógenos y Exógenos*. 2011. Coruña, 396f. Tese (Doctorado em Geología) - Instituto Universitario de Geología Isidro Parga Pondal, Universidad de Coruña, 2011.
- MIGÓN, Piotr. *Granite Landscapes of the World*. New York: Oxford University Press Inc, 2006. 416p.
- MOCHIUTTI, Nair Fernanda Burigo; TOMAZZOLI, Edison Ramos. Espeleotemas de uma caverna granítica na Ilha de Santa Catarina: uma análise preliminar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 34., 2017. Ouro Preto. Anais... Ouro Preto: SBE, 2017. p. 327-333.
- NASCIMENTO, Marcos Antônio Leite do. *Petrologia do magmatismo tardi-Brasiliano no Maciço São José do Campestre (RN/PB), com ênfase no pluton alcalino Caxexa*.

2000. 142f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2000.
- OLIVEIRA, Thomas Bruno; SANTOS, Juvandi de Souza. Abrigos rochosos e sepultamentos indígenas no interior da Paraíba, Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 34., 2017. Ouro Preto. Anais... Ouro Preto: SBE, 2017. p. 587-593.
- PEDRAZA, Javier de Gilsanz. Geomorfología: Principios, métodos y aplicaciones. Madrid: Ed. Rueda, 1996. 414p.
- PEDRAZA, Javier de Gilsanz; SANZ, M. Angel; MARTÍN, Aurora. Formas graníticas de la Pedriza. Madrid: Agencia de Medio Ambiente de la Comunidad de Madrid, 1989. 205p.
- REUSCH, Hans Henrik. 1882. Notes sur la géologie de la Corse. Bulletin de la Société Géologique de France, Paris, n.11, p. 53-67.
- RODRIGUES, Sérgio Wilians de Oliveira; ARCHANJO, Carlos José; GROHMANN, Carlos Henrique. Quantificação da deformação finita nos metagranitoides Cariris Velhos na região de Alagoa Grande (PB). Geologia USP - Série científica, n.10, 3, p. 57-78. 2010.
- RODRIGUES, Wesley Feitosa. Evolução geomorfológica do inselberg Pedra da Andorinha, Taparuaba, Sobral, Brasil. 2018. 94f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, 2018.
- RODRIGUEZ-NAVARRO, Carlos. Evidence of honeycomb weathering on Mars. Geophysical Research Letters, n.25, 17, p. 3249-3252. 1998
- ROQUÉ, Carlos; ZARROCA, Mario; LINARES, Rogelio. Subsurface initiation of tafoni in granite terrains - Geophysical evidence from NE Spain: Geomorphological implications. Geomorphology, Amsterdam, n.196, p. 94-105. 2013.
- SANTOS, Juvandi de Souza; OLIVEIRA, Thomas Bruno de. Gruta do Caboclo: patrimônio arqueológico vandalizado na Paraíba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 33., 2015, Eldorado. Anais... Eldorado: SBE, 2015. p. 219-221.
- SILVA, Marinês da. Gênese e evolução das cavernas marinhas do Maciço Costeiro do Pântano do Sul, Ilha de Santa Catarina (SC). 2018. 238f. Tese (Doutorado em Geografia) - Departamento de Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina. 2018.
- SILVA, Maria Augusta Martins da; NETO, José Antônio Baptista; SILVA, André Luiz Carvalho da; SMITH, Bernard; MCALISTER, John; WARKE, Patrícia; CURRAN, Joanne. Intemperismo Decorrente da Acumulação de Sal e Formação de Alvéolos e Tafoni nos Afloramentos das Praias de Niterói (Rio de Janeiro, Brasil). Revista Brasileira de Geomorfologia, n.14, 2, p. 189-195. abr/jun. 2013.
- SILVA, Maria Augusta Martins da; SMITH, Bernard; NETO, José Antônio Baptista; SILVA, Cristiane da; MCALISTER, John; WARKE, Patrícia; CURRAN, Joanne. Produtos do Intemperismo em Afloramentos e Rochas Ornamentais em Ambiente Urbano Poluído - Niterói / RJ. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 41., 2002, João Pessoa. Anais... João Pessoa: SBG, 2002. v.1, p. 86-87.

- TSCHANG, Hsi-Lin. Geomorphological observations on the tafoni forms of Hong Kong. *The Chung Chi Journal, Hong Kong*. n. 13, 1, p. 32-51. december. 1974.
- TWIDALE, Charles Rowland. Origin of Wave Rock, Hyden, Western Australia. *Transactions of the Royal Society of South Australia, Adelaide*. n. 92, p. 115-123. 1968.
- TWIDALE, Charles Rowland. *Granite Landforms*. Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 1982. 372p.
- TWIDALE, Charles Rowland. Granite landform evolution: Factors and implications. *Geologische Rundschau, Stuttgart*, n.75, 3, p. 769-779. 1986.
- TWIDALE, Charles Rowland. La iniciación subsuperficial de las formas graníticas y sus implicaciones en las teorías generales de evolución del paisaje. *Cuaderno do Laboratorio Xeolóxico de Laxe, Coruña*, n.13, p. 49-68. 1989.
- TWIDALE, Charles Rowland. The research frontier and beyond: Granitic terrains. *Geomorphology, Amsterdam*, n.7, p. 187-223. 1993.
- TWIDALE, Charles Rowland. Bornhardts and Associated Fracture Patterns. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, n.62, 1, p. 139-153. 2007.
- TWIDALE, Charles Rowland; BOURNE, Jennifer Anne. The subsurface initiation of some minor granite landforms. *Journal of the Geological Society of Australia*, n.22, 4, p. 477-484. december. 1975.
- TWIDALE, Charles Rowland; VIDAL ROMANÍ, Juan Ramón. *Landforms and Geology of Granitic Terrains*. Leiden: Balkema, 2005. 351p.
- TWIDALE, Charles Rowland; BOURNE, Jennifer Anne; VIDAL ROMANÍ, Juan Ramón. Multistage landform development in various settings and at various scales. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe, Coruña*, n.27, p. 55-76. 2002.
- UÑA ÁLVAREZ, Elena de. Tafoni en rocas graníticas - Primera valoración estadística sobre las tasas de desarrollo en el macizo de Ourense (Galicia, NW de la Península Ibérica). *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe, Coruña*, n.29, p. 265-289. 2004.
- UÑA ÁLVAREZ, Elena de. Definición de formas graníticas tipo tafone: Nomenclatura y significado geomorfológico. *Mínus*, n.13, p. 331-342. 2005.
- UÑA ÁLVAREZ, Elena de. Interpretación de sistemas naturales complejos - El problema de los tafoni. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, n.60, p. 349-368. 2012.
- VIDAL ROMANÍ, Juan Ramón. Microformas graníticas tipo tafoni (cachola) y gnamma (pía). Un micromodelado sin relación con el clima o la estacionalidad. *Caderno Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, n.7, p. 273-277. 1984.
- VIDAL ROMANÍ, Juan Ramón. Geomorfología granítica en Galicia (NW España). *Cuaderno do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, n.13, p. 89-163. 1989.
- VIDAL ROMANÍ, Juan Ramón. Formas menores en rocas graníticas un registro de su historia deformativa. *Cuaderno Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, n.15, p. 317-328. 1990.

- VIDAL ROMANÍ, Juan Ramón. Las aportaciones de Casiano de Prado a la geomorfología granítica. *Geogaceta*, n.23, p. 157-159. 1998.
- VIDAL ROMANÍ, Juan Ramón. Forms and structural fabric in granite rocks. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, Coruña, n.33, p. 175-198. 2008.
- VIDAL ROMANÍ, Juan Ramón; GRACIA PRIETO, Francisco Javier. Formación de cavidades en rocas graníticas bajo condiciones no epigénicas. *Cuaderno Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, Coruña, n.12, p. 47-57. 1987.
- VIDAL ROMANÍ, Juan Ramón; TWIDALE, Charles Rowland. *Formas y Paisajes Graníticos*. Coruña: Universidad de Coruña, 1998. 411p.
- VIDAL ROMANÍ, Juan Ramón; YEPES TERMINO, Jorge. Historia de La Morfogénesis Granítica. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, Coruña, n.29, p. 331-360. 2004.
- VIDAL ROMANÍ, Juan Ramón, UÑA ALVAREZ, Elena de; VAQUEIRO RODRÍGUEZ, Marcos. An endogenous origin for the form tafone developed in magmatic rocks. In: REUNIÓN NACIONAL DE GEOMORFOLOGÍA, 8., 2014a, Cáceres. *Anais... Cáceres: Relieves Graníticos y Cársticos*, 2014a., p. 486-489.
- VIDAL ROMANÍ, Juan Ramón; VAQUEIRO RODRÍGUEZ, Marcos; SANJURJO, Jorge. Granite landforms in Galicia. In: GUTIÉRREZ, Francisco; GUTIÉRREZ, Mateo. (Org.). *Landscapes and landforms of Spain*. New York: Springer, 2014b., p. 63-69.
- VIDAL ROMANÍ, Juan Ramón; VAQUEIRO RODRIGUEZ, Marcos; VÁZQUEZ, Rei Costas. Ría de Aldán. *Colección Geolodía*, Salamanca, n.18, p. 1-32. 2018.
- VIEIRA, António. Alguns aspectos da paisagem da Serra de Montemuro. Formas de pormenor do modelado granítico. In: Escola Superior de Educação da Guarda (Org.). *Livro de Homenagem a José Miguel Carreira Amarelo*. Guarda, ESEG Publicações, 2003. 313p. p. 193-205.
- VV.AA. 1989. *A natureza ameaçada - Xea, flora e fauna de Galicia en perigo*. Coruña, Consello da Cultura Galega, 431p.
- ZAMPAULO, Robson de Almeida; FERREIRA, Jovenil de Souza; LIMA, Marcos Enoque de Leite; PEREIRA, Maria Helena. Prospecção e topografia da gruta granítica T47 (Bertioga - SP). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 28., 2005, Campinas, *Anais... Campinas: SBE*, 2005. p. 153-159.
- ZAMPAULO, Robson de Almeida; SOUZA, Jovenil Ferreira; PEREIRA, Maria Helena; LUZ, Claudia Santos. 2007. Impactos em grutas graníticas na Serra dos Cocais (Valinhos-SP): Patrimônio espeleológico desconhecido. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 29., 2007, Ouro Preto, *Anais... Ouro Preto: SBE*, 2007. p. 335-340.

ANEXO C - Uso de drone para imageamento, prospecção e caracterização de tanques naturais na área paleontológica quaternária de Itapipoca, estado do Ceará: Resultados preliminares.

XIMENES, C.L.; WALDHERR, F.R.; CASTRO, H.S.; MACHADO, R.M.; ARAÚJO-JÚNIOR, H.I. Uso de drone para imageamento, prospecção e caracterização de tanques naturais na área paleontológica quaternária de Itapipoca, estado do Ceará: Resultados preliminares. *In*: SIMPÓSIO VIRTUAL DE PALEONTOLOGIA DO QUATERNÁRIO, 1., 2020, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IVP, 2020. p. 1.

USO DE DRONE PARA IMAGEAMENTO, PROSPECÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE TANQUES NATURAIS NA ÁREA PALEONTOLÓGICA QUATERNÁRIA DE ITAPIPOCA, ESTADO CEARÁ: RESULTADOS PRELIMINARES

C. XIMENES¹; F. WALDHERR²; H. CASTRO³; R. MACHADO¹; H. ARAÚJO-JÚNIOR⁴

¹Museu de Pré-História de Itapipoca, Rua Dom Aureliano Matos, 224, Centro, Itapipoca/CE, Brasil. ²Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Av. Athos da Silveira Ramos, 274, Cidade Universitária, Rio de Janeiro/RJ, Brasil. ³Gaia Tech, Av. Sargento Herminio, 4509, Padre Andrade, Fortaleza/CE, Brasil. ⁴Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia, Rua São Francisco Xavier, 524, sala 4006-A, Maracanã, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

ckx.ximenes@gmail.com, felipewald@gmail.com, henriquegeosdc@gmail.com, r.matosmachado@gmail.com, herminio.araujo@uerj.br

O uso de drones ou RPA (aeronave não tripulada autônoma) é cada vez mais frequente como recurso de geotecnologia aplicado às pesquisas paleontológicas. Nesse contexto, realizamos no mês de janeiro/2020 uma campanha de campo para aquisição de imagens aéreas no município de Itapipoca, CE, para caracterização geomorfológica e geoestrutural de quatro localidades com concentrações de tanques naturais, sendo três delas já consolidadas como sítios paleontológicos de megafauna pleistocênica (Jirau, João Cativo e Lajinhas) e uma localidade com alto potencial para novas ocorrências de jazigos fósseis. O equipamento utilizado foi um RPA de classe 3, modelo Phantom 4 Pro, equipado com uma câmera de 20 megapixels acoplada. Os levantamentos aéreos foram feitos com voos a 100 m de altura em relação ao solo, o que proporciona um GSD (representação do *pixel* da imagem do terreno) de 2,73 cm. O aplicativo de voo usado foi o Pix4D *Capture*, instalado em um dispositivo móvel de controle com sistema operacional IOS (*iPhone 6*). Foram realizados 10 voos para cobrir totalmente os quatro alvos imageados e a somatória das suas superfícies totalizaram 273,1 ha. O processamento das imagens foi feito no programa de aerofotogrametria *Agsoft Photoscan*. Como produtos gerados, para cada um dos quatro alvos, foram produzidos ortofotomosaicos georreferenciados, com *pixels* de 2,7 cm, e modelos digitais de elevação (DEM) com resolução em alta qualidade, proporcionando a extração de curvas de nível com espaçamentos de 10 centímetros. Os resultados analíticos preliminares possibilitaram uma melhor visualização dos tanques fósseis no contexto ambiental; determinação das rotas preferenciais dos fluxos de sedimentos que os preenchem; identificação de tanques ainda não mapeados; melhor compreensão dos processos de aplainamento dos terrenos cristalinos adjacentes; contexto de posicionamento dos tanques em relação à drenagem local e estudo do fraturamento regional das rochas e orientação dos tanques. Um dos resultados mais significativos foi a confirmação de uma nova localidade de tanques naturais, identificada nesta comunicação de “Alvo Y”, previamente prospectada por imagens de satélite do *software Google Earth Pro*, com grande potencial para ocorrência de fósseis de megafauna, devido à existência de cinco estruturas com dimensões propícias a essas acumulações. [Faperj; PMI].

ANEXO D - 20 Anos de Experiências em Popularização da Geologia no Brasil e na Alemanha: Considerações a partir dos Projetos "Caminhos Geológicos" e "Cem Obras-primas".

WALDHERR, F.R.; SILVA, T.M.; CAMBRA, M.F.E.S.; MANSUR, K.L. 20 Anos de Experiências em Popularização da Geologia no Brasil e na Alemanha: Considerações a partir dos Projetos "Caminhos Geológicos" e "Cem Obras-primas". **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 44, n. 38302, p. 1-12. 2021.







Anuário do Instituto de Geociências

Universidade Federal do Rio de Janeiro
<https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/>

ISSN 0101-9759
 e-ISSN 1982-3908

20 Anos de Experiências em Popularização da Geologia no Brasil e na Alemanha: Considerações a partir dos Projetos “Caminhos Geológicos” e “Cem Obras-primas”

20 Years of Experiences in Popularization of Geology in Brazil and Germany: Considerations from the Projects “Geological Paths” and “Hundred Masterpieces”

Felipe Rodrigues Waldherr¹ , Telma Mendes da Silva² , Marcus Felipe Emerick Soares Cambra³  & Kátia Leite Mansur⁴ 

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

²Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geografia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

³Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia, Departamento de Geologia Regional e Geotectônica, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

⁴Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
 E-mails: felipewald@gmail.com; telmendes@globocom; cambrageo@gmail.com; katia@geologia.ufrj.br

Resumo

Ao iniciar o século XXI, as temáticas associadas à proteção e conservação do meio ambiente, em especial elementos da geodiversidade com valores excepcionais, obtiveram um importante avanço no que se refere às iniciativas que visavam a popularização do conhecimento científico. No Brasil, a implementação do “Projeto Caminhos Geológicos” (PCG), no estado do Rio de Janeiro, é considerado um marco importante na divulgação e inserção da cultura geológica na sociedade. Na Alemanha, de forma simultânea, o “Projeto ‘Cem Obras-primas - Os Geossítios mais belos da Baviera’”, baseando-se igualmente na valorização das geociências, foi inaugurado na mesma época no estado da Baviera. Em ambos projetos as iniciativas apresentaram como alicerce fundamental a transmissão de uma enriquecedora experiência geológica, além de integrar uma proposta educativa e de turismo científico sobre a geodiversidade. A valorização do patrimônio geológico pode ser atribuída, em especial, através de um processo permanente de ampla divulgação, envolvendo a instalação de painéis interpretativos, disponibilidade ao conteúdo informativo através de plataformas digitais e/ou por meio físico e, fundamentalmente, de excursões de campo em pontos previamente selecionados dentro dos limites estaduais. Próximo de completar 20 anos desde a instalação dos primeiros painéis, a abordagem pioneira de ambos os projetos ainda constitui o exemplo mais bem-sucedido de inserção da popularização da geologia nos seus países. No entanto, após todo este tempo, torna-se necessário reavaliar os aspectos positivos e negativos dessas “experiências geológicas” de maneira a contribuir para sua continuidade, elaborando reflexões e possíveis melhorias à proposta dos projetos.

Palavras-chave: Patrimônio Geológico; Geodiversidade; Popularização da Geologia

Abstract

At the beginning of the 21st century, the themes associated with the protection and conservation of the environment, especially elements of geodiversity with exceptional values, achieved an important advance with regard to initiatives aimed at the popularization of scientific knowledge. In Brazil, the implementation of the Geological Paths Project, in the state of Rio de Janeiro, is considered an important milestone in the dissemination and insertion of society in geological culture. In Germany, simultaneously, the “Hundred-Masterpieces - Bavaria's most beautiful Geosites” Project, also based on the valorization of geosciences, was opened at the same time in the state of Bavaria. In both projects, the initiatives presented as a fundamental foundation the transmission of an enriching geological experience, in addition to integrating an educational and scientific tourism proposal on geodiversity. The appreciation of geological heritage can be attributed, in particular, through a permanent process of wide dissemination, involving the installation of interpretive panels, availability of information content through digital platforms and / or by physical means and, fundamentally, field trips at previously selected points within state limits. Close to completing 20 years since the installation of the first panels, the pioneering approach of both projects is still the most successful example of inserting the popularization of geology in their countries. However, after all this time, it is necessary to reassess the positive and negative aspects of these “geological experiences” in order to contribute to their continuity, elaborating reflections and possible improvements to the project proposal.

Keywords: Geological Heritage; Geodiversity; Popularization of Geology



1 Introdução

A sociedade moderna tem adquirido, em todo seu conjunto, a consciência do meio ambiente como uma simbiose holística, resultante da contínua interrelação entre os elementos bióticos e abióticos (Alonso, 2012). Ao iniciar o século XXI, juntamente com o terceiro milênio, as temáticas associadas à proteção e conservação do meio ambiente, em particular o patrimônio geológico, obtiveram um importante avanço ao que se refere à implementação de ações em conjunto na tentativa de popularização do conhecimento científico (Schmitt & Mansur, 2001; Schmitt *et al.*, 2004; Brilha, 2005, 2016; Nascimento *et al.*, 2005; Azevedo, 2007; Glaser *et al.*, 2008; Alonso, 2012; Miranda & Lema, 2013; Mansur, 2018; Mansur & Erthal, 2003; Mansur & Nascimento, 2007; Mansur *et al.*, 2012, 2013; 2018; Jorge & Guerra, 2016; Lagally, 2007; Lagally & Loth, 2017; Lagally *et al.*, 2014; Silva & Aquino, 2017; Costa & Oliveira, 2018).

De acordo com Alonso (2012), é de conhecimento geral que ao longo do tempo geológico uma ampla variedade de “mundos” surgiu e desapareceu na medida em que os continentes e oceanos foram encaixados e separados a partir de um gigantesco quebra-cabeça. Da mesma maneira que uma pequena parcela de milhões de espécies que habitaram a Terra deixaram seus despojos conservados, através dos fósseis, em enormes cemitérios do passado que constituem “atualmente” as camadas rochosas. A ocorrência de pontos específicos na superfície terrestre, distribuídos geograficamente e sob múltiplas escalas tempo-espaciais, constitui, em linguagem metafórica, nas páginas de um gigantesco livro pétreo que se encontra à mercê do próprio tempo e acessível a quem dispuser do interesse pela leitura.

O crescimento desta consciência do ponto de vista do meio físico em relação à Geodiversidade, em especial ao patrimônio geológico, tem sido alcançado nas duas últimas décadas, principalmente, em virtude de um amplo número de iniciativas, nacionais e internacionais, que buscam a proximidade cada vez maior entre o conhecimento geocientífico e a sociedade. A comunicação tem função essencial e têm aberto novos parâmetros em relação aos mecanismos utilizados na transmissão do conhecimento científico para a população através de projetos baseados na experiência geológica e na implementação de materiais interpretativos (Mansur, 2018; Mansur & Erthal, 2003; Mansur & Nascimento, 2007; Mansur *et al.*, 2014; Nascimento *et al.*, 2005; Azevedo, 2007; Pressi & Cambra, 2014; Cambra *et al.*, 2018a, 2018b, 2018c; Jorge & Guerra, 2016; Lagally, 2007; Lagally & Loth, 2017; Lagally *et al.*, 2014).

A partir dos anos 2000 uma série de países implementaram esforços articulados, buscando reforçar a comunicação entre o conhecimento científico e a população

e, conseqüentemente, na preservação do patrimônio geológico e de sua geodiversidade. Entre as maneiras de comunicação têm destaque a instalação de “placas informativas” ou “painéis interpretativos” com conteúdo geocientífico distribuídos em pontos de interesse geológicos (Pacheco & Brilha, 2014). A implementação dos aparatos informativos e do suporte educacional em rede pode ser considerado um avanço incontestável na divulgação da cultura geológica através da interpretação dos geossítios ou sítios de geodiversidade (Brilha, 2016), tanto a nível local, regional, nacional quanto internacional. Segundo Liccardo *et al.* (2012) a informação geocientífica constitui um complemento importante, uma vez que os próprios indivíduos que visitam os sítios geológicos assimilam a informação e transformam-se em agentes de divulgação deste conhecimento.

Na Europa é possível citar, por exemplo, um dos projetos de importante repercussão internacional, baseado na implementação de painéis interpretativos com conteúdo geológico e uma ampla rede de divulgação científica, intitulado “*Hundert Meisterwerke - Die Schönsten Geotope Bayerns*” que em tradução livre ao idioma português tem o significado de “*Cem Obras-primas - Os Geossítios mais belos da Baviera*” (Lagally & Loth, 2017). O projeto foi implementado no início dos anos 2000 pelo Departamento de Pesquisa Geológica da Agência de Meio-ambiente da Baviera, na Alemanha, sendo atualmente reconhecido como uma das iniciativas mais bem-sucedidas (Lagally & Loth, 2017) para a popularização do conhecimento geológico e da inserção da sociedade nas discussões sobre a geodiversidade e a sua conservação (geoconservação).

No Brasil, a implementação de projetos vinculados a divulgação científica e popularização do patrimônio geológico têm sido feita de forma gradual e em diferentes níveis de alcance (Mansur *et al.*, 2013). Ainda de acordo com os autores, no âmbito estadual, destaca-se o pioneirismo do “Projeto Caminhos Geológicos”, lançado no ano de 2000 pelo Departamento de Recursos Minerais do estado do Rio de Janeiro (DRM-RJ) durante o *31st International Geological Congress*, que ocorreu na cidade do Rio de Janeiro (Mansur *et al.*, 2013). O “Projeto Caminhos Geológicos” tem sido igualmente reconhecido pela grande aceitação e popularidade em relação ao empenho na transmissão do conhecimento científico à sociedade. Além de ressaltar o patrimônio geológico, trazendo à tona sua importância no contexto da dinâmica terrestre, a própria inserção do conteúdo científico resultou na ampliação de uma série de discussões sobre geoconservação, geoturismo e geodiversidade.

Deste modo, o objetivo do presente trabalho é apresentar brevemente duas experiências de popularização do conhecimento geológico que ocorreram, de forma simultânea, no início dos anos 2000 no Brasil e na Alemanha.

Ambos os projetos se utilizaram de múltiplos recursos para a inserção do conteúdo científico na sociedade. Cabe ressaltar, em especial, a instalação de diversos painéis interpretativos (um dos principais marcos da experiência geológica) em Geossítios selecionados no âmbito estadual. A articulação entre sociedade, academia e esferas governamentais resultaram em uma ampla variedade de questões em múltiplas escalas (local e estadual), desde a aplicação, acesso, permanência, manutenção dos aparatos instalados pelos projetos até aos debates enriquecedores vinculados a temática da Geodiversidade. Além de expor à época os benefícios de uma incipiente experiência geológica, o trabalho também discute a relevância e os problemas para uma possível continuidade em relação aos projetos.

2 Os Painéis Interpretativos: “Caminhos Geológicos” e “Cem Obras-primas”

2.1 O “Projeto Caminhos Geológicos”

O objetivo geral do “Projeto Caminhos Geológicos” consiste em promover a difusão do conhecimento geológico do estado do Rio de Janeiro como base para a preservação de seus monumentos naturais, verdadeiro patrimônio de todos os cidadãos. E, assim, ao longo de quase duas décadas de existência, a partir de uma proposta ecológica, científica e cultural, o projeto vem disseminando a cultura geológica entre as comunidades locais, visitantes, profissionais e cidadãos em geral, reconhecendo os monumentos geológicos e geomorfológicos do estado para a sua preservação e, desta maneira, fortalecendo o potencial turístico das

regiões através da criação de novos circuitos de visitação (Mansur *et al.*, 2013). Embora a ideia inicial do projeto tenha sido concebida no ano de 2000, os primeiros painéis interpretativos foram instalados somente em agosto de 2001 no município de Armação de Búzios, na Região dos Lagos do estado do Rio de Janeiro.

A instalação dos primeiros painéis teve como principal objetivo apresentar um roteiro geológico a ser percorrido e contemplado pela população local e visitantes do município de Armação dos Búzios. De acordo com Schmitt & Mansur (2001) o município recebeu na época o total de cinco painéis interpretativos, sendo dois instalados no centro urbano - Pórtico e Orla Bardot (Figura 1) – e os demais sobre os afloramentos rochosos de maior interesse científico: dois na Ponta da Lagoinha e um na Ponta do Marisco na Praia de Geribá. Cabe ressaltar que devido ao título expresso nos painéis inaugurados o município acabou por receber a alcunha de “O Himalaia Brasileiro”, o qual a explicação geológica faz alusão à ocorrência de rochas metamórficas vinculadas a Orogenia Búzios, um evento colisional, transcorrido há cerca de 520 milhões de anos e que resultou na formação de extensas cadeias montanhosas, semelhante ao relevo observado atualmente nos Himalaias (Schmitt & Mansur, 2001).

Em virtude do imediato reconhecimento de sua relevância pela comunidade geocientífica do Brasil, em 2008 a equipe do projeto foi convidada a coordenar, em conjunto com o Ministério da Ciência e Tecnologia e a Casa da Ciência da UFRJ, o “Projeto Caminhos de Darwin”, que tem como principal objetivo divulgar a passagem



Figura 1 Painéis interpretativos “Himalaia Brasileiro” do Projeto Caminhos Geológicos instalado no Pórtico de Armação dos Búzios em 2001. A - Painel (face em português) danificada pelas intempéries. Fonte: Cambra (2011); B - Painel (face em inglês) recuperado em fevereiro de 2019 pela parceria entre Departamento de Geologia da UFRJ, Faculdade de Geologia da UERJ e Secretaria Municipal de Turismo, Cultura e Patrimônio Histórico. O painel encontra-se disponível para consulta no link: <http://www.drm.rj.gov.br/index.php/downloads/category/50-armao-de-bzios.html>. Fonte: Prefeitura de Armação dos Búzios (2019).

do famoso cientista inglês pelas doze cidades durante a excursão realizada no norte do estado fluminense no ano de 1832, registrada em seus diários e cadernetas de campo (Simões *et al.*, 2011). Vale ressaltar que ambos os projetos elaboram painéis interpretativos para o geoturismo e também desenvolvem outras atividades educativas e de popularização da ciência. Atualmente, o projeto “Caminhos Geológicos” tem o número total de 111 painéis interpretativos implementados em 32 municípios fluminenses, contabilizando 93 painéis geológicos e mais 18 integrados aos Caminhos de Darwin (Figura 2).

O Projeto Caminhos Geológicos ainda inspirou a implementação de projetos com iniciativas semelhantes em outros estados brasileiros (Mansur *et al.*, 2013), a saber: “Sítios Geológicos e Paleontológicos do Paraná”, da MINEROPAR (Serviço Geológico do Paraná);

“Caminhos Geológicos da Bahia”, implementado pela CBPM e Petrobras; “Monumentos Geológicos do Rio Grande do Norte”, do IDEMA; “Monumentos Geológicos de São Paulo”, do IG-SP; e, mais recentemente, o “Projeto Georoteiros” do Rio Grande do Sul, de uma associação civil sem fins lucrativos e criada a partir de uma iniciativa de extensão universitária da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS. A ação ampliada para divulgação científica de monumentos geológicos pôde demonstrar, ao longo dos últimos 20 anos, um amplo espaço para o desenvolvimento e iniciativa de projetos vinculados ao geoturismo, além da divulgação do patrimônio geológico para a sociedade e do fortalecimento de uma consciência de preservação ambiental (Figura 3) (Mansur *et al.*, 2013, 2018; Cambra *et al.*, 2018b).

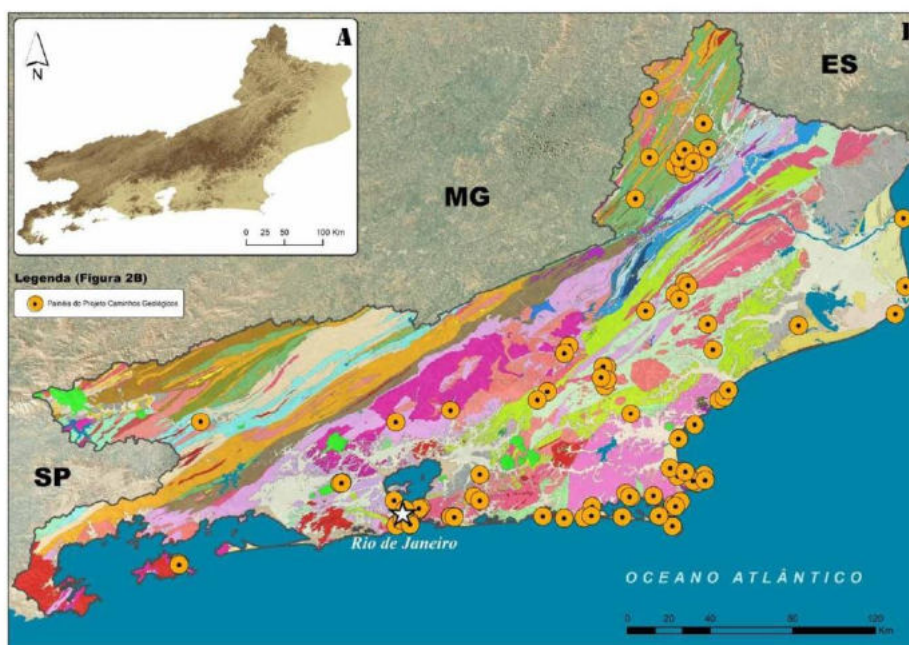


Figura 2 Distribuição geográfica dos painéis do Projeto Caminhos Geológicos. A - Mapa hipsométrico do estado do Rio de Janeiro. Adaptado de: Miranda (2005); B - Mapa geológico do estado do Rio de Janeiro com a localização dos painéis vinculados ao Projeto Caminhos Geológicos (PCG), incluindo os painéis do Caminhos de Darwin. Fonte: Adaptado de Heilbron *et al.* (2016). O mapa geológico e de recursos minerais do estado do Rio de Janeiro encontra-se disponível para consulta no link: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/18458?show=full>.



Figura 3 Exemplos da experiência geológica no contexto do geoturismo urbano. A – Painel interpretativo “A Odisseia do Pão de Açúcar” do Projeto Caminhos Geológicos, inaugurado em fevereiro de 2006 e localizado na pista “Claudio Coutinho” na base do Morro do Pão de Açúcar; este que é considerado um dos principais ícones turísticos do Rio de Janeiro, sendo reconhecido internacionalmente por sua beleza cênica. O painel encontra-se disponível para consulta no link: <http://www.drm.rj.gov.br/index.php/downloads/category/68-rio-de-janeiro.html>. Fonte: Valeriano (2006); B – Vista aérea da face norte do Pão de Açúcar, voltada para a Baía de Guanabara. Registro fotográfico: Thiago Haussig (2015); C – Exemplo de gravura que destaca a importância cênica e histórica do Pão de Açúcar. Esta imagem foi retratada por Charles Landseer no início do século XIX. Fonte: Landseer (1827).

2.2 O Projeto Cem Obras-primas

O projeto intitulado “Cem Obras-primas” foi coordenado pelo Departamento de Pesquisa Geológica da Agência de Meio-ambiente da Baviera e teve sua consolidação no ano de 2001. De acordo com o trabalho sobre a experiência geológica na Baviera, de autoria de Lagally & Loth (2017), o projeto ficou encarregado de selecionar 100 Geossítios em todo o estado da Baviera, situado no sudeste da Alemanha, tendo como responsabilidade a apresentação ao público de cada sítio através de painéis explicativos, folhetos e informações disponíveis em plataformas digitais. O projeto em questão outorgava à localidade selecionada um prêmio oficial do Ministério do Meio Ambiente da Baviera. Ainda segundo os autores

alemães foi dada muita ênfase à solicitação de patrocínio por organizações locais, de caráter público e/ou privado, a fim de transferir a responsabilidade da manutenção e do monitoramento do Geossítio. O marco inicial do projeto “Cem Obras-primas” ocorreu no dia 10 de abril de 2002 na cidade de Viechtach, distrito de Regen, durante a 6ª Reunião Internacional de Geossítios da Sociedade Geológica Alemã. Na ocasião o então Ministro do Meio Ambiente da Baviera, Senhor Wemer Schnappauf, iniciou o projeto inaugurando o primeiro painel interpretativo no entorno do monumento natural, no caso, a *Bayerischer Pfahl* ao público (Figura 4).

A *Bayerischer Pfahl* consiste em uma imponente escarpa rochosa de coloração muito branca, resultante de um preenchimento hidrotermal de quartzo sobre uma zona de falha com uma profundidade estimada em 6 km (Lagally

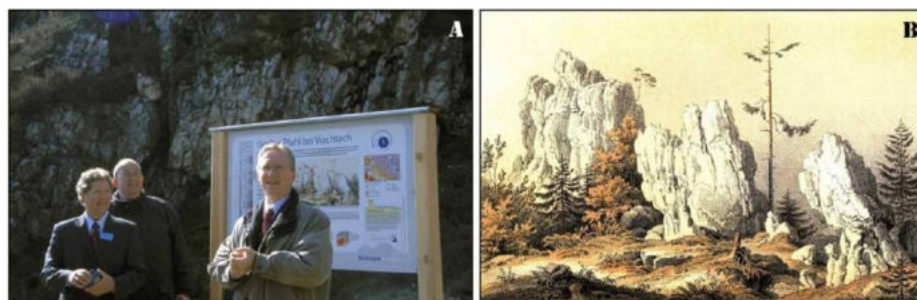


Figura 4 A inauguração de painel interpretativo e a representatividade histórica. A – Painel interpretativo *Bayerischer Pfahl* ou “Estaca Bávara” na localidade de Viechtach, na Alemanha. A inauguração do painel foi realizada com a presença do então Ministro do Meio Ambiente, Werner Schnappauf (no centro da foto). Fonte: Lagally & Loth (2017); B – Imagem que destaca a importância histórica do afloramento constituído por veio de quartzo próximo à localidade de Viechtach – Alemanha. A gravura, datada de 1868, compõe parte da obra intitulada “Descrição Geognóstica do Reino da Baviera, 2º Volume”, de autoria do famoso geólogo alemão Carl Wilhelm von Gümbel e, atualmente, representa o primeiro geossítio selecionado para o projeto “Cem Obras-primas”. Fonte: Gümbel (1868).

& Loth, 2017). Ao longo dos milhões de anos a barreira constituída predominantemente de quartzo leitoso resistiu às intempéries, formando uma impressionante muralha com largura de até 120 metros e altitude que alcança até 30 metros. A *Bayerischer Pfahl* ou “Estaca Bávara” é conhecida, no meio popular, também como a “Muralha do Diabo” em razão da morfologia única e atrativa na Baviera Oriental. No ano de 2011, o projeto finalmente foi concluído com a inauguração pública do Centésimo Geossítio e publicação de um guia com informações valiosas sobre cada Geossítio, numerado sequencialmente de 01 a 100 (Figura 5), sendo também disponibilizado na plataforma digital do Departamento de Pesquisa Geológica da Agência de Meio-ambiente da Baviera.

3 As Experiências Geológicas Fluminense e Bávara: Aspectos Positivos e Negativos

As iniciativas em ambos os projetos de referência, “Caminhos Geológicos” e “Cem Obras-primas”, apresentam como alicerce fundamental a transmissão de uma enriquecedora experiência geológica através da divulgação do conhecimento geocientífico em escala estadual. Os projetos também se caracterizaram pela construção de uma ampla rede de parcerias com instituições públicas e privadas, tanto para elaboração quanto para manutenção da sinalização geocientífica implementada (Mansur et al., 2013, Lagally & Loth, 2017).

Os projetos citados também desenvolveram outros meios de divulgação geocientífica, tais como: elaboração e impressão de folhetos e materiais didáticos sobre os

sítios geológicos; instalação de painéis interpretativos e placas indicativas (sinalizações que apontam para a existência dos painéis interpretativos); monitoramento, manutenção e atualização das sinalizações instaladas e produziram acesso às informações digitais sobre os pontos de interesse geológico em plataformas na *internet*, disponibilizando inclusive trabalhos acadêmicos e referências bibliográficas que embasaram a elaboração das placas explicativas (Figura 6). É possível observar a semelhança aos painéis brasileiros na disposição de informações de conteúdo científico e na valorização de imagens; no entanto, entre as informações apresentadas no painel alemão somente duas delas não são apresentadas no Projeto “Caminhos Geológicos”, sendo elas as de números 2 e 9. Este painel alemão é denominado “*Vulkankrater Gebirgsstein*”, que pode ser traduzido ao português como “Rocha de uma Cratera Vulcânica” e está situado na localidade de Oberbach, na região do Rhön, estado da Baviera – Alemanha.

É interessante ressaltar que os lemas propostos, em ambos os projetos, deixam nítido a preocupação em disseminar a cultura e a experiência geológica, a saber: “*A Terra levou alguns bilhões de anos para construir as rochas, os minerais, as montanhas e os oceanos. Proteja essa obra-prima*”, foi o escolhido para os “Caminhos Geológicos”, enquanto que as “Cem Obras-primas” tem como máxima o lema “*Experiência Geológica: Somente o que se sabe pode ser protegido!*”.

Embora os projetos tenham iniciado praticamente no mesmo momento, no início dos anos 2000, não houve uma comunicação entre as partes. Assim, as duplas experiências vividas obtiveram respostas interessantes

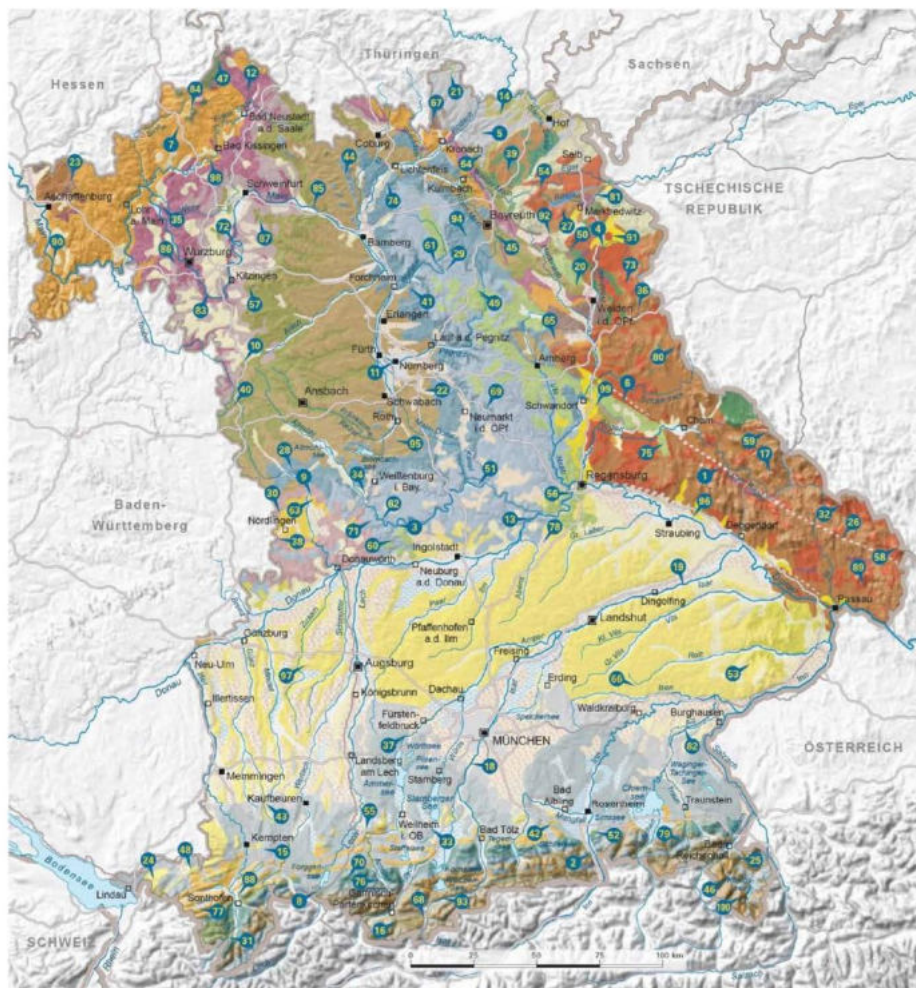


Figura 5 Mapa geológico do estado da Baviera e a distribuição geográfica dos geossítios, junto aos painéis informativos do Projeto “Cem Obras-primas”. A lista de geossítios encontra-se disponível para consulta no link: https://www.lfu.bayern.de/geologie/bayerns-schoenste_geotope/index.htm. Fonte: Lagally & Loth (2017).

sobre os contínuos esforços na divulgação científica e fortalecimento das atividades de geoturismo e geoeducação como estratégias para a geoconservação. De um modo geral, a implementação de ambos projetos, mesmo que em contextos completamente distintos que partem desde o ponto

de vista geológico-geomorfológico ao socioeconômico e cultural, apresentou uma resposta mais que satisfatória nos municípios e localidades onde as placas foram instaladas.

Os projetos “Caminhos Geológicos” e “Cem Obras-primas” responderam, na maior parte das vezes, de forma



Figura 6 Exemplo de painel interpretativo do “Projeto Cem Obras-primas”. 1 – Título; 2 – Número do Geossítio; 3 – Localização; 4 – Projeto e parceiros; 5 – Lema; 6 – Informações e contato; 7 – Descrição do Geossítio; 8 – Instituição responsável pelo Projeto; 9 – Escala de tempo geológico. O painel encontra-se disponível para consulta no link: https://www.lfu.bayern.de/geologie/bayems_schoenste_geotope/84/index.htm. Fonte: Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit (2019) e figura baseada em Lagally & Loth (2017).

positiva frente à experiência geológica a partir das iniciativas pioneiras na implementação de painéis interpretativos dos sítios, e paisagens de raras belezas cênicas, em seus respectivos países. No entanto, é necessário ressaltar que alguns aspectos negativos também puderam ser observados. Os aspectos negativos correspondem a problemas que insistem em permanecer e/ou repetir ao longo destas quase duas décadas nos dois projetos, mas com distintos graus de impacto em cada um deles.

No “Projeto Caminhos Geológicos” do estado do Rio de Janeiro, pode-se dizer que a experiência geológica a partir da implementação de painéis interpretativos em sítios geológicos refletiram, assim como a experiência alemã, de forma positiva em diversos aspectos (ver Mansur et al., 2013; Mansur & Nascimento, 2007; Mansur & Silva, 2011; Pressi & Cambra, 2014; Cambra et al., 2018a, 2018b, 2018c). Nas localidades onde os painéis foram implementados pôde-se notar a inserção da cultura geológica nas escolas de ensino fundamental/médio e na sociedade em geral. Inclusive

houve a popularização de termos comumente utilizados no vocabulário geológico-geomorfológico. Em especial, os termos Gondwana, Deriva Continental, Tectônica, entre outros, que passaram a fazer parte do cotidiano local, sendo reconhecidos na construção de um entendimento, mesmo que parcial, da dinâmica terrestre e da história geológica exposta a partir dos Geossítios.

A implementação do Projeto Caminhos Geológicos pôde desencadear princípios ou incorporar temáticas vinculadas à geoconservação. A própria preservação do Geossítio e da sua história geológica, além de criar diversos impactos em âmbito local (benefícios e, em alguns casos, aspectos negativos) geraram discussões por parte da população a respeito do geoturismo e uma significativa valorização no que se refere a geoduação, como exemplo tem-se o mais recente painel interpretativo do “Projeto Caminhos de Darwin” em fevereiro de 2019, instalado na Praça do Engenho do Mato (Niterói) (Figura 7). Ambos os temas sendo incorporados na temática da Geoconservação.



Figura 7 Imagem fotográfica da inauguração do painel interpretativo do "Projeto Caminhos de Darwin" – Praça do Engenho do Mato (Niterói), que foi uma parceria entre UFRJ, Parque Estadual da Serra da Tiririca – PESET e Faculdade de Geologia da UERJ. Registro fotográfico: Simone Siqueira (2019).

Dada a enorme repercussão positiva do projeto e da aceitação da experiência geológica por grande parte da sociedade, o meio acadêmico também pôde-se concentrar no desenvolvimento de trabalhos acadêmicos, ressaltando a geodiversidade, o patrimônio geológico, geoturismo e o estabelecimento de geossítios. Ao longo dos 20 anos do Projeto Caminhos Geológicos houve uma importante aproximação entre o conhecimento acadêmico, proveniente da pesquisa científica na área de geociências, e a sociedade. Os eventos nacionais e regionais de Geologia passaram a abordar a temática, sendo atualmente uma das mais prestigiadas e debatidas.

Segundo Lagally & Loth (2017) os aspectos positivos, no estado da Baviera, na Alemanha, podem ser destacados pelos seguintes tópicos: aumento de interesse, compreensão e cooperação da sociedade em relação ao projeto; patrocínios voluntários; alto nível de responsabilidade vinculado a uma consciência de geoconservação; respostas positivas por parte da imprensa; *layout* bem-recebido do projeto e facilmente reconhecido pela população; popularização do *Geocaching*, ou seja,

interesse em visitar e conhecer o maior número possível de geossítios; realização de entrega de prêmios em âmbito nacional de geossítio; aumento de publicações associadas a geossítios e valorização do patrimônio geológico; e, por fim, aumento significativo da publicidade sobre os geossítios.

Embora os projetos sejam reconhecidos pelo êxito da divulgação do conhecimento geocientífico é possível também analisar, em ambos os projetos, uma série de aspectos considerados negativos. Baseado na análise preliminar do projeto "Cem Obras-primas", elaborada pelos autores alemães Lagally & Loth (2017), foram considerados os seguintes tópicos: imprecisão científica; distribuição geográfica desigual das placas; número de municípios candidatos a receber as placas frustrados; um princípio de competição entre os municípios ou parceiros; conflito de interesses; e, por fim, vandalismo.

A imprecisão científica é dada pela tentativa de atender as expectativas de um grupo-alvo que varia de indivíduos leigos, sem contato algum com a experiência geológica, à profissionais da área de Geociências com certo grau de conhecimento sobre a temática abordada,

sendo constituído na maior parte das vezes por docentes e discentes. Em alguns casos não era possível explicar os processos geológicos de forma simples e, ao mesmo tempo, resumida no espaço disponível das placas geológicas. Lagally & Loth (2017) afirmam que nesses casos, as tentativas de correção científica podem ficar em segundo plano, dando ênfase a clareza do texto e a compreensão no painel. Os painéis mais antigos dos “Caminhos Geológicos”, por sua vez, continham um detalhamento geológico muito interessante, mas talvez um conteúdo escrito extenso demais para fins de divulgação científica.

A distribuição desigual dos painéis informativos é um reflexo do grau de atratividade e/ou do valor científico que os geossítios apresentavam em âmbito estadual. No caso alemão foi proposto um equilíbrio regional e geológico através da seleção de um geossítio ou a rejeição do mesmo por conta de sua localização. Por exemplo, somente um dentre um concentrado grupo de geossítios de alto valor foi selecionado. Em outros casos foram apenas considerados os geossítios de caráter cientificamente muito valiosos, mas sem alto impacto contemplativo, para melhor exposição das características geológicas.

No caso brasileiro houve inicialmente a elaboração de um inventário de sítios, junto aos pesquisadores de todas as universidades envolvidas no “Projeto Caminhos Geológicos”, sendo realizado um contato com todos os municípios pré-selecionados. Os municípios com o maior número de painéis instalados são Nova Iguaçu (região metropolitana do Rio de Janeiro) e São José de Ubá (região noroeste do estado). A concentração nos municípios citados pode ser atribuída às instalações de painéis ao longo das trilhas de Unidades de Conservação e em escolas públicas, enquanto que no município de Santa Maria Madalena na Região Serrana fluminense, por exemplo, a concentração de painéis se deve a sua escolha no ano de 2001, conforme o governo de estado, como a “Cidade da Geologia do estado do Rio de Janeiro” em virtude da exuberante beleza cênica da paisagem e da cultura local vinculada ao artesanato mineral. Outros exemplos de adensamento de painéis podem observados, por exemplo, nos municípios integrados ao “Projeto Geoparque Costões e Lagunas do Rio de Janeiro”, especialmente, em famosos pontos turísticos na Região dos Lagos e no Norte Fluminense. Cabe ressaltar a concentração de painéis na cidade do Rio de Janeiro devido ao conjunto de belezas naturais que lhe credencia a famosa alcunha de “Cidade Maravilhosa”, onde parte importante da história do Brasil se consolida sobre uma exuberante geodiversidade, como por exemplo, seu principal cartão postal situado na entrada da Baía de Guanabara, os morros do Pão de Açúcar e da Urca – Monumento Natural Municipal do Rio de Janeiro (vide Figura 4).

No projeto alemão, Lagally & Loth (2017) comentam a frustração de municípios e distritos candidatos que tiveram

seus pedidos de participação recusados em razão do baixo valor, ou mesmo ausência, de um geossítio selecionável em seus territórios. Enquanto nos municípios e distritos contemplados, a frustração e o *feedback* negativo ocorreram devido ao restrito número de painéis que poderiam ser produzidos pelo “Projeto Cem Obras-primas”. Outro ponto negativo foram os meios de informação e aparatos vinculados aos geossítios que foram instalados por diferentes instituições, o que resultou em conflitos com o próprio projeto vigente.

No “Projeto Caminhos Geológicos”, embora tenha sido financiado por um amplo número de empresas, a não implementação e/ou mesmo da manutenção dos painéis ocorreram, principalmente, pela falta de recursos financeiros e humano do DRM-RJ e suporte dos municípios para a manutenção dos painéis implantados. A carência de recursos resultou, a longo prazo, em interrupções na continuidade de roteiros pré-estabelecidos pela equipe desde o início do projeto. A não restrição dos painéis implantados, por sua vez, aparentemente tem contribuído para que não tenha ocorrência de situações que envolvam o conflito de interesses entre os municípios fluminenses. Outro ponto que cabe ressaltar é a resistência do “Projeto Caminhos Geológicos” e que ao longo dos seus 20 anos tem se mantido como um marco memorial das geociências frente à escassez de recursos e à perda de prioridade a partir dos investimentos do DRM-RJ nos últimos anos.

O conflito de interesses pode também ser entendido para os dois projetos quando um geossítio, por exemplo, não pôde ser incluído em virtude da responsabilidade ou segurança, seja porque se situa em propriedade privada que não concede autorização ou por conta da ausência de vias de acesso, estradas ou trilhas abertas até o local. De acordo com Lagally & Loth (2017) ainda pode ser levado em consideração a vulnerabilidade do local a ser transformado em um geossítio sinalizado e frequentado, por exemplo, em áreas de reprodução de aves em pedreiras abandonadas (ou outros animais em ambientes diferenciados), locais com fósseis valiosos ou minerais raros. Estes tipos de áreas demandam privacidade, justamente para evitar danos, furtos ou mesmo na sua destruição.

O vandalismo e as intempéries constituem um conjunto de danos aos painéis interpretativos e condicionam o tempo médio da vida útil de seus materiais e legibilidade. Segundo a análise sobre o projeto “Cem Obras-primas”, elaborada por Lagally & Loth (2017) raras foram as ocasiões de atos de vandalismo no estado da Baviera. Pressi & Cambra (2014) demonstram que no Brasil, além das intempéries naturais que reduzem a vida útil dos painéis, infelizmente, o grau de depreciação é significativamente maior, envolvendo evidências de tiros, morsas, arranhões ou pichações, e até mesmo em alguns casos de remoção do local, seja por vandalismo ou obras públicas. Os autores

ainda constataram que a maioria das gestões municipais, devido a descontinuidade de governos eleitos, perdem o vínculo e deixam de valorizar o projeto e a sua importância para os municípios.

4 Considerações Finais

Próximo de completar 20 anos desde a inauguração do primeiro painel interpretativo, os projetos “Caminhos Geológicos” e “Cem Obras-primas” têm sido amplamente reconhecidos através do esforço de integração entre os profissionais, no âmbito das Geociências, da experiência bem sucedida na popularização de conteúdo científico geológico e, sobretudo, da inserção da sociedade frente às discussões sobre geodiversidade. A implementação dos projetos, tanto no Brasil quanto na Alemanha, trouxe, em geral, um retorno bastante positivo em relação aos municípios e distritos selecionados, fortalecendo e atraindo um olhar diferenciado ao turismo local através da experiência geológica, e contribuindo para a preservação do patrimônio geológico (ou monumentos naturais).

O pioneirismo dos projetos “Caminhos Geológicos” e “Cem Obras-primas” constitui um impressionante exemplo, sobretudo hoje, do esforço realizado em conjunto com diferentes instituições de pesquisa, setores públicos e/ou privados e esferas governamentais na divulgação do conhecimento científico, buscando transmitir o conteúdo geológico-geomorfológico de forma simples e didática ao cidadão. A implementação dos painéis geológicos e o desenvolvimento de outras atividades ligadas à educação e ao geoturismo, permitiram que ambos projetos estimulassem uma crescente conscientização da sociedade sobre a importância de se conservar a geodiversidade local para o desenvolvimento socioeconômico, trazendo, ao mesmo tempo, o sentimento de pertencimento dos seus patrimônios naturais. É interessante demonstrar que os projetos, coincidentemente inaugurados nos anos de 2000, conseguiram obter resultados que excederam todas as expectativas. O sucesso de ambos pode ser atribuído tanto ao empenho dos profissionais e parceiros envolvidos, quanto à ampla aceitação do público geocientífico e da sociedade em relação à instalação dos painéis e, conseqüentemente, da notável valorização dos monumentos naturais dos municípios e distritos contemplados. A popularização das geociências ou a disseminação da cultura geocientífica pode ser hoje atribuída em grande parte ao esforço da experiência geológica transmitida a partir dos projetos “Caminhos Geológicos”, no estado do Rio de Janeiro, Brasil, e “Cem Obras-primas”, no estado da Baviera, na Alemanha.

5 Referências

Alonso, R.N. 2012. *Geologia del Paisaje - Salta y su Patrimonio Natural*. Salta, Mundo Gráfico, 220p.

- Azevedo, U.R. 2007. *Patrimônio Geológico e Geoconservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: Potencial para a criação de um Geoparque da UNESCO*. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, Tese de Doutorado, 211p.
- Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit. 2019. Vulkankrater Gebirgsstein. Disponível em: https://www.lfu.Bayern.de/geologie/bayernsschoenstegeotope/84/doc/84_schautafel.pdf. Acesso em: 02 dez. 2019.
- Brilha, J. 2005. *Patrimônio Geológico e Geoconservação: A conservação da natureza na sua vertente geológica*. Braga, Palimage Editores, 190p.
- Brilha, J. 2016. Inventory and quantitative assessment of geosites and geodiversity sites: a review. *Geoheritage*, 8: 119-134.
- Cambra, M.F.E.S.; Mansur, K.L.; Schmitt, R.S.; Pressi, L.F.; Fernandes, G.L.F.; Tupinambá, M.; Valeriano, C.M. & Simões, L.C. 2018a. Manutenção e implantação dos painéis interpretativos dos Projetos Caminhos Geológicos e Caminhos de Darwin no Estado do Rio de Janeiro - 2016/2018. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 49, Rio de Janeiro, 2018a. Anais, Rio de Janeiro, SBG.
- Cambra, M.F.E.S.; Pressi, L.F.; Mansur, K.L.; Almeida, J.C.H.; Nascimento, V.M.R.; Costa JR., N.A.; Cavalcante, R.; Souza, M.M. & Rosa, D.A.R. 2018b. Participação do Projeto Caminhos Geológicos em cursos sobre geodiversidade local, geoturismo e geoparque - 2015/2016. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 49, Rio de Janeiro, 2018b. Anais, Rio de Janeiro, SBG.
- Cambra, M.F.E.S.; Pressi, L.F.; Mansur, K.L.; Costa Jr., N.A.; Silva, A.L.C.; Silva, M.A.M.; Xaubet, P.H.M. & Almeida, J.C.H. 2018c. A atuação dos projetos Caminhos Geológicos e Caminhos de Darwin na divulgação da geodiversidade do Parque Estadual da Serra da Tiririca de 2014 a 2017 - Niterói e Maricá (RJ). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PATRIMÔNIO GEOLÓGICO, 4, Ponta Grossa, 2018c. Anais, Ponta Grossa, UEPG.
- Costa, N.M.C. & Oliveira, F.L. 2018. Trilhas: Caminhos para o geoturismo, a geodiversidade e a geoconservação. In: GUERRA, A.J.T. & JORGE, M.C.O. (ed.). *Geoturismo, Geodiversidade, Geoconservação - Abordagens Geográficas e Geológicas*. Oficina de Textos, p. 201-227.
- DRM-RJ. 2019. Arnação dos Búzios - O Himalaia brasileiro. Disponível em: <http://www.drm.rj.gov.br/index.php/downloads/category/50-armao-de-bzios.html>. Acesso em: 02 dez. 2019.
- Glaser, S.; Lagally, U.; Loth, G.; Schmidt, H. & Schwarz, K. 2008. *Geotope in Oberbayern*. Augsburg, Bayerisches Landesamt für Umwelt, 192 p.
- Gümbel, C.W. 1868. *Geognostische Beschreibung des Königreichs Bayern, Geognostische Beschreibung des Ostbayerischen Grenzgebirges oder des Bayerischen und Oberpfälzer Waldgebirges - Zweite Abtheilung*. GÖTTA, Verlag von Justus Perthes, 968p.
- Heilbron, M.; Eirado, L.G. & Almeida, J. 2016. Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro. 1 mapa: 80 cm x 120 cm. Escala 1:400.000
- Jorge, M.C.O. & Guerra, A.J.T. 2016. Geodiversidade, Geoturismo e Geoconservação: Conceitos, Teorias e Métodos. *Espaço Aberto (PPGG - UFRJ)*, 6(1): 151-174.

- Lagally, U. 2007. Es begann an der Donau - 166 Jahre Geotopschutz in Bayern. *Jahrbuch der geologischen bundesanstalt*, 147: 87-94.
- Lagally, U. & Loth, G. 2017. Experiencing Bavaria's Geological Heritage - The Project "Hundred Masterpieces". *Geoheritage*, 9: 519-531.
- Lagally, U.; Loth, G. & Schindelmann, C. 2014. The "Day of Geosites" in Germany - A successful promotion tool for the Earth Sciences. *Geoheritage*, 7: 195-204.
- Landseer, C. 1827. Vista do Pão de Açúcar tomada da Estrada do Silvestre. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Charles_Landseer_View_of_Sugarloaf_Mountain_from_the_Silvestre_Road_Google_Art_Project.jpg#globalusage>. Acesso em: 02 dez. 2019.
- Liccardo, A.; Mantesso-Neto, V. & Piekarz, G.F. 2012. Geoturismo Urbano - Educação e Cultura. *Anuário do Instituto de Geociências*, 35(1): 133-141.
- Mansur, K.L. 2018. Patrimônio Geológico, Geoturismo e Geoconservação: Uma Abordagem da Geodiversidade pela vertente Geológica. In: GUERRA, A.J.T. & JORGE, M.C.O. (ed.). *Geoturismo, Geodiversidade, Geoconservação - Abordagens Geográficas e Geológicas*. Oficina de Textos, p. 1-49.
- Mansur, K.L. & Erthal, F. 2003. Preservação do Patrimônio Natural - Desdobramentos do Projeto Caminhos Geológicos do Estado do Rio de Janeiro. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 8, São Pedro, 2003. Anais, São Pedro.
- Mansur, K.L. & Nascimento, V. 2007. Popularización del Conocimiento Geológico: Metodología del Proyecto Caminhos Geológicos. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 15: 77-84.
- Mansur, K.L. & Silva, A.S. 2011. Society's Response: Assessment of the performance of the Caminhos Geológicos (Geological Paths) Project, State of Rio de Janeiro, Brazil. *Geoheritage*, 3: 27-39.
- Mansur, K.L.; Guedes, E.; Alves, M. da G.; Nascimento, V.; Pressi, L.F.; Costa Jr., N.; Pessanha, A.; Nascimento, L.H. & Vasconcelos, G. 2012. Geoparque Costões e Lagunas do Estado do Rio de Janeiro (RJ) - Proposta. In: SCHOBENHAUS, C. & SILVA, C.R. (ed.). *Geoparques do Brasil: Propostas* vol. 1. Serviço Geológico do Brasil, p. 687-745.
- Mansur, K.L.; Ramos, R.R.C.; Cambra, M.F.E.S.; Seoane, J.C.S.; Pressi, L.F.; Barbosa, C.F.; Silva Jr., G.C.; Lanari, F.; Medeiros, S.R.; Costa, M.A.; Vasconcelos, G.F.; Pinto, A.L.R. & Almeida, C.N. 2018. Geoparque Costões e Lagunas do RJ: Construção pela popularização da ciência e educação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 49, Rio de Janeiro, 2018. Anais, Rio de Janeiro, SBG.
- Mansur, K.L.; Rocha, A.J.D.; Pedreira, A. (in memoriam); Schobbenhaus, C.; Salamuni, E.; Erthal, F.C.; Piekarz, G.; Winge, M.; Nascimento, M.A.L. & Ribeiro, R.R. 2013. Iniciativas institucionais de valorização do patrimônio geológico do Brasil. *Boletim Paranaense de Geociências*, 70: 02-27.
- Miranda, E.E. 2005. Brasil em Relevo. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/>>. Acesso em: 20 jul. 2020.
- Miranda, F. & Lema, H. 2013. Panorama actual del patrimonio geológico em Argentina. *Boletim paranaense de geociências*, 70: 87-102.
- Nascimento, M.A.L.; Azevedo, U.R. & Neto, V.M. 2005. Geoturismo, Geodiversidade e Geoconservação: Conceitos úteis para a promoção do Patrimônio Geológico. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 21, Recife, 2005. Boletim de Resumos, Recife, SBG, p. 388-392.
- Pacheco, J. & Brilha, J. 2014. Importância da interpretação na divulgação do patrimônio geológico: uma revisão. *Comunicações Geológicas*, 101 (1): 101-107.
- Pressi, L.F. & Cambra, M.F.E.S. 2014. Diagnóstico e mudança de perspectivas do Projeto Caminhos Geológicos do Estado do Rio de Janeiro (2013-2014). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 47, Salvador, 2014. Anais, Salvador.
- Schmitt, R. & Mansur, K.L. 2001. Os Caminhos Geológicos do Estado do Rio de Janeiro - A experiência de Armação de Búzios. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 7, Rio de Janeiro, 2001. Boletim de Resumos, Rio de Janeiro, SBG, p. 205.
- Schmitt, R.S.; Tupinambá, M.; Valeriano, C.M.; Ragatky, D. & Mansur, K.L. 2004. O Projeto Caminhos Geológicos - Divulgação científica dos monumentos geológicos do Estado do Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA, 2, Belo Horizonte, 2004. Anais, Belo Horizonte, CBEU.
- Silva, J.F.A. & Aquino, C.M.S. 2017. Panorama geral das iniciativas de geoconservação do patrimônio geológico internacionais e nacionais. *Caderno de Geografia*, 27(1): 1-18.
- Simões, L.C., Mansur, K.L., Brito, M.F. 2011. O mapa dos Caminhos de Darwin no Rio de Janeiro: Implantação de um projeto de popularização da história da ciência. In: Scientiarum Historia, IV, Rio de Janeiro, 2011. Anais, Rio de Janeiro, UFRJ, p. 1-7.
- Valeriano, C.M. 2006. A odisséia do Pão de Açúcar: as rochas contam sua história... Projeto Caminhos Geológicos, DRM-RJ. Disponível em: <http://www.drm.rj.gov.br/>. Acesso em: 02 dez. 2019.

Recebido em: 21/09/2020

Aprovado em: 04/12/2020

Como citar:

Waldherr, F.R.; Silva, T.M.; Cambra, M.F.E.S. & Mansur, K.L. 2021. 20 Anos de Experiências em Popularização da Geologia no Brasil e na Alemanha: Considerações a partir dos Projetos "Caminhos Geológicos" e "Cem Obras-primas". *Anuário do Instituto de Geociências*, 44: 38302. DOI 1982-3908_2021_44_38302

ANEXO E - Considerações iniciais sobre a geomorfologia do tanque natural fossilífero Jirau 01, Sítio Paleontológico Jirau - município de Itapipoca (CE).

WALDHERR, F.R.; XIMENES C. L.; SILVA, T. M. Considerações iniciais sobre a geomorfologia do tanque natural fossilífero Jirau 01, Sítio Paleontológico Jirau - município de Itapipoca (CE). *In*: SIMPÓSIO VIRTUAL DE PALEONTOLOGIA DO QUATERNÁRIO, 2., 2021, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IVP, 2021. p. 12.

CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE A GEOMORFOLOGIA DO TANQUE NATURAL
FOSSILÍFERO JIRAU 01, SÍTIO PALEONTOLÓGICO JIRAU - MUNICÍPIO DE
ITAPIPOCA (CE)

F.R. Waldherr¹; C.L. Ximenes²; T.M. Silva³

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro / Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geografia, Av. Athos da Silveira Ramos. Nº. 149, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, RJ. ²Museu de Pré-história de Itapipoca, Rua Tenente José Vicente, 887, Coqueiro, Itapipoca, CE. ³Universidade Federal do Rio de Janeiro / Instituto de Geociências, Departamento de Geografia, Av. Athos da Silveira Ramos. Nº. 149, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, RJ.

felipewald@gmail.com, clc.ximenes@gmail.com, telmageo@gmail.com

Os tanques naturais, junto a seus depósitos de tanque (depósitos sedimentares), constituem importantes feições do relevo do semiárido brasileiro, sendo eventualmente considerados sítios paleontológicos. No município de Itapipoca, na porção norte do Estado do Ceará, os tanques naturais são formas recorrentes e que podem ser encontradas em lajedos graníticos no entorno do maciço de Uruburetama, conformando estreitas depressões preenchidas por depósitos sedimentares onde, ocasionalmente, são preservados restos fósseis da megafauna pré-histórica do Período Quaternário. Entre os tanques de maior expressão paleontológica, tem destaque o tanque natural fossilífero Jirau 01, localizado no Sítio Paleontológico Jirau, de onde já foram resgatadas milhares de peças esqueléticas fossilizadas de megafauna. Abordar as condicionantes físicas da evolução morfológica desse jazigo fossilífero é o objetivo principal deste trabalho. A coleta de dados foi feita por imageamento aéreo por drone ou RPA (aeronave não tripulada autônoma), de classe 3, modelo Phantom 4 Pro, com câmera de 20 megapixels, e altura de voo a 100 m, em relação ao solo. A depressão natural em questão corresponde a um tanque natural escarpado sobre o embasamento cristalino, apresentando uma morfologia de fundo do tipo côncavo. A depressão segue a orientação WNW-ESE e encontra-se parcialmente preenchida por depósitos sedimentares arenoargilosos, com conteúdo fossilífero proveniente da megafauna. Suas dimensões são: 50 m de comprimento, largura de 5,30 m, no ponto mais largo, e altura variando de aproximadamente 5 m, na extremidade leste, até 1 m, na extremidade oeste. No interior do tanque é possível verificar o registro de estruturas menores nas laterais, feições semelhantes a favos de mel e/ou alvéolos com tamanhos centimétricos, e indícios de processos intempéricos de contato solo-rocha vinculados à corrosão química. A conformidade dos aspectos geomorfológicos, além de atribuir ao tanque fossilífero Jirau 01 uma extraordinária beleza cênica na atualidade, também permitiu oferecer no passado uma importante área de estoque e disponibilidade de água para a sobrevivência da fauna local. Paralelamente, o alinhamento do eixo do tanque em conformidade com os sistemas fluviais adjacentes, sugere ter sido esse um fator importante na deposição e no retrabalhamento dos sedimentos de granulometria grossa e dos fósseis no jazigo. [FAPERJ].

ANEXO F - Geomorphological aspects of the Jirau 01 fossiliferous natural tank, municipality of Itapipoca, Ceará state, Brazil.

WALDHERR, F.R.; SILVA, T.M.; XIMENES, C.L.; ARAÚJO-JÚNIOR, H.I.; RODRIGUES, S.W.O. Geomorphological aspects of the Jirau 01 fossiliferous natural tank, municipality of Itapipoca, Ceará state, Brazil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.23, n. 2, p. 1317-1333. 2022.



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

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 23, nº 2 (2022)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v23i2.2039>



Artigo de Pesquisa

Geomorphological aspects of the Jirau 01 fossiliferous natural tank, municipality of Itapipoca, Ceará state, Brazil

Aspectos geomorfológicos do tanque natural fossilífero Jirau 01, município de Itapipoca, estado do Ceará, Brasil

Felipe Rodrigues Waldherr¹, Telma Mendes da Silva², Celso Lira Ximenes³, Herminio Ismael de Araújo-Júnior⁴ e Sérgio Wilians de Oliveira Rodrigues⁵

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Rio de Janeiro, Brasil. felipewald@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6036-9737>

² Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Rio de Janeiro, Brasil. telmageo@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8295-6158>

³ Museu de Pré-história de Itapipoca, Itapipoca, Brasil. cx.ximenes@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5600-9045>

⁴ Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Departamento de Estratigrafia e Paleontologia, Rio de Janeiro, Brasil. herminio.ismael@yahoo.com.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4371-0611>

⁵ Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Goiânia, Brasil. swor@ufg.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7467-4508>

Recebido: 01/10/2020; Aceito: 17/05/2021; Publicado: 06/04/2022

Abstract: The natural tanks (*stricto sensu*) are important geomorphological features that occur in the municipality of Itapipoca (CE), which occasionally accommodate Quaternary sediments with relevant fossil content. The "Tanque Jirau 01", located at the Jirau Paleontological Site, stands out among the various depressions that occur in this municipality of Ceará, both in terms of geomorphology and paleontology. The Jirau fossiliferous tank (TF01) is a steep natural tank, which was formed in the crystalline basement, presenting a concave-type bottom morphology. The depression follows the WNW-ESE orientation and is partially filled by sand-clayey sedimentary deposits, with fossiliferous content from the Pleistocene megafauna. Regarding dimensional aspects, the TF01 has an extension of more than 50 meters in length, with a maximum width of 5,30 meters and depths of up to 5 meters. The conformity of the geomorphological aspects, in addition to attributing to the TF01 an extraordinary scenic beauty, also made it possible to offer, in the past, an area of stock and availability of water for the fauna and, later, for the local population in periods of drought. Inside the tank, it is possible to verify the registration of minor structures on the lateral walls, features similar to honeycombs and/or alveoli with centimeter sizes, and evidence of weathering processes of soil-rock contact linked to chemical corrosion. Although there are paleontological studies in academia on the material found in the depressions of Itapipoca, there is still few materials linked to the conditions responsible for the possible origin and development of these natural tanks in the region. This study presents an initial analysis based on the morphological characterization and tectono-structural control of the Jirau 01 (TF01) natural tank, an area of important scientific reference in the municipality of Itapipoca (CE).

Keywords: Geomorphology; Natural tank; Megafauna; Quaternary geology; Northeastern Brazil.

Resumo: Os tanques naturais (*stricto sensu*) constituem importantes feições geomorfológicas que ocorrem no município de Itapipoca (CE), os quais acomodam, ocasionalmente, sedimentos quaternários com relevante conteúdo fóssilífero. O "Tanque Jirau 01", situado no Sítio Paleontológico Jirau, tem destaque entre as diversas depressões que ocorrem no município cearense, tanto no aspecto geomorfológico quanto paleontológico. O tanque fóssilífero Jirau (TF01) é um tanque natural escarpado, que foi formado no embasamento cristalino, apresentando morfologia de fundo do tipo côncavo. A depressão segue a orientação WNW-ESE e encontra-se, parcialmente, preenchida por depósitos sedimentares areno-argilosos, com conteúdo fóssilífero proveniente da megafauna cenozoica. Em relação aos aspectos dimensionais, o TF01 possui uma extensão com mais de 50 metros de comprimento, dispondo de uma largura máxima de 5,30 metros e profundidades de até 5 metros. A conformidade dos aspectos geomorfológicos, além de atribuir ao TF01 uma extraordinária beleza cênica, também permitiu oferecer no passado uma área de estoque e disponibilidade de água para a fauna e, posteriormente, a população local em períodos de estiagem. No interior do tanque é possível verificar o registro de estruturas menores nas laterais, feições semelhantes a favos de mel e/ou alvéolos com tamanhos centimétricos, e indícios de processos intempéricos de contato solo-rocha vinculados à corrosão química. Embora exista no meio acadêmico estudos paleontológicos sobre o material encontrado nas depressões de Itapipoca, ainda há pouco material vinculado aos condicionantes responsáveis pela possível origem e desenvolvimento destes tanques naturais na região. O presente estudo traz uma análise inicial a partir da caracterização morfológica e do controle tectono-estrutural do tanque natural Jirau 01 (TF01), área de importante referência científica no município de Itapipoca (CE).

Palavras-chave: Geomorfologia; Tanque natural; Megafauna; Geologia do Quaternário; Nordeste do Brasil.

1. Introduction

"Natural tanks" (*stricto sensu*), alongside their "tank deposits" (sedimentary deposits), constitute important relief features on the Brazilian Northeast, being eventually converted into paleontological and archeological sites of reference (BERGQVIST et al., 1997; XIMENES, 2003, 2006a, 2006b, 2009; XIMENES; SANTOS, 2011; BARRETO et al., 2004; SILVA, 2007; SILVA; CORRÊA, 2009; SILVA; CORRÊA; AMORIM, 2017; SANTOS JÚNIOR, 2005, 2013; SANTOS JÚNIOR; PORPINO; SANDERSON, 2008; SANTOS JÚNIOR et al., 2015; ARAÚJO-JÚNIOR; PORPINO; BERGQVIST, 2015; WALDHERR; ARAÚJO-JÚNIOR; RODRIGUES, 2017a; WALDHERR et al., 2019). "Natural tanks" (*stricto sensu*) correspond to depressions produced over the crystalline basement, being found in terrains formed by igneous or metamorphic rocks and, occasionally, in sedimentary rocks (PAULA-COUTO, 1980; OLIVEIRA; HACKSPACHER, 1989; MABESOONE; OLIVEIRA; DAMASCENO, 1990; SANTOS et al., 2002; XIMENES, 2003, 2009; ARAÚJO-JÚNIOR; PORPINO, 2011; LIMA; SILVA, 2016; WALDHERR; ARAÚJO-JÚNIOR; RODRIGUES, 2017a; WALDHERR et al., 2019; FARIA; CARVALHO; ARAÚJO-JÚNIOR, 2020).

Natural tanks in the Brazilian Northeast, once exposed to the surface, have played a role as preferential axes for the coalescence of sediments and influxes from the surface runoff throughout geological time. It is important to remark that, among the material carried into the depressions, bone fragment clusters can be found, converting natural depressions in authentic thanatocoenosis, albeit the restricted scale (WALDHERR et al., 2019). In the municipality of Itapipoca, on the northern area of Ceará state, natural tanks are recurrent forms around the granitic massif of Uruburetama (XIMENES, 2003), comprised of narrow depressions filled by sedimentary deposits where, occasionally, fossil remains from the Quaternary megafauna are preserved and found.

According to surveys conducted in the municipality of Itapipoca by Ximenes (2003, 2006a, 2006b, 2009), the natural geological and geomorphological characteristics favored the formation of one of the largest concentrations of such kind of depression associated with paleontological deposits, and which are distributed throughout an area of more than 800 km² over the crystalline basement. Yet, according to the author, the paleoclimatic conditions were favorable for the development of a diversified fauna of vertebrates, with more than 30 already identified taxons of mammals, reptiles, amphibia and aves being found only in the municipality of Itapipoca (XIMENES, 2009; ARAÚJO-JÚNIOR; MOURA, 2014; ARAÚJO-JÚNIOR et al., 2013). Due to the concentration of fossiliferous deposits in the natural tanks, alongside the abundant paleontological material collected and the expressive representativity of different species of paleomammals, the area located in between the drainage of the Cruxati and Mundaú rivers, in the municipality of Itapipoca, has been referred to as the "Valley of the Prehistorical Megafauna" (XIMENES, 2003, 2006b, 2009).

The association between the geomorphological conformation of natural tanks and the fossiliferous deposits constitutes a characteristic which is, until the present moment, exclusive (*sui generis*) to the Brazilian Northeast.

Although, features similar to natural tanks have been recorded, both in different regions of South America and continents, there is no documentation or records on fillings linked to fossiliferous deposits of prehistorical megafauna, especially, those from the Quaternary period. In the municipality of Itapipoca it is possible to select five important paleontological sites where the rescue of fossils happened through the excavation of deposits in tanks, which are: Jirau, Coelho, Lajinhas, João Cativo e Pedra D'água (Figure 1) (XIMENES, 2003, 2006a, 2006b, 2009; XIMENES; SANTOS, 2011).

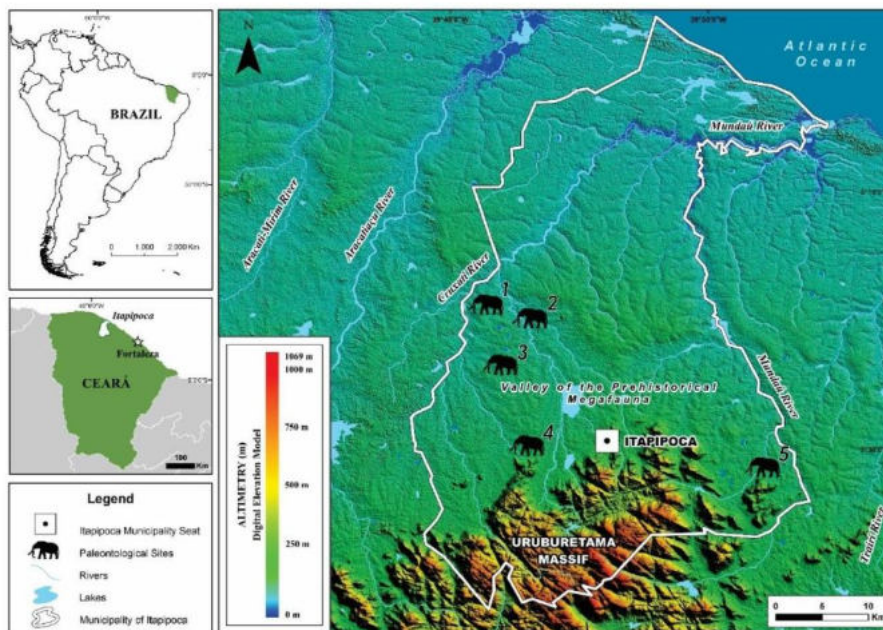


Figure 1. Location of the study area with the geographical distribution on the main Paleontological Sites with the occurrence of fossiliferous natural tanks in the municipality of Itapipoca, Ceará state, Brazil. These are: (1) Jirau Paleontological Site; (2) Coelho Paleontological Site; (3) Lajinhas Paleontological Site; (4) João Cativo Paleontological Site; e (5) Pedra D'água Paleontological Site. The altimetry datas used in shaded relief on Figure 1 was obtained through PALSAR radar orbital sensor (ALOS satellite).

The Jirau Paleontological Site, a reference area for the present study, was discovered in 1993 through a paleontological prospection, funded by the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) scientific initiation program of the Universidade Federal do Ceará (XIMENES, 2003). The initial work was restricted to the mapping of natural tanks, photographic documentation and collection of fossils samples. According to Ximenes (2003), in the inside of the tanks, there were *cacimbas* (water-holes) over the deposits, excavated by the local inhabitants to collect water, resulting in the exposal of fossiliferous levels and, consequently, the loss of several bone fragments. At the time, an agreement was reached with the landowners, with the institutional support of the Itapipoca City Hall. Afterwards, a series of surveys, especially of paleontological concern, were conducted at the Jirau tanks in the years of 2001, 2003, 2009, 2012 and 2015, resulting in new excavations and important contributions to the studies, especially the taphonomic ones, from the fossils collected in tank deposits (ARAÚJO-JÚNIOR, 2012, 2015, 2016; ARAÚJO-JÚNIOR; PORPINO; BERGQVIST, 2011a; ARAÚJO-JÚNIOR et al., 2011b, 2013). As the sedimentary deposit was removed from the inside of the natural tank, the bottom morphology and the set of minor structures on the lateral walls were gradually exposed from the soil-rock contact, then present. According to Araújo-Júnior (2015) it was possible to rescue, through the excavations

performed over the tank deposits at the Jirau Paleontological Site, a total of 1.405 fossils until this moment. The fossiliferous material collected was sent, afterwards, to the Museu de Pré-história de Itapipoca (MUPHI).

At the Jirau Paleontological Site natural tanks are distributed over the granite terrain and correspond to a total number of seven depressions, although it was possible to perform the collection of fossiliferous material from the tank deposits in only three of them. It is important to remark that, so far, no procedures connected to dating material collected inside the natural tanks were performed. Currently, tanks are used as water reservoirs during drought periods. In this present study, the natural tank with the largest dimension was selected, being named by previous studies as "Jirau 01 Tank" (XIMENES, 2003, 2009; ARAÚJO-JÚNIOR, 2012, 2015).

2. Study Area

About 21 kilometers northwest of the Itapipoca city hall, fossiliferous tanks occur and constitute the Jirau Paleontological Site, forming a set of depressions developed over the granite outcrops locally known as *lajedos* (Figure 2). This granitic outcrop, which contains the depression named "Jirau 01 Fossiliferous Tank" (TF01), has a total area of 5.260m² and is leveled at height of 60 meters. Its UTM coordinates are: (24M Zone) 421627.00 m E / 9628979.00 m S. The main entrance points to the Jirau Paleontological Site are the vicinities of Barra do Macaco and Lagoa do Juá.

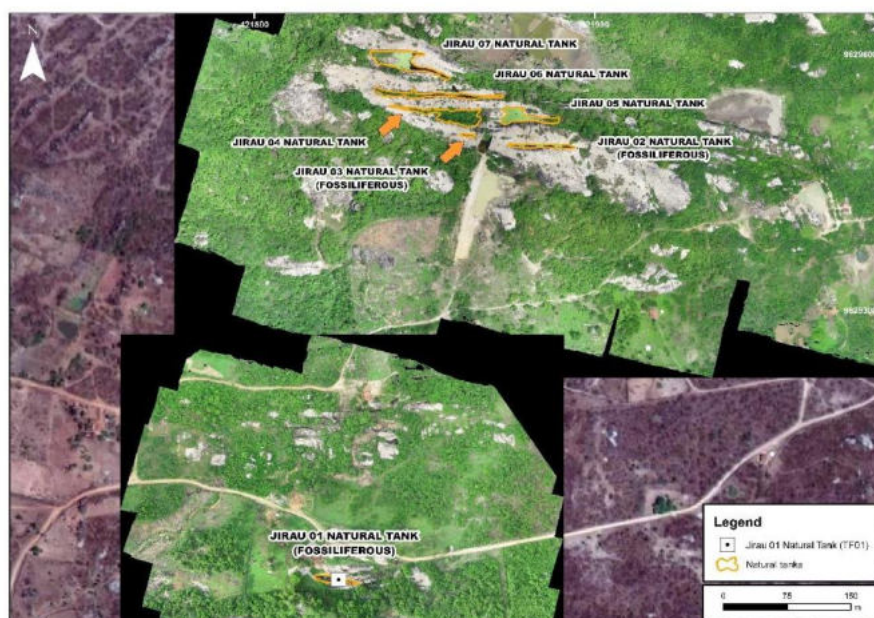


Figure 2. The geographical distribution of the seven natural tanks studied at the Jirau Paleontological Site, municipality of Itapipoca (CE), Brazil.

The geological basement of the study area is completely located at the Borborema Structural Province, specifically at the Central Ceará Domain (ALMEIDA et al., 1981; ARTHAUD et al., 2008; BRAGA; GOMES, 2014, 2018). Rodrigues et al. (2010) define the Province as a vast brasileiro region constituted by metamorphic and igneous lithologies, formed by a branched system of neoproterozoic orogens, separated by proterozoic age terrains which, eventually, show archean nuclei (ALMEIDA et al., 1981; BRITO NEVES; SANTOS; VAN SCHMUS, 2000). According to the geological mapping conducted by the CPRM (BRAGA; GOMES, 2014, 2018), on a 1:100.000 scale, the Jirau Paleontological Site, where natural tanks occur, is located over the Penedos Leucogranite lithologic unit (Figure 3), pertaining to the late- to post-orogenic magmatic suite (Cambrian to Ordovician). Yet, according to the

geological mapping, the surroundings of the area of the natural tank are constituted, in decreasing chronological order, by alluvial deposits, colluvial-eluvial deposits, both of Cenozoic age, and by the Santa Quitéria Granitoid, pertaining to the Tamboril-Santa Quitéria Complex (Neoproterozoic).

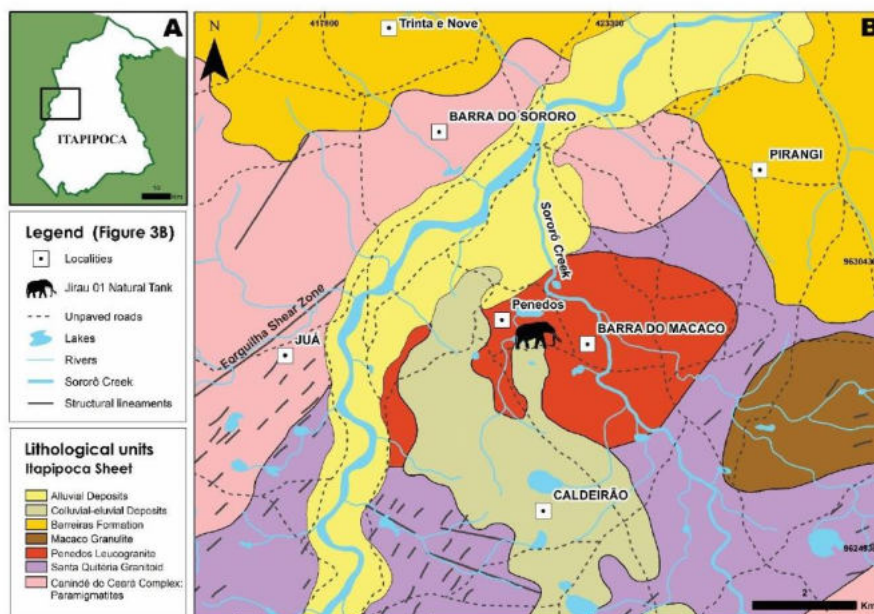


Figure 3. Geological map of the Itapipoca Sheet (SA.24-Y-D-II) and the location of the Jirau 01 natural tank. A - The geological mapping selection at the municipality of Itapipoca, in the Ceará state; B - The location of the Jirau 01 natural tank. The tank is entirely located over the Penedos Leucogranite lithologic unit, pertaining to the late- to post-orogenic magmatic suite, and close to contact with the colluvial-alluvial deposits. Source: Modified from Braga and Gomes (2014).

The Penedos Leucogranite lithologic unit corresponds to the off-white to rosy granitoid outcrops which are found in the vicinities of Penedos and Barra do Macaco. According to Braga and Gomes (2018), the unit is constituted, predominantly, by syenogranites, isotropic, coarse granulation, with a low degree of alteration and rarely fractured. Macroscopically, they are formed by feldspars, quartz, having biotite, amphibole, as well as garnets which vary from 0,4 to 1,0 cm. Yet, according to the authors, the unit outcrops as granite platforms (*lajedos*) or low domes, most times of large extension, surrounded by non-consolidated coverings (BRAGA; GOMES, 2018). In relation to the structural and tectonic aspect, the Penedos Leucogranite lithological unit which comprises the crystalline basement of the study area presents a structural arrangement marked by a main NE-SW trend, which conditions the format of the late- to post-orogenic magmatic suite (BRAGA; GOMES, 2018).

According to the geomorphological classification proposal of the septentrional Brazilian Northeast, elaborated by Costa et al. (2020), the Jirau Paleontological Site finds itself inserted in the "Superfície Sertaneja 1" (SS1), previously integrated to the macro-compartment named traditionally as "Depressão Sertaneja" (MAIA; BEZERRA, 2014). Yet, according to the authors, Superfície Sertaneja 1 corresponds to the lower terrains, constituting itself in areas where the planation processes are more evident. In relation to the altimetric variation, the compartment is located in between the 50 to 250 meters quotas, with plain or slightly wavy topographies (COSTA et al., 2020). It is important to remark that the area as a whole is drained by the Sororó Creek and affluents, with its hydrographic regime characterized by presenting an intermittent or temporary regime (SOUSA, 2009).

In the study area, the Superfície Sertaneja 1, drained by the Sororô Creek (affluent of the Cruxati River), corresponds to a morphology of ample regional expression which varies topographically from plain to slightly rugged, constituting a surface with altitudes ranging from 40 to 80 meters. In synthesis, the landscape is constituted by an extensive razed surface, covered predominantly by colluvial-alluvial deposits, being occasionally marked by granite outcrops (*lajedos*), similar to a leveled mosaic where altimetric quotas reach the 60 meters on average. However, the continuity of the surface is interrupted, in its south portion, by the presence of the granitic monolith of Uruburetama, where the source of the Sororô Creek is located. The orographic barrier reaches the altimetric quota of 1.081 meters in its peak point, besides constituting an important retainer of humid air masses coming from the Atlantic Ocean. Thus, among the recurrent features of the granitic terrain, typical of the sertanejo hinterland setting which constitutes the study area, it is possible to observe the occurrence of "Major forms" or "Macroforms", for instance, inselbergs, bornhardts and cupuliform domes, being represented, mainly, at the Uruburetama Massif set, and the "Minor forms" or "Microforms" which correspond to matacões, tors, tafoni, alveoli and natural tanks (*tanques naturais*). It is important to note that previous studies about the Uruburetama Massif have verified the preponderant role of the structural and lithological control on the development of the set and disposition of granitic terrain forms associated to "Major and Minor forms" (BRAGA; GOMES, 2014, 2018; LIMA, 2018; LIMA et al., 2019), including the granite outcrops (*lajedos*) and natural tanks orientation which constitute the paleontological sites in the municipality of Itapipoca.

3. Methodological Procedures

Two fieldworks, in July 2019 and January 2020, were conducted in the objective of ranging the pre-established points alongside the main natural tanks at the Jirau Paleontological Site, in the municipality of Itapipoca, Ceará state. The pre-established points were selected based on the preliminary identification of natural tanks through high-resolution images obtained using RPA (Remotely Piloted Aircraft) and through the set of bibliographic references linked to the study area (articles, papers, thesis, etc.). The Jirau 01 natural tank, located at a granite outcrop (*lajedo*), was selected as a reference area for the present study as it is the largest depression at the Jirau Paleontological Site.

The high-resolution images used were obtained through a Class 3 RPA, Phantom 4 Pro model, equipped with a 20 megapixel camera of coupled resolution. The aerial surveys were conducted from overflights 100 meters above ground, providing a Ground Sample Distance (pixel representation of terrain image) of 2.73 cm. The overflight application used was Pix4D Capture, installed in a mobile device with iOS operational system (iPhone 6). Image processing was performed in the aerophotogrammetry software *Agisoft Photoscan*. As generated products, georeferenced orthophotomosaics of 2.7 cm pixels were produced, and digital models of elevation (MDE) with high spatial resolution.

In the high spatial resolution image obtained through RPA, an extraction of structural lineaments observed on the granite outcrops (*lajedos*) where natural tanks occur was performed. The technique used for the lineament extraction is described in Goldtjen and Marshak (1988). Authors defined that the lineament extraction scale must be fixed. In the present study, high spatial resolution images obtained through RPA were used. Two types of products were used: colorful optical image (true color) and shaded relief maps manufactured from the obtained MDE. Four shaded relief maps were used, with lighteners positioned at N360°, N45°E, N90°E and N45°W, all with a 45° angle tilt. The lineaments extracted on shaded relief maps were compiled and treated together, with duplicated lineaments being deleted. The lineament properties (azimuth, length) were obtained automatically on the ArcGIS 10.3.1 software and data treated with the Polar Plots extension (JENNESS, 2014). Rosette diagrams were then generated, using the sum of lengths in azimuthal intervals of 10° and frequency of lineament orientations.

Points were registered and later integrated into the digital environment with the assistance of the GPS device Garmin 64s. During the fieldwork survey, a diagnosis of the different aspects and the minor structures inside of the Jirau 01 natural tank was performed, besides the possible geoenvironmental constraints responsible for the formation and development of the natural depression over the crystalline basement.

The morphometric classification, as the genetic type, is based on characteristics defined by Mayor Rodríguez (2011) for features analogous or similar to natural tanks, which are: the length, width, depth and presence or absence of outlet (exutório) in the cavity area. In its turn, bottom type morphology is based on the Twidale and Vidal-Romaní (2005) and Waldherr, Araújo-Júnior and Rodrigues (2017a) proposal for the Brazilian Northeast tanks.

Morphometric analysis was performed from the cartographic bases used in the present study, elaborated from the PALSAR radar orbital sensor (ALOS satellite), which presents spatial resolution of 12.5 meters. From the DEM, level curves were generated, with a 10 - meter spacing, using the Global Mapper 15 software. The level curves were elaborated with the purpose of checking different altimetric levels, relief amplitude, distribution of geomorphic formations and drainage axis orientation in the municipality of Itapipoca (Ceará). Digitalization, georeferencing and data integration were performed on the ArcGIS 10.3.1 and Global Mapper 15 software.

4. Structural control and acting processes

In morphological terms, granite is a rock that originates a wide variety of relief forms and presents itself on landscape both as a resistant and a friable rock (DERRUAU, 1983). Such variations are controlled by the presence of massive domains and fractured domains vulnerable to the chemical weathering in subedaphical environments (AMARAL, 1973, 1974; PEDRAZA, 1989, 1994, 1996; TWIDALE, 1982, 1989, 1998, 2002; TWIDALE; VIDAL-ROMANÍ, 2005; VIDAL-ROMANÍ, 1989; VIDAL-ROMANÍ; TWIDALE, 1998; DEMANGEOT, 2000; MIGÓN, 2006, 2010; MAYOR RODRIGUEZ, 2011; MAIA; NASCIMENTO, 2018; MAIA et al., 2018; LIMA, 2018; LIMA et al., 2019) and mainly to the paleoclimate. The density of the opened fractures/joints systems is a preponderant factor throughout the weathering process, even prevailing over intrinsic properties such as texture and mineralogical composition of granite (TWIDALE, 1982, 1986a, 1986b, 1989, 1998).

According to Vidal-Romaní and Twidale (1998), the opened fractures are the main entry points for the meteoric water to penetrate along the crystalline basement. Twidale (1986a) indicates that the granite presents low porosity with representative values under 1%, normally corresponding to the 0.1% range, thus having low permeability or deficiency in the capacity of transmitting water through a rock body. However, a few granite masses are highly permeable due to the number and density of opened fractures/joints. Alongside fractures and permanently in contact with the water (humidified regolith), the rocky substrate is rapidly altered. The weathering front migrates from the fracture layers, for instance, to the so-defined slate boulders, converting angular blocks into rounded nuclei. The processes of the solution, hydration, hydrolysis and oxidation are responsible for the rock attrition and disintegration, even though bacterial action might in a certain way facilitate the water penetration on a granulometric scale (TWIDALE; VIDAL-ROMANÍ, 2005).

According to Twidale (1986a), the weathering front is irregular, once there is a tendency for any position of the rocky surface to be attacked and altered, preferentially on areas considered susceptible to chemical weathering, for instance, over the fractures/joints systems (intersection) and compositional layering of the intrusive body. The author also affirms that some of the weathering fronts, when exposed, are notably smooth. However, in other cases, differential weathering acts directly over the feldspar and mica minerals through chemical corrosion, sparing the quartz crystals and reshaping the orthoclase and microcline phenocrystals into microrelief. The effect of the preferential chemical corrosion over the different minerals which constitute granite results in a pitted surface. Such a corrosive effect can be observed over the granite outcrops (*lajedos*) and inside the depressions that form the natural tank.

Another mechanism that can be observed on the lateral walls of the tanks, once exposed, is the so-named disaggregation in plates (flaking) and granular disaggregation. According to Mayor Rodríguez (2011), plates can have a thickness between 1 to 10 mm, even though they can be thicker, ranging from 1 to 15 cm, and for those the term scaling has been used. Thus, flaking might occur in a simple or multiple way. Granular disaggregation of less advanced stages, in turn, starts in the disaggregation from the grain and, later, the mechanism spreads centrifugally from the removed unit.

It is important to remark that another process has been considered in specialized literature for the origin of forms similar to the Brazilian natural tanks, being named as migration or concentration of charges. The process application, in subedaphical environments, became a basis for the model based on charge application, induced by the migration and concentration of charges in specific areas of the crystalline basement. The tension applied in certain points, for instance, between the set of fractures/joints (sheet structure), would result in internal elastic deformations which, throughout time, might become permanent (VIDAL-ROMANÍ, 1984, 1985, 1989, 1990, 2008; VIDAL-ROMANÍ et al., 2014a, 2014b, 2018; MAYOR RODRÍGUEZ, 2011; WALDHERR; ARAÚJO-JÚNIOR; RODRIGUES, 2017a; WALDHERR; VIDAL-ROMANÍ; RODRIGUES, 2018a; WALDHERR et al., 2018b, 2019). These specific points configure areas that are susceptible and preferential to the weathering attack, both in subsurface, as demonstrated from geophysical evidences (ROQUÉ; ZARROCA; LINARES, 2013), as well as in

subaerial conditions (MAYOR RODRÍGUEZ, 2010; VIDAL-ROMANÍ; UÑA ALVAREZ; VAQUEIRO RODRÍGUEZ, 2014a; VIDAL-ROMANÍ; VAQUEIRO RODRÍGUEZ; SANJURJO SÁNCHEZ, 2014b; VIDAL-ROMANÍ; VAQUEIRO RODRÍGUEZ; VÁZQUEZ, 2018).

5. Analysis of structural lineaments

From the shaded relief maps, 283 structural lineaments were compiled. The rosette diagram, result of the sum of lineament orientation frequency vs. orientation (Figure 4), demonstrated that the study area and surroundings highlight two main lineament orientations, the WNW-ESSE and NW-SE directions, indicating a small difference from the lineaments interpreted in the optical image (true color). The WNW-ESE Direction significantly reflects most part of the observed lineaments, in those highlighted on the optical image (true color) as well as on the shaded relief maps. Directions also indicates the main orientation analyzed in the delimited granite outcrops (*lajedos*).

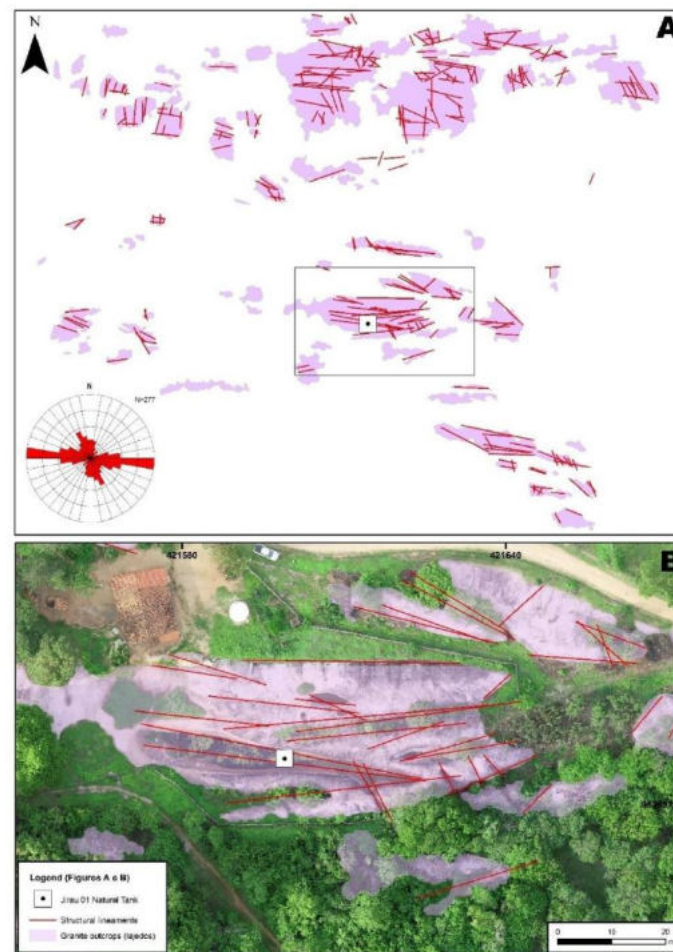


Figure 4. Structural lineaments and Jirau 01 natural tank location map. A - Lineament distribution over the leucogranite outcrops obtained on the optical image in natural color; B - Jirau 01 natural tank, in detail, over the granite outcrop (*lajedo*) with the main lineaments.

6. The natural tank and the minor structures

The Jirau 01 natural tank developed over the ruptile/ductile structures on the granite outcrop (*lajedo*). The disposition of lineaments set, as well as the degree of deepening linked to the physical-chemical weathering, reflect over the geomorphological feature of the crystalline basement (Figure 4B). According to the classification for the different forms of natural tanks in the Brazilian Northeast, elaborated by Waldherr, Araújo-Júnior and Rodrigues (2017a), "Jirau 01" can be understood as a rugged natural tank of large dimensions with bottom morphology of the concave type.

In general lines, the Jirau 01 natural tank (TF01) presents a continuous development plan which can be analyzed, separately, through two sections. The main lineament of the tank presents a WNW-ESE (N80W) direction. The depression is contained by two granitic abutments which extend almost continuously until the outlet or opening. The longitudinal profile of the natural tank presents a total extension of 53 meters in length (Figures 5 and 6). The maximum width between the abutments has 5,30 meters and the morphology varies according to the analyzed section, being symmetrical in the first and asymmetrical in the second section. In turn, the bottom of the depression, in spite of keeping a concave pattern, presents different levels of deepening, reaching 5 meters of depth. The segmentation between the sections of the natural tank sets itself from a fracture obliquely positioned against the longitudinal axis of the depression. The oblique fracture is in a N30W direction, having an extension of 3,50 meters of length (Figure 7).



Figure 5. Image of the Jirau 01 natural tank obtained from the drone overflight at the Jirau Paleontological Site.



Figure 6. Jirau 01 natural tank over the granite outcrop (*lajedo*), integrated to the Jirau Paleontological Site. The depression is used as a water reservoir during dry periods. Facing the East direction.



Figure 7. The Jirau 01 natural tank at the Jirau Paleontological site, partially covered by a water layer and the different sections of the depression highlighted. It is possible to observe the main axis, the fractures on the W-E (WNW-ESE)

direction and others on NW-SE direction, positioned obliquely at the Jirau 01 natural tank. In the downstream part (left side) it is possible to see the opening, or outlet, of the tank.

The first section is situated upstream to the natural tank, and presents the following dimensional parameters: 8 meters of length, with a maximum width of 1,5 meters and depth reaching 5 meters. The lateral walls of the natural tank are very steep, with plunges over 75° and, besides the pitting texture (a characteristic associated with chemical corrosion), present the active mechanism of plate disaggregation (flaking) on the top and middle portions of the cavity. The bottom morphology, where the sedimentary material was completely removed, has a concave format and is, apparently, over-excavated, with it being possible to identify the fracture as the preponderant structural factor to the natural tank development (Figure 8).



Figure 8. The first section of the Jirau 01 natural tank. A - Over-excavated bottom morphology of the tank; B - First section of the Jirau 01 natural tank. It is possible to observe the mechanism of flaking (plate disaggregation) on the lateral walls and the pitted texture (pitting) over the crystalline basement.

The second section corresponds to the segment located downstream to the natural tank. Thus, the continuity of the depressions holds, approximately, 45 meters in length, with a maximum width of 5,50 meters and depths up to 4 meters. The tank maintains on the WNW-ESE direction axis. On the lateral walls, it is possible to observe a differentiation in relation to the first section, due to the manner in which the top and middle parts of the lateral walls was lowered and smoothed (see Figure 9).



Figure 9. Second section of the Jirau 01 natural tank. A - It is possible to analyze the ruptile structure, in this case, the fracture, preponderant in the formation of the natural tank from the main axis. Aspect of the asymmetry between the tank lateral walls; B - Second section of the Jirau 01 natural tank. Detail of the opening or outlet of the natural tank, constrained by the granitic abutments and the *cacimbas* (water-holes) excavations over the tank deposit.

It is important to remark that, in the intersectional area between the fractures, a cluster of minor cavities also occurs, similar to the aspect of a "honeycomb". In general, these are commonly found in shelters or cavities of the tafone type, which can be the result of punctual efforts over the crystalline basement (VIDAL-ROMANÍ, 2008; VIDAL-ROMANÍ; UÑA ALVAREZ; VAQUEIRO RODRÍGUEZ, 2014a; VIDAL-ROMANÍ; VAQUEIRO RODRÍGUEZ; SANJURJO SÁNCHEZ, 2014b; VIDAL-ROMANÍ et al., 2018). The process in question might have favored the development of pre-established features which were modified by the weathering front and, later, under subaerial conditions. On the lateral walls it is also possible to see the action of the flaking mechanism, besides the texture associated to pitting. As it moves forward to outlet, the natural tank tends to grow wider until it forms a wide opening. When using specific terms on papers that involve granitic geomorphology, the opening on the natural tank can also be named as outflow (see Figure 9).

An important note regarding the Jirau 01 natural tank is that the depression has not been completely excavated. In the inside of the Jirau 01 natural tank, the remaining material found next to the outlet and which constitutes the tank deposit can be divided into three sedimentary facies from the bottom to the top (XIMENES, 2003; ARAÚJO-JÚNIOR, 2012; ARAÚJO-JÚNIOR et al., 2013; ARAÚJO-JÚNIOR, 2015), which are: (a) the basal level, composed of conglomeratic sandstone (1,5 meters thick), constituted by in situ weathered material from the matrix basement and sandy sediments; (b) the middle level constituted by conglomerates with sand-clayey matrix, where fossils are concentrated, deposited in a debris/mud flow context (1 meter thick); and (c) the top level lies constituted by fine sediments (1,5 meters thick), composed of clay and silt sediments, with eventual quartz pebbles and an abundance of organic material.

7. Discussions

One of the recent hypotheses being discussed in an academic environment, both for the origin of the parable-shaped tank (vertical symmetry from the main axis) and the occurrence of minor cavities on the lateral walls of the depression arises from the model of migration and concentration of charges in the subsurface. The Leucogranite Penedos lithological unit was allocated in depth at the Santa Quitéria Granitoid, under confining conditions, being subjected to magmatic cooling in different stages, followed by deformation phases of ruptile character and, later, to pressure relief (decrease on confining pressure or erosion of superjacent layers) throughout geological time. The set of processes previously exposed has been accepted in the academy as responsible for the origin and development of families or sets of fractures/joints (sheet fractures) in the crystalline basement (OLLIER, 1984; VIDAL-ROMANÍ, 1989, 2008; VIDAL-ROMANÍ; TWIDALE, 1999; VIDAL ROMANÍ et al., 1995; TWIDALE; VIDAL-ROMANÍ, 2005). The occurrence of fractures (sheet structure) over the granitic basement has been pointed as where the main entrance points to the development of processes linked to the chemical corrosion in subedaphic conditions. Thus, the establishment of meteoric water over specific areas, for instance, in fracture intersections, considering the proximity and disposition of the ruptile structures, would have allowed the acting and differential reshaping from the weathering front in subsurface. However, the sheet structure, besides resulting in the opening

of several entrance points for the access and establishment of meteoric waters, might also have originated the formation of numerous points of tectonic and/or atectonic processes. The charge concentration would result in pre-established structures, in this case, in internally deformed zones, similar to tension bulbs, which would act as preferential areas over the granitic basement to the weathering attacks on the subsurface.

In relation to the morphological aspects of the natural tank interior, it is possible to see a series of minor structures over the basement which would correspond, in international academic literature, to the forms linked to the process of physical-chemical corrosion derived from the soil-rock contact. The granite surface can be characterized, for instance, from a texture known as pitting, with active signs of granular disaggregation and/or flaking. On the lateral walls, it is possible to see the occurrence of minor cavities, similar to honeycomb forms found in features of the tafone type.

Due to the low porosity and permeability of the granitic basement, the natural tank, once exposed to subaerial conditions, should maintain the characteristics generated and/or reshaped in subsurface throughout geological time, setting in the Itapipoca landscape the occurrence (and permanence) of different levels, or even stages, of development of these natural depressions. Even though processes linked to the deepening and/or widening of the natural tank continue after the exposal, these would be subject to significantly slower rates in relation to subedaphic processes. In contrast, the processes of erosion and transportation would act more efficiently over the in situ regolithic material which previously covered the granite terrains, favoring the episodic exposal of the natural tanks. Thus, events associated with different erosive pulses, reoccurrence of torrential rains and relief dissection in the region might be linked to the partial removal of accumulated material in the interior of the depressions, generating accommodation spaces which would be then filled by Quaternary deposits with fossiliferous content from the prehistorical megafauna. The main processes linked to the continuity of the reshaping and erosion of the natural tank, in a subaerial environment, would happen through fluvial action, effects resulting from thermoclasty, influence of biological agents, aeolian activity, etc.

8. Final Considerations

In the context of tectono-structural control, the Jirau 01 natural tank corresponds to two interconnected depressions which apparently developed from the occurrence of ruptile structures over the granitic basement. The main axis of the tank is linked to a fracture in the WNW-ESE (N80W) direction, being crossed obliquely by another fracture in the N30W direction. Although it is highlighted in geological mapping that the intrusive bodies, with elongated shapes, are oriented towards the N45E direction (regional trend) (BRAGA; GOMES, 2018), the lineaments conjugation, in detail, preponderantly presents the WNW-ESE (or NW-SE) and NWN-SES directions.

In the first section, located upstream to the natural depression, the tank format is similar of a parable, being characterized by its concavity facing upwards and a vertical symmetry axis, while downstream, in the second section, the parable tends to become wider, lowering the tank edges or granitic abutments until it constitutes an outlet. It is important to remark that the lateral walls on the second section of the tank present a different reshaping, where the edges and granitic abutments are asymmetric, specifically from the point where the joining of fractures oblique and parallel to the main axis occurs. The initial observations in this present study aim to highlight, from the morphological analysis of the Jirau 01 natural tank, the preponderant role of structural control in the possible origin and development of the natural depression.

Authors Contributions: Conception, Felipe Rodrigues Waldherr, Telma Mendes da Silva and Celso Lira Ximenes; methodology, Felipe Rodrigues Waldherr, Hermínio Ismael de Araújo-Júnior and Sérgio Wilians de Oliveira Rodrigues; software, Felipe Rodrigues Waldherr and Sérgio Wilians de Oliveira Rodrigues; formal analyses, Sérgio Wilians de Oliveira Rodrigues and Celso Lira Ximenes; research, Felipe Rodrigues Waldherr, Telma Mendes da Silva and Celso Lira Ximenes; data acquisition, Felipe Rodrigues Waldherr, Celso Lira Ximenes and Hermínio Ismael de Araújo-Júnior.; article writing, Felipe Rodrigues Waldherr, Telma Mendes da Silva and Celso Lira Ximenes; revision, Telma Mendes da Silva and Hermínio Ismael de Araújo-Júnior; supervision, Telma Mendes da Silva and Celso Lira Ximenes; financial acquisition, Felipe Rodrigues Waldherr. All authors read and agreed with the published version of the manuscript.

Financial Support: This research was funded by the Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do RJ (FAPERJ), grant 2021013531.

Acknowledgements: The authors are grateful to Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGG-UFRJ) and the Prefeitura Municipal de Itapipoca (PMI) for supporting travelling costs; to Museu de Pré-história

de Itapipoca (MUPHI) and the geographers Ricardo Machado and Henrique Sampaio for the helpfull assistance in the fieldwork. The authors are also thankful to the anonymous reviewers for their valuable comments and suggestions for improving the quality of this paper.

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest. The funders did not interfere in the development of the study, in the collection, analysis, or interpretation of data, in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

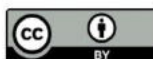
References

1. ALMEIDA, F. F. M.; HASUY, Y.; BRITO NEVES, B. B.; FUCK, R. A. Brazilian structural provinces: An introduction. *Earth-Science Reviews*, v. 17, n. 1-2, p. 1-29, 1981.
2. AMARAL, I. Formas de «Inselberge» (ou montes-ilhas) e de meteorização superficial e profunda em rochas graníticas do Deserto de Moçâmedes (Angola), na margem direita do Rio Curoca. *Garcia de Orta - Série de Geografia*, v. 1, n. 1, p. 1-34, 1973.
3. AMARAL, I. A propósito de formas escavadas em leitos fluviais e em vertentes de rochas graníticas do Deserto de Moçâmedes (Angola), na margem direita do Rio Curoca. *Garcia de Orta - Série de Geografia*, v. 2, n. 1, p. 1-18, 1974.
4. ARAÚJO-JÚNIOR, H. I. *Tafonomia da acumulação fossilífera de vertebrados pleistocênicos do Tanque do Jirau, Itapipoca, Estado do Ceará, Brasil*. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2012. 185p.
5. ARAÚJO-JÚNIOR, H. I. *Modelo tafonômico para vertebrados de depósitos de tanque do Nordeste do Brasil*. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2015. 193p.
6. ARAÚJO-JÚNIOR, H. I. Classifying vertebrate assemblages preserved in Quaternary tank deposits: Implications for vertebrate taphonomy and paleoecology. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 445, p. 147-152, 2016.
7. ARAÚJO-JÚNIOR, H. I.; MOURA, G. J. B. Anuros (Amphibia, Anura) do Pleistoceno Final-Holoceno inicial de Itapipoca, Estado do Ceará, Brasil: Taxonomia, Paleocologia e Tafonomia. *Revista Brasileira de Paleontologia*, v. 17, p. 373-388, 2014.
8. ARAÚJO-JÚNIOR, H. I.; PORPINO, K. O.; BERGQVIST, L. P. Marcas de dentes de carnívoros/carniceiros em mamíferos pleistocênicos do Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Paleontologia*, v. 14, n. 3, p. 291-296, 2011a.
9. ARAÚJO-JÚNIOR, H. I.; PORPINO, K. O.; BERGQVIST, L. P. Vertebrate taphonomy and paleoecology in an Upper Pleistocene tank deposit of Paraíba, Brazil: Taphonomic modes, evidence of temporal and spatial resolutions and paleoecological patterns of the Brazilian Intertropical Region. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 437, p. 1-17, 2015.
10. ARAÚJO-JÚNIOR, H. I.; PORPINO, K. O.; XIMENES, C. L.; BERGQVIST, L. P. Análise multivariada como ferramenta tafonômica no estudo das associações quaternárias de mamíferos do Nordeste do Brasil. *Gaea - Journal of Geoscience*, v. 7, n. 2, p. 104-111, 2011b.
11. ARAÚJO-JÚNIOR, H. I.; PORPINO, K. O.; XIMENES, C. L.; BERGQVIST, L. P. Unveiling the taphonomy of natural tank deposits: A case study in the Pleistocene of Northeastern Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 378, p. 52-74, 2013.
12. ARTHAUD, M. H.; CABY, R.; FUCK, R. A.; E. L. DANTAS; PARENTE, C. V. Geology of the northern Borborema Province, NE Brazil and its correlation with Nigeria, NW Africa. In: PANKHURST, R. J.; TROUW, R. A. J.; BRITO NEVES, B. B.; WIT, M. J. (Ed.). *West Gondwana: Pre-Cenozoic correlations across the South Atlantic Region*. London: Geological Society, 2008. p. 49-67.
13. BARRETO, A. M. F.; SILVA, F. M.; ALMEIRA, J. A. C.; LINS E SILVA, A. C. B. Os depósitos de cacimbas de Pernambuco: Aspectos geomorfológicos, geológicos, paleontológicos e paleoambientais. In: XLII Congresso Brasileiro de Geologia (CBG), 42., 2004, Minas Gerais. *Anais...* Minas Gerais: Sociedade Brasileira de Geologia. 2004. p. 1-2.
14. BERGQVIST, L. P.; GOMIDE, M.; CARTELLE, C.; CAPILLA, R. Faunas-locais de mamíferos pleistocênicos de Itapipoca/Ceará, Taperoá/Paraíba e Campina Grande/Paraíba. Estudo Comparativo, Bioestratigráfico e Paleoambiental. *Geociências*, v. 2, n. 6, p. 23-32, 1997.
15. BRAGA, I. F.; GOMES, I. P. *Programa Geologia do Brasil - PGB. Itapipoca, Folha SB.24-Y-D-II. Estado do Ceará, Carta Geológica*. Fortaleza: CPRM, 2014. 1 mapa colorido, 96 x 67,5 cm. Escala 1:100.000.
16. BRAGA, I. F.; GOMES, I. P. *Geologia e recursos minerais da Folha Itapipoca SA.24-Y-D-II: Estado do Ceará*. Fortaleza: CPRM, 2018. 73p.
17. BRITO NEVES, B. B.; SANTOS, E. J.; VAN SCHMUS, W. R. Tectonic history of the Borborema Province. In: CORDANI, U. G.; MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPO, D. A. (Ed.). *Tectonic evolution of the South America*. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia, 2000. p. 151-182.
18. 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. 185-208, 2020.

19. DEMANGEOT, J. **Os meios naturais do globo**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2000. 478p.
20. DERRUAU, M. **Geomorfologia**. Barcelona: Ariel Geografia, 1983. 528p.
21. FARIA, F. H. C.; CARVALHO, I. S.; ARAÚJO-JÚNIOR, H. I. Genesis and taphonomic biases of Quaternary tank deposits of northeastern Brazil. *Quaternary Internacional*, v. 550, p. 184-193, 2020.
22. FOSSEN, H. **Geologia Estrutural**. São Paulo: Oficina de textos, 2018. 608p.
23. GOLDSTEIN, A.; MARSHAK, S. Analysis of fracture array geometry. In: MARSHAK, S.; MITRA, G. (Ed.). **Basic methods of structural geology**. New Jersey: Prentice-Hall, 1988. p. 249-267.
24. JENNESS, J. **Polar Plots ArcGIS Extension**. Jenness Enterprises, 2014. Disponível em: <http://www.jennessent.com/arcgis/Polar_Plots.htm>. Acesso em 28/05/20.
25. LIMA, D. L. S. **Geomorfologia em estruturas graníticas: o caso do Maciço de Uruburetama, Ceará, Brasil**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza. 2018. 258p.
26. LIMA, D. L. S.; BASTOS, F. H.; CORDEIRO, A. M. N.; MAIA, R. P. Geomorfologia granítica do Maciço de Uruburetama, Ceará, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 20, n. 2, p. 373-395, 2019.
27. LIMA, J. S.; SILVA, J. L. L. Mamíferos fósseis pleistocênicos em tanque arenítico no município de Delmiro Gouveia, Alagoas, Brasil. *Estudos Geológicos*, v. 26, n. 2, p. 77-90, 2016.
28. MABESOONE, J. M.; OLIVEIRA, L. D. D.; DAMASCENO, J. M. Desenvolvimento dos tanques fossilíferos no semi-árido norterio-grandense. In: XXXVI Congresso Brasileiro de Geologia, 36., 1990, Natal. *Anais...* Natal: SBG. 1990. v. 2. p. 733-741.
29. MAIA, R. P.; BEZERRA, F. H. R. Condicionamento estrutural do relevo no nordeste setentrional brasileiro. *Mercator*, v. 13, n. 1, p. 127-141, 2014.
30. MAIA, R. P.; NASCIMENTO, M. A. L. Relevos graníticos do nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 19, n. 2, p. 373-389, 2018.
31. MAIA, R. P.; BASTOS, F. H.; NASCIMENTO, M. A. L.; LIMA, D. L. S.; CORDEIRO, A. M. N. **Paisagens graníticas do nordeste brasileiro**. Fortaleza: Edições UFC, 2018. 104p.
32. MAYOR RODRÍGUEZ, J. A. **Génesis de cavidades graníticas en ambientes endógenos y exógenos**. 2011. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto Universitario de Geologia Isidro Parga Pondal, Universidad de Coruña, La Coruña. 2011. 396p.
33. OLIVEIRA, L. D. D.; HACKSPACHER, P. C. Gênese e provável idade dos tanques fossilíferos de São Rafael-RN. In: XI Congresso Brasileiro de Paleontologia, 11., 1989, Curitiba. *Anais...* Curitiba: SBP. 1989. v. 1. p. 541-549.
34. OLIVEIRA, L. D. D. Considerações sobre o emprego da terminologia da "formação cacimbas" e caldeirões para os tanques fossilíferos do nordeste do Brasil. In: XI Congresso Brasileiro de Paleontologia, 11., 1989, Curitiba. *Anais...* Curitiba: SBP. 1989. v. 1. p. 535-539.
35. OLIVEIRA, L. D. D.; DAMASCENO, J. M.; LINS, F. A. P. L.; MEDEIROS, W. E.; MOREIRA, J. A. Estudo microfossilífero dos tanques da Fazenda Capim Grosso, São Rafael - RN, auxiliado por métodos geofísicos. In: XI Congresso Brasileiro de Paleontologia, 11., 1989, Curitiba. *Anais...* Curitiba: SBP. 1989. v. 1, p. 551-563.
36. OLLIER, C. **Weathering**. New York: Longman, 1984. 270p.
37. PAULA-COUTO, C. Fossil Pleistocene to sub-recent mammals from northeastern Brazil. I-Edentata Megalonychidae. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 52, n. 1, p. 144-151, 1980.
38. PEDRAZA, J. G. Los Modelos genéticos evolutivos del Sistema Central Español: Implicaciones morfotectónicas. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, n. 19, p. 91-118, 1994.
39. PEDRAZA, J. G. **Geomorfología: Principios, Métodos y Aplicaciones**. Madrid: Ed. Rueda, 1996. 414p.
40. PEDRAZA, J. G.; SANZ, M. A.; MARTÍN, A. **Formas graníticas de la Pedriza**. Madrid: Agencia de Medio Ambiente de la Comunidad de Madrid, 1989. 205p.
41. RODRIGUES, S. W. O.; ARCHANJO, C. J.; GROHMANN, C. H. Quantificação da deformação finita nos metagranitoides Cariris Velhos na região de Alagoa Grande (PB). *Geologia USP - Série científica*, v. 10, n. 3, p. 57-78, 2010.
42. 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.
43. SANTOS, M. F. C. F.; BERGQVIST, L. P.; LIMA-FILHO, F. P.; PEREIRA, M. M. V. Feições tafonômicas observadas em fósseis pleistocênicos do Rio Grande do Norte. *Revista de Geologia*, v. 15, p. 31-41, 2002.
44. SANTOS JÚNIOR, V. **Registros rupestres da área arqueológica de Santana (RN)**. Dissertação (Mestrado em Arqueologia) - Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2005. 211p.
45. SANTOS JÚNIOR, V.; PORPINO, K. O.; SANDERSON, A. A megafauna extinta e os artefatos culturais de um tanque natural na região central do Rio Grande do Norte. *Contexto (Mossoró)*, v. 3, p. 176-193, 2008.
46. SANTOS JÚNIOR, V. **Arqueologia da paisagem: Proposta geoambiental de um modelo explicativo para os padrões de assentamentos do Enclave Arqueológico Granito Flores, microrregião de Angicos (RN)**. Tese (Doutorado em Arqueologia) - Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2013. 269p.

47. SANTOS JUNIOR, V.; ROCHA, L. C. M.; OLIVEIRA, D. L.; GONZAGA, S. P. F.; ARAÚJO, M. R. Os vestígios arqueológicos e paleontológicos em tanques naturais das microrregiões de Angicos, Oeste e Serra de Santana, Rio Grande do Norte, Brasil. *Revista Tarairiú*, v. 1, n. 10, p. 76-89, 2015.
48. SILVA, D. G.; CORRÊA, A. C. B. Evolução paleoambiental dos depósitos de tanques em Fazenda Nova, Pernambuco - Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 2, n. 2, p. 43-56, 2009.
49. SILVA, D. G. **Evolução paleoambiental dos depósitos de tanques em Fazenda Nova, Município de Brejo da Madre de Deus - Pernambuco**. Tese (Doutorado em Geografia) - Departamento de Ciências Geográficas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2008. 154p.
50. SILVA, D. G.; CORRÊA, A. C. B.; AMORIM, R. F. Caracterização morfológica e dinâmica ambiental das marmitas de dissolução (weathering pit) no distrito de Fazenda Nova, Pernambuco - Nordeste do Brasil. *Geomorfologia do nordeste setentrional brasileiro: uma proposta de classificação*. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 18, n. 2, p. 349-362, 2017.
51. SOUZA, A. S. M. **As unidades fitoecológicas do município de Itapipoca/CE: Fatores condicionantes do estado de conservação**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2009. 116p.
52. TWIDALE, C. R.; VIDAL-ROMANÍ, J. R. **Landforms and geology of granitic terrains**. Leiden: Balkema, 2005. 352p.
53. TWIDALE, C. R. **Granite landforms**. Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 1982. 372p.
54. TWIDALE, C. R. Granite landform evolution: Factors and implications. *Geologische Rundschau*, v. 75, n. 3, p. 769-779, 1986a.
55. TWIDALE, C. R. Granite platforms and low domes: newly exposed compartments or degraded remnants? *Geografiska Annaler*, v. 68, n. 4, p. 399-411, 1986b.
56. TWIDALE, C. R. La Iniciación subsuperficial de las formas graníticas y sus implicaciones en las teorías generales de evolución del paisaje. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, n. 13, p. 49-68, 1989.
57. TWIDALE, C. R. Granitic bornhardts: Their morphology, characteristics and origins. *The Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, v. 42, p. 237-255, 1998.
58. TWIDALE, C. R. The two-stage concept of landform and landscape development involving etching: origin, development and implications of an idea. *Earth-Science Reviews*, v. 57, p. 37-74, 2002.
59. VIDAL-ROMANÍ, J. R. Microformas graníticas tipo tafoni (cachola) y gnamma (pia) - Un micromodelado sin relación con el clima o la estacionalidad. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, n. 7, p. 273-277, 1984.
60. VIDAL-ROMANÍ, J. R. Estudio teórico sobre el origen de las características morfológicas de las Pias (Gnamma, Vasque). *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, n. 9, p. 133-168, 1985.
61. VIDAL-ROMANÍ, J. R. Geomorfología granítica en Galicia (NW España). *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, n. 13, p. 89-163, 1989.
62. VIDAL-ROMANÍ, J. R. Formas menores en rocas graníticas un registro de su historia deformativa. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, n. 15, p. 317-328, 1990.
63. VIDAL-ROMANÍ, J. R. Forms and structural fabric in granite rocks. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, n. 33, p. 175-198, 2008.
64. VIDAL-ROMANÍ, J. R.; VAQUEIRO RODRÍGUEZ, M.; SANJURJO SÁNCHEZ, J. Granite landforms in Galicia. In: GUTIÉRREZ, F.; GUTIÉRREZ, M. (Ed.). *Landscapes and landforms of Spain*. Dordrecht: Springer, 2014b. p. 63-69.
65. VIDAL-ROMANÍ, J. R.; TWIDALE, C. R. **Formas y paisajes graníticos**. La Coruña: Universidad da Coruña Servicio de Publicaciones, 1998. 411p.
66. VIDAL-ROMANÍ, J. R.; TWIDALE, C. R. Sheet fractures, other stress forms and some engineering implications. *Geomorphology*, n. 31, p. 13-27, 1999.
67. VIDAL-ROMANÍ, J. R.; UÑA ALVAREZ, E.; VAQUEIRO RODRÍGUEZ, J. An endogenous origin for the form tafone developed in magmatic rocks. In: VIII Reunión Nacional de Geomorfología, 8, 2014, Cáceres. *Anales... Cáceres, Relieves Graníticos y Cársticos*, 2014a. p. 486-489.
68. VIDAL-ROMANÍ, J. R.; VAQUEIRO RODRÍGUEZ, M.; VÁZQUEZ, R. C. **Geología 18 - Ria de Aldán**. Salamanca: Colección Geología - Sociedad Geológica de España, 2018. 29p.
69. VIDAL-ROMANÍ, J. R.; TWIDALE, C. R.; CAMPBELL, E. M.; CENTENO, J. Pruebas morfológicas y estructurales sobre el origen de las fracturas de descamación. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, n. 20, p. 307-346, 1995.
70. VILLAR, D. D. **Análisis morfométrico de pilancones: Consideraciones genéticas, evolutivas y paleoambientales**. Tese (Doutorado em Geologia) - Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, Madrid. 2007. 319p.
71. WALDHERR, F. R.; ARAÚJO-JÚNIOR, H. I.; RODRIGUES, S. W. O. Oríem e morfología de tanques naturais do Nordeste do Brasil. *Pesquisas em Geociências*, v. 44, n. 3, p. 467-488, 2017a.

72. WALDHERR, F. R.; VIDAL-ROMANÍ, J. R.; RODRIGUES, S. W. O. Consideraciones previas sobre las formas del tipo tafone y otras estructuras menores en la vertiente norte del Pão de Açúcar, Rio de Janeiro - Brasil. **Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe**, n. 40, p. 139-158, 2018a.
73. WALDHERR, F. R.; ARAÚJO-JÚNIOR, H. I.; RODRIGUES, S. W. O.; TUPINAMBÁ, M. A origem dos tanques naturais brasileiros: O modelo polifásico subedáfico. In: XII Simpósio Nacional de Geomorfologia, 12., 2018, Crato. **Anais...** Crato, UGB. 2018b.
74. WALDHERR, F. R.; ARAÚJO-JÚNIOR, H. I.; RODRIGUES, S. W. O.; TUPINAMBÁ, M.; VAZ, O. R. Tanques naturais: Considerações sobre origem e morfologia e descrição da primeira ocorrência fora do Nordeste do Brasil. In: X Simpósio de Geologia do Sudeste, 10., 2017, Diamantina. **Anais...** Diamantina, SBG. 2017b.
75. WALDHERR, F. R.; ARAÚJO-JÚNIOR, H. I.; RODRIGUES, S. W. O.; XIMENES, C. L. La importancia de los tanques naturales (mega gnammas) en la preservación de fósiles de la Megafauna cuaternaria en el Noreste de Brasil. **Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe**, n. 41, p. 99-122, 2019.
76. XIMENES, C. L.; SANTOS, A. S. T. Itaipoca 1961: A expedição João Cativo e seu legado para a paleontologia brasileira. In: CARVALHO, I. (Ed.). **Paleontologia: Cenários de Vida - Paleoclimas**. Rio de Janeiro: Interciência, v. 5, 2011. p. 795-806.
77. XIMENES, C. L. **Proposta metodológica para um programa de micro-reservatórios alternativos de água nos sertões semi-áridos brasileiros, associado ao resgate de fósseis**. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2003. 146p.
78. XIMENES, C. L. Novas ocorrências de fósseis de megafauna no neo-quatémário do estado do Ceará, Brasil. In: Paleo Nordeste 2006 - Reunião anual regional da sociedade brasileira de paleontologia, 2006, Sobral. **Anais...** Sobral: UVA, 2006a, p. 25.
79. XIMENES, C. L. A área paleontológica quaternária de Itaipoca, Ceará. In: Paleo Nordeste 2006 - Reunião anual regional da sociedade brasileira de paleontologia, 2006, Sobral. **Anais...** Sobral, UVA. 2006b. p. 26.
80. XIMENES, C. L. Tanques fósilíferos de Itaipoca, CE: Bebedouros e cemitérios de megafauna pré-histórica. In: WINGE, M.; SCHOBENHAUS, C.; SOUZA, C. R. G.; FERNANDES, A. C. S.; BERBERT-BORN, M.; QUEIROZ, E. T.; CAMPOS, D. A. (Ed.). **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. Brasília: SIGEP - Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos, 2009. p. 465-478.



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.

ANEXO G - Breves considerações sobre tafoni em inselbergs: aspectos genéticos e morfoestruturais.

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.

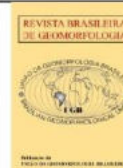


<https://rbgeomorfologia.org.br/rbg>
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 23, n° 4 (2022)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v23i4.2090>



Artigo de Pesquisa

Breves considerações sobre Tafoni em inselbergs: aspectos genéticos e morfoestruturais

Brief considerations on Tafoni in inselbergs: genetic and morphostructural aspects

Rubson Pinheiro Maia¹, Frederico de Holanda Bastos², Felipe Rodrigues Waldherr³, Marcos Antônio Leite do Nascimento⁴, Augusto Sarreiro Auler⁵

- ¹ Departamento de Geografia, Universidade Federal do Ceará. Campus do Pici, Bloco 911, Fortaleza, CE, CEP: 60455-760, Brasil. rubsonpinheiro@yahoo.com.br
ORCID: orcid.org/0000-0002-8905-0121
- ² Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual do Ceará. Campus do Itaperi, Fortaleza, CE. CEP: 60740-903. Brasil. fred_holanda@yahoo.com.br
ORCID: orcid.org/0000-0002-4330-7198
- ³ Programa de Pós-graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis, Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rua São Francisco Xavier, 524, Maracanã, Rio de Janeiro, RJ, CEP: 20550-013, Brasil. felipewald@gmail.com
ORCID: orcid.org/0000-0002-6036-9737
- ⁴ Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Av. Senador Salgado Filho, Natal, RN, CEP: 59.072-970, Brasil. marcos@geologia.ufm.br
ORCID: orcid.org/0000-0002-8158-7186
- ⁵ Instituto do Carste. Rua Brasópolis, 139, Floresta, Belo Horizonte, MG, CEP: 30.150-170, Brasil. aauler@gmail.com
ORCID: orcid.org/0000-0002-8454-3381

Recebido: 01/02/2021; Aceito: 29/03/2022; Publicado: 01/10/2022

Resumo: Os tafoni (*tafone* no singular) são cavidades naturais localizadas em afloramentos escarpados associados a diferentes litologias, tendo uma expressiva ocorrência em inselbergs e domos graníticos residuais. São originados a partir da intemperização química ao longo de superfícies de descontinuidades como fraturas, falhas, veios, diques, *sets* de juntas, onde se instalam microambientes de maior umidade. Nesse trabalho foram analisadas diversas ocorrências de tafoni no Ceará, Paraíba, Bahia e Rio de Janeiro. A partir de revisão bibliográfica e trabalhos de campo foi proposto um modelo morfogenético para a formação de cavidades com base no controle estrutural e, por vezes, adicionado ao petrográfico. A meteorização inicial se dá preferencialmente ao longo das fraturas, especialmente nas zonas onde a água pode percolar ou mesmo residir. A partir daí, as depressões vão sendo alargadas por meio da progressiva descamação das superfícies interiores e a sua desintegração granular. Ainda na fase de fraturamento, que antecede a fase de colapso, a expansão da cavidade cria nichos de intemperismo onde a variação de temperatura e umidade é diretamente proporcional ao volume removido. Uma vez iniciada a fase de colapso, o processo de expansão da cavidade dá-se por formação e coalescência de *honeycombs*, levando a expansão ascendente originando assim os tafoni.

Palavras-chave: Paisagens graníticas; Cavidades de intemperismo; Deformações rúpteis

Abstract: Tafoni are natural cavities incised in to vertical rock surfaces associated with different lithologies, having an expressive occurrence in inselbergs and residual granitic domes. Tafoni are cavities that form in the escarpments of inselbergs or at the bases of residual granitic domes. They are originate from chemical weathering along fractures, faults, veins, dykes,

joint sets, where microenvironments of higher humidity are installed. In this work several occurrences of tafoni in Ceará, Paraíba, Bahia and Rio de Janeiro states (Brazil) were analysed. From literature review and fieldwork, a morphogenetic model for cavity formation was proposed based on structural control and sometimes added to petrographic control. The initial weathering occurs preferably along fractures or other lines of discontinuity, especially in areas where water can seep through or even reside. Subsequently, the depressions are widened through the progressive flaking of the inner surfaces and their granular disintegration. Still in the fracturing phase, which precedes the collapse phase, the expansion of the cavity along the fracture planes creates niches of weathering where the variation in temperature and humidity is directly proportional to the volume removed. Once the collapse phase has started, the cavity expansion process occurs through the formation and coalescence of honeycombs, leading to the upward expansion, thus originating the tafoni.

Keywords: Granitic landscapes; Weathering cavities; Ruptile deformations

1. Introdução

Tafoni (plural de *tafone*) é um termo proveniente da ilha de Córsega, na França, e que traduzido para o português, têm o significado de perfuração ou janela (ROQUÉ et al., 2013). Pode ser definido como um oco, produzido por meteorização local em uma face rochosa íngreme (ALLABY, 2013). Tratam-se de formas resultantes do intemperismo cavernoso que normalmente possuem vários metros cúbicos de volume e têm entradas em forma de arco (GOUDIE, 2003). Em seu interior, feições análogas como alvéolos e *honeycombs* são usualmente empregadas para descrever a mesma formação (MUSTOE, 1982; VIDAL-ROMANÍ; YEPES TERMIÑO, 2004).

Os *tafoni*, assim como os *honeycombs*, são alguns dos fenômenos geomorfológicos mais enigmáticos e intrigantes pois, apesar do esforço de pesquisas ao longo de mais de um século (KLIMCHOUCK, 2017) permanecem como feições ainda não completamente compreendidas (INKPEN; HALLB, 2016). São comuns em todo o mundo, independente da latitude (GOUDIE; VILES, 1997) e foram descritos em litologias distintas (GROOM et al., 2015).

O presente trabalho, pretende demonstrar, de maneira inicial, como fatores estruturais podem constituir o ponto inicial de partida para o intemperismo cavernoso em rochas graníticas. Para tanto, foram escolhidas 4 unidades amostrais, compostas por inselbergs com *tafoni*. São elas, o campo de inselbergs de Quixadá, no Ceará, o complexo Monte das Gameleiras na Paraíba, Inselbergs de Itatim na Bahia e o Pão de Açúcar no Rio de Janeiro. As áreas amostrais selecionadas estão indicadas nos pontos 1, 2, 3 e 4 da Figura 1.

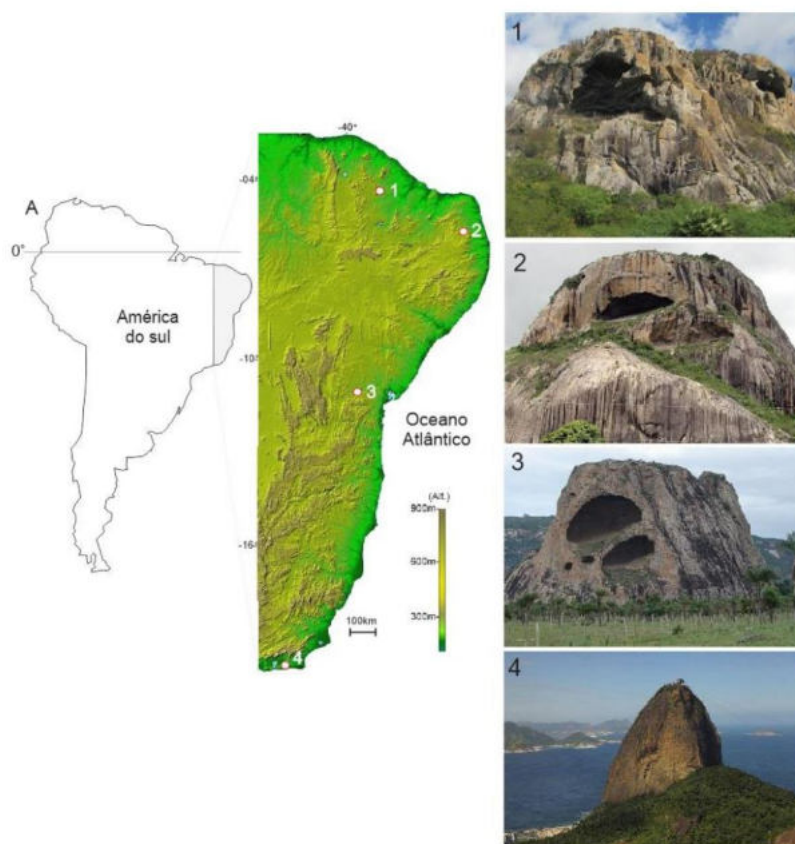


Figura 1. Distribuição geográfica das áreas amostrais com presença de *tafoni*. 1: Inselbergs de Quixadá – Ceará. 2: Pedra da Boca – Araruna – Paraíba. 3: Itatim – Bahia. 4: Pão de Açúcar – Rio de Janeiro.

As áreas escolhidas representam importantes paisagens graníticas no contexto brasileiro e se localizam em diferentes latitudes (Inselbergs de Quixadá/CE - 4°58'S; Inselbergs de Araruna/PB - 6°27'S; Inselbergs de Itatim/BA - 12°43'S; Pão de Açúcar no Rio de Janeiro/RJ - 22°56'S), sendo as três primeiras situadas em domínio natural semiárido de baixa latitude e a última em domínio tropical úmido.

Ao todo, foram escolhidos 10 *tafoni* em domos graníticos sendo os critérios de escolha a dimensão horizontal superior a 10 metros e a presença de *honeycombs* em seu interior. A localização das áreas amostrais envolveu 3 províncias geológicas, nomeadamente Borborema (Quixadá/CE e Araruna/PB), São Francisco (Itatim/BA) e Mantiqueira (Pão de Açúcar/RJ) (ALMEIDA et al, 1977).

Do ponto de vista altimétrico, Quixadá e Itatim localizam-se em superfícies de aplainamento desenvolvidas entre as cotas de 200 m e 300 m (MAIA et al, 2015, LIMA; CORREA; GOMES, 2015), podendo seus inselbergs, atingirem cotas próximas de 500 m. Araruna se situa nos esporões setentrionais do planalto da Borborema cujo setor dos inselbergs analisados localiza-se em cotas que variam de 200 a 400 m. Já o Pão de Açúcar (Rio de Janeiro) constitui um domo rochoso localizado no nível do mar cujo topo possui 392 m (FERNANDES et al., 2010).

2. Materiais e Métodos

A metodologia desse trabalho contou primeiramente com ampla revisão bibliográfica acerca de relevos graníticos e, mais especificamente, sobre cavidades do tipo *tafone* e *honeycomb*. As ferramentas de geotecnologias viabilizaram a construção de um banco de dados geoespaciais com arquivos vetoriais e matriciais. Nessa perspectiva, foi realizado o tratamento digital de imagens do Sensor TM – Landsat 5 e do radar SRTM com resolução espacial de 30 m. As imagens de radar permitiram a elaboração de blocos diagramas que deram suporte à interpretação geomorfológica e à representação tridimensional do relevo. As informações geológicas de mapeamentos regionais utilizadas encontram-se disponíveis no site do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), tendo sido consultadas as folhas Quixadá (SB.24-V-B-VI) e Quixeramobim (SB.24-V-D-III), ambas na escala de 1:100.000, e as folhas Natal (SB.25), Salvador (SD.24) e Rio de Janeiro (SF.23) na escala de 1:1.000.000. As interpretações dos mapas geológicos juntamente com a hipsometria proporcionada pela SRTM permitiram correlacionar as macrounidades de relevo com o contexto litoestrutural regional de cada recorte espacial analisado.

Posteriormente, os trabalhos de campo e reconhecimento objetivaram a identificação e a caracterização das formas de relevo em escala de detalhe. A identificação e a classificação de microformas de dissolução seguiram os critérios taxonômicos de Migón (2006). Em cada ocorrência, durante as observações de campo, foi realizada petrografia macroscópica objetivando sua caracterização mineralógica e litoestrutural (planos de foliação ígnea/metamórfica). Essa caracterização permitiu estabelecer correlações entre formas, faciologia, textura e estrutura, conforme preconizado por Maia et al., (2015). A presença de *tafoni* nas escarpas dos domos graníticos foi o principal critério de escolha das áreas amostrais.

3. Resultados

Foi verificado que nos casos em que a rocha granítica apresenta veios, o fraturamento por alívio de pressão soma-se ao deslocamento ao longo de superfícies de descontinuidade representadas pelo contato entre o veio e a rocha hospedeira (Figura 2).

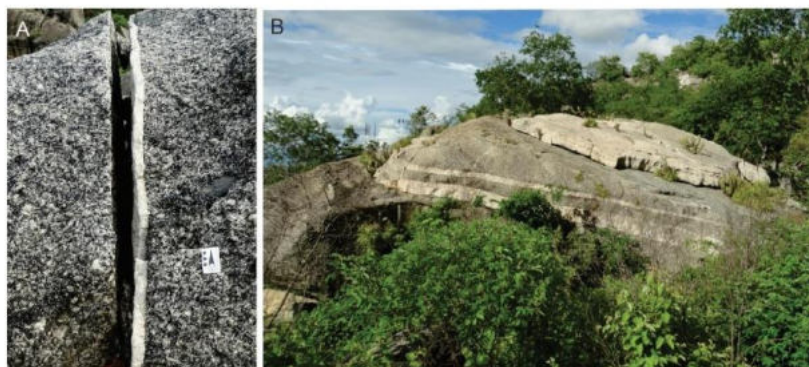


Figura 2. Exemplos de fraturas verticais (A) e horizontais (B) ao longo de superfícies de descontinuidade representadas por veios em rocha granítica. (Quixadá/CE, 2018).

Além de ser um condicionador direcional do fraturamento, os veios podem também ser ponto de partida para a formação de micro-cavidades. Essas cavidades surgem como *vugs* centimétricos que se expandem no sentido oposto ao veio, consumindo a rocha granítica, por meio da alteração de minerais máficos (micas e anfibólios) e/ou feldspatos, com formação de *grus* (Figura 3A). A expansão da cavidade se dá de forma homogênea em rochas isotrópicas na forma de cúpulas. Em meios anisotrópicos as cavidades são assimétricas com eixo de maior desenvolvimento ao longo da foliação/faturamento.

Na ocorrência de fraturamento multidirecional, principalmente quando se tem veios em várias direções, ou quando se soma ao fraturamento por descompressão, blocos podem ser isolados, criando-se assim, o contexto

necessário para o colapso de blocos. O espaço vazio deixado na escarpa pelo colapso total ou parcial de blocos constitui a cavidade de colapso (Figura 3B).

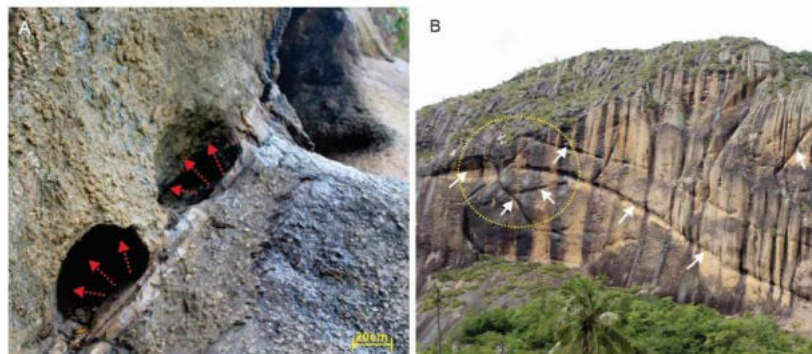


Figura 3. Gênese de cavidades ao longo de superfície de descontinuidade representadas por veios de quartzo: As setas vermelhas indicam o sentido de expansão da cavidade (A) e as setas brancas indicam as reentrâncias erosionais formadas na zona de contato entre os veios e o granito (B). O círculo amarelo pontilhado indica a área de fraturamento multidirecional. (Araruna/PB, 2018)

Essa evolução pode ser resumida em quatro estágios (Figura 4): a formação de fraturas de alívio de pressão e o intemperismo ao longo das fraturas origina os *honeycombs* na fase pré-colapso (Figuras 4A e 4B). Nesse modelo evolutivo as fraturas condicionam os ambientes propícios para intemperização e consequente desenvolvimento dos *honeycombs*. Posteriormente, o avanço do intemperismo individualiza os blocos promovendo seu colapso; tal processo dá origem às cavidades e expõe os *honeycombs* (Figura 4C e 4D).

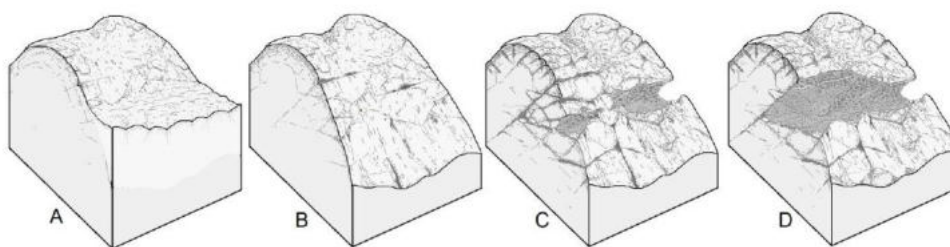


Figura 4. Modelo de processo de formação de *tafoni* a partir de fraturas: exumação de corpo ígneo (A), formação de fraturas de alívio de pressão (B), fraturamento, intemperismo e colapso de blocos (C e D) (Adaptado de MIGÓN; MAIA, 2020).

Dos exemplos analisados nesse trabalho, todos os *tafoni* apresentaram eixo de maior desenvolvimento coincidente com a direção de fraturamento, veios ou foliação. Contudo, destaca-se que as amostras adotadas, apesar de muito representativas em termos regionais, podem não refletir uma evolução global de cavidades de intemperismo do tipo *tafoni*.

A maioria dos exemplos de cavidades ou *tafoni* gerados inicialmente por colapso estão comumente alinhados ao longo de superfícies de descontinuidade como fraturas, falhas, veios e diques. Quando o colapso antecede a fase de formação de *honeycombs*, o teto da cavidade apresenta-se como uma superfície linear, desprovida de feições de dissolução (Figura 5).



Figura 5. Caverna formada por colapso (Quixadá, 2016).

Em alguns casos é possível visualizar o veio como superfície de deslocamento, como é o caso da Pedra da Galinha, em Quixadá – CE (Figura 6). Observa-se que o veio como superfície de propagação de fratura, também pode condicionar o início da formação de *honeycombs*. Quando o processo de alteração remove parcialmente o veio ou o mesmo fora removido em parte pelo colapso, a superfície granítica exposta, do teto da caverna, passa a expor *honeycombs* até então desenvolvidos na fase pré-colapso e, a partir daí, a evolução dos *honeycombs* passa para a fase pós-colapso.

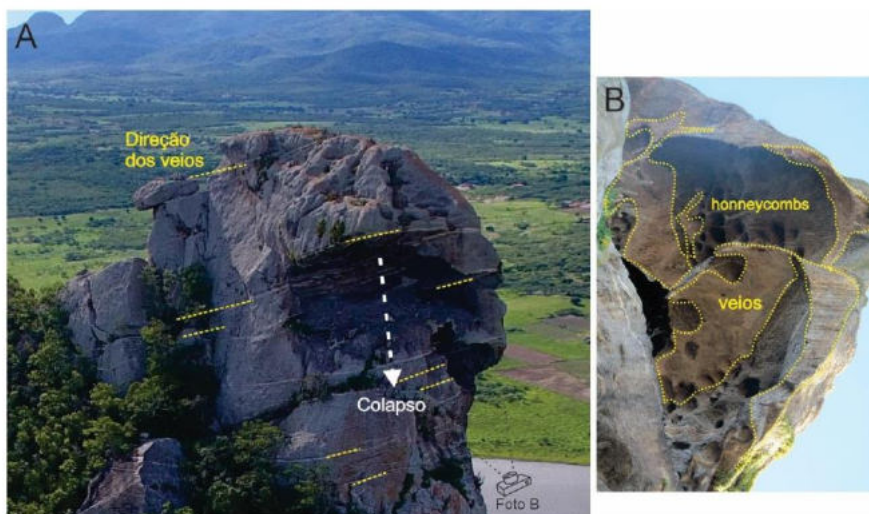


Figura 6. *Tafone* da Pedra da Galinha – Quixadá, CE: cavidade formada por colapso (A); teto da cavidade de colapso mostrada na foto A, (B) (Quixadá/CE, 2017)

O colapso progressivo de blocos expõe as superfícies internas das fraturas afetadas por diferentes graus de alteração e, portanto, por diferentes graus de desenvolvimento de *honeycombs*. Estes nucleiam os tetos e, em menor intensidade, as paredes laterais das cavidades, com cúpulas polimorfas centimétricas e decamétricas. Sua coalescência resulta na expansão da cavidade, gerando vazios de volume superior ao da abertura frontal.

A expansão das cavidades tem os planos de descontinuidade como ponto de partida. Atuando como núcleos de resistência à alteração química, os veios condicionam a tafonização. De acordo com a Figura 6 é possível perceber que a morfologia do *tafone* é herdada pela disposição e orientação dos veios de quartzo ou diques de âplitos (rocha granítica, clara e granulação muito fina, formada por quartzo e feldspatos). Esses veios também controlam a expansão da cavidade, que é notoriamente maior onde sua concentração é mais elevada (parte direita da Figura 7B). Desse modo, inselbergs em rochas com elevado grau de anisotropia, apresentam cavidades assimétricas, formadas por uma expansão heterogênea diretamente proporcional à densidade de planos de descontinuidade.

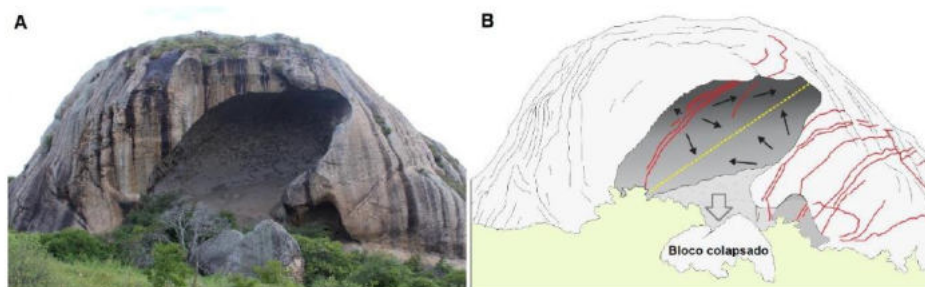


Figura 7. *Tafone* em inselberg, Araruna – PB (A); representação esquemática (B). Destaque para veios (traços vermelhos). Tracejado amarelo indica o sentido de maior desenvolvimento da cavidade. Setas pretas indicam o sentido de expansão da cavidade a partir dos veios em seu interior. (Araruna/PB, 2018)

O fraturamento multidirecional, nos casos em que os veios não são dispostos em *sets* paralelos, leva ao desprendimento e colapso de blocos. Normalmente, cavidades formadas dessa maneira, possuem nas proximidades fragmentos residuais. Esses casos são mais comuns quando as condições topográficas são favoráveis para a manutenção local do bloco colapsado.

Na Figura 8 é possível perceber que uma das faces do bloco colapsado, está nucleada por *honeycombs*, indicando dessa forma, a posição original do bloco na fase pré-colapso.



Figura 8. Cavidade de colapso em inselberg granítico. (Quixadá/CE, 2016)

Outro exemplo de *tafone* com controle estrutural pode ser visto na Pedra do Letreiro (Araruna-PB), denominação dada em virtude da existência de registros rupestres no local. Trata-se de uma cavidade de aproximadamente 70 m de abertura horizontal com cerca de 30 m de altura. No interior, veios com cerca de 50 cm de espessura formam *sets* paralelos com mergulho a 45 graus para SW (Figura 9B). Essa direção e esse mergulho coincidem com o teto da cavidade, que atualmente é nucleado por *honeycombs* em diferentes graus de desenvolvimento.

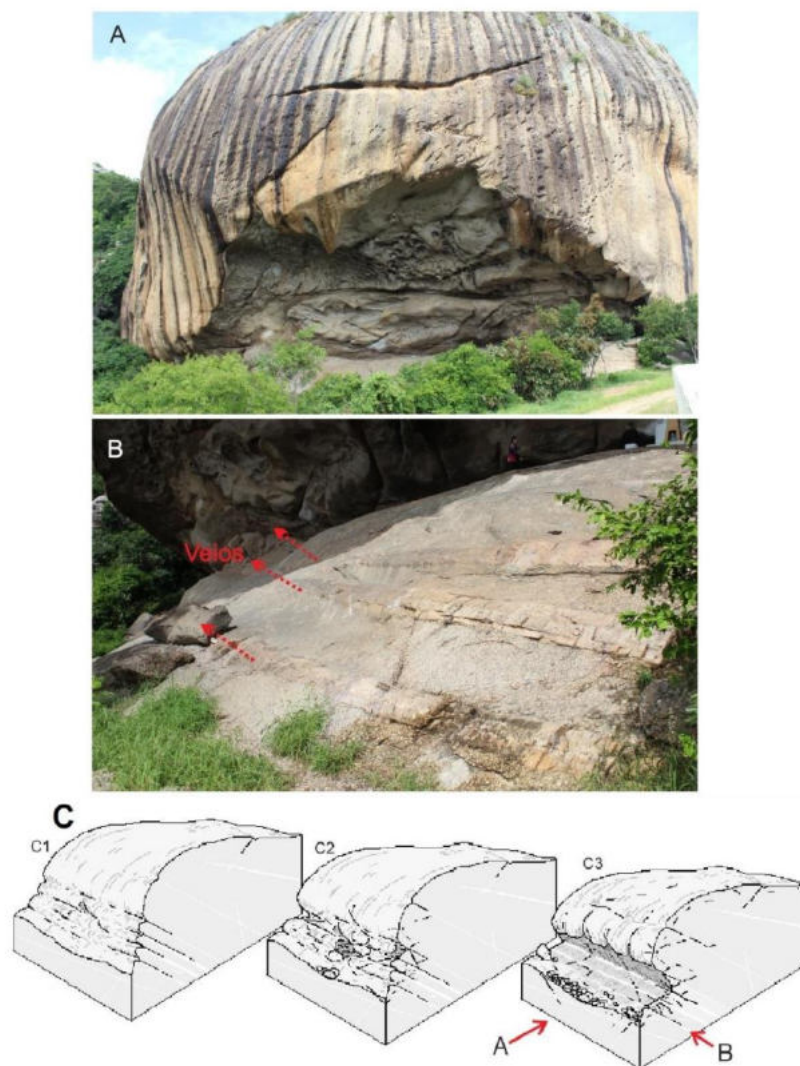


Figura 9. *Tafoni* na Pedra do Letreiro – PB: foto frontal (A); foto lateral (B), com destaque para veios de quartzo e diques de áplitos (neste caso os mais espessos e de cor rosa clara são os diques de áplitos); proposta de modelo evolutivo baseado no controle estrutural exercido por *sets* de diques paralelos (C). No bloco diagrama C3, as setas vermelhas indicam a posição das fotografias. (Araruna/PB, 2018)

Ainda na mesma área, tem-se o inselberg Pedra da Boca, referência associada ao formato do *tafone*. Trata-se de um inselberg de escarpamento descontínuo, onde a individualização é feita por um patamar subhorizontal que limita a porção inferior da superior. Na porção superior, a densidade de veios é maior, assim como a densidade de fraturas e resquícios de enclaves de rochas máficas (dioritos ricos em biotita e anfibólio). Dessa forma, as feições

de colapso assim como o próprio *tafone*, constituem a expressão geomorfológica da trama estrutural adicionada à litológica.

Foi observado que os padrões de distribuição de estruturas rúpteis geram a zonação de feições geomorfológicas indicando o seu controle estrutural. A Figura 10B demonstra que a distribuição de fraturas e veios possui direta relação com o relevo. A distinção feita entre os quadrantes B1, B2 e B3 utiliza como base a expressão geomorfológica da intensidade da deformação associada ao setor. Nesse sentido, observa-se que o setor B1 (Figura 10B), por ser o nível superior do inselberg e, portanto, com maior tempo de exposição por exumação, concentra a maior densidade de fraturas. Duas cavidades paralelas, com padrões de forma e tamanho semelhantes, mas com grau de desenvolvimento diferentes, constituem a principal feição geomorfológica do setor. Neste caso a questão litológica também favoreceu a formação do *tafone*, tendo em vista que na cavidade maior e mais aberta tem-se enclaves de dioritos no teto da boca, enquanto que na segunda não são vistos tais enclaves. A cavidade superior constitui um típico *tafone* de escarpa granítica, com piso inclinado no sentido da escarpa e teto nucleado por *honeycombs*. Trata-se de concavidades circulares densamente distribuídas na forma de nichos de intemperismo. Sua ocorrência tem-se mostrado frequente em cavidades de colapso estando irregularmente dispostos ao longo de superfícies de descontinuidades como fraturas e veios.

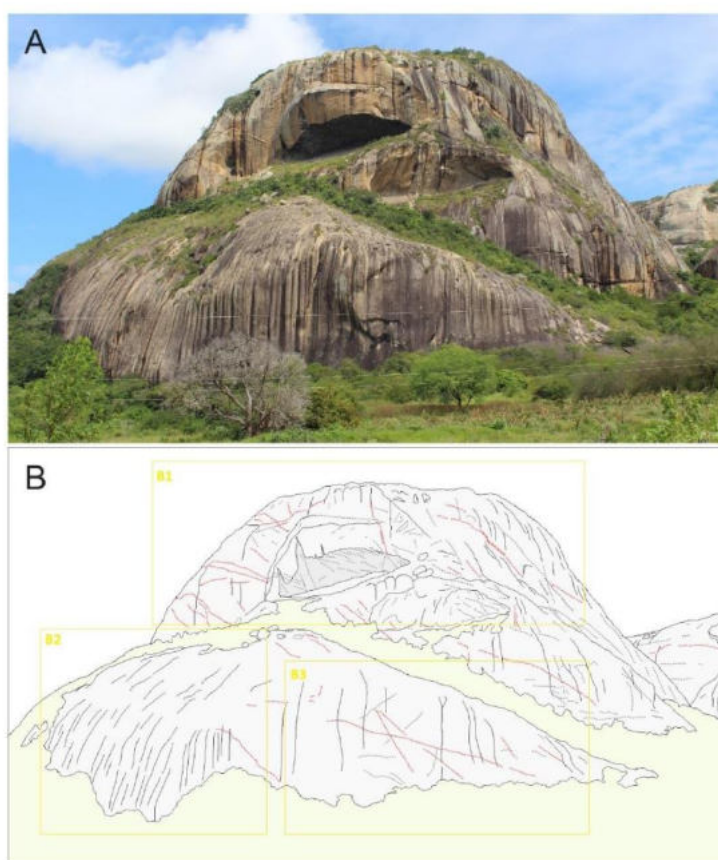


Figura 10. Inselberg com *tafoni* (Pedra da Boca) – Araruna, PB (A); representação esquemática acerca da distribuição de fraturas e veios/diques e sua relação com o relevo (B); traços pretos representam feições de dissolução; tracejado vermelho representa veios/diques; tracejado cinza representa fraturas. (Araruna, 2018)

Já o setor B2 (Figura 10B) apresenta a maior concentração de feições de dissolução do tipo *canelura/karren*. Quando se analisa o setor B3, a menor concentração de feições de dissolução pode estar associada à maior concentração de veios de quartzo sub-horizontais, que aumentam a predisposição ao fraturamento e colapso e, de modo distinto, a resistência a dissolução.

Nessa perspectiva, pode-se inferir que as superfícies rochosas com maior grau de faturamento e/ou veios são mais propícias a condicionar os processos de tafonização do que as superfícies atacadas por processos de intemperismo linear no tipo *karren*. Isso se deve ao fato de que os sistemas de faturamento e/ou veios proporcionam ambientes ideais para a ação de intemperismo cavernoso, além de viabilizarem processos de colapso responsáveis pela exposição de feições de dissolução desenvolvidas em fase pré-colapso.

Na região de Itatim, nordeste do estado da Bahia, uma série de *inselbergs* ocorrem em uma área essencialmente plana, pertencente à bacia do Rio Paraguaçu. Muitos destes *inselbergs* apresentam *tafoni* com alturas superiores a 50 m. A área se desenvolve em uma zona de transição entre duas unidades geomorfológicas e tectônicas, o Planalto de Maracá (localizado sobre o bloco crustal Jequié) e a Superfície Sertaneja, desenvolvida por sobre o bloco crustal Jequié (LIMA; CORRÊA-GOMES, 2015). Os *inselbergs* se desenvolvem em ortognaisses granulíticas, *enderbitos* e *charnockitos* do Complexo Jequié (SANTIAGO, 2010).

Os *tafoni* de Itatim ocorrem à meia altura nos *inselbergs*, raramente na base, sendo observada a ocorrência de *tafoni* superpostos, com o *tafone* superior de maiores dimensões. Isto sugere uma sequência evolutiva/cronológica relacionada à progressiva exposição dos *inselbergs*. O principal elemento estrutural responsável por essa separação sobreposta de *tafoni* parece estar associado à presença de veios ou diques.

Os *tafoni* da área se caracterizam pela presença de pisos lisos e tetos com evolução de *honeycombs*, com destaque para sua grande dimensão. Ao menos 30 *tafoni* de grandes dimensões (>20 m de largura) foram identificados, sendo quatro com largura superior a 100 m (Figura 11).



Figura 11. Exemplos de *tafoni* de grandes dimensões em Itatim, BA: *tafone* no Morro do Letreiro (A e B); *tafoni* superpostos no Morro da Toca (C); e outro exemplo de *tafoni* sobrepostos na mesma região. (Itatim/BA, 2018)

As superfícies dos inselbergs de Itatim estudados nesse trabalho apresentam juntas oblíquas descontínuas e subparalelas (Figura 12A), que são propícias à acumulação de água, gerando um microambiente favorável a alterações químicas e ação de processos intempéricos. Nessa perspectiva, com o desenvolvimento do *tafone*, o efeito de sombra da cavidade propicia maior manutenção da umidade e temperatura inferior aos setores de rochas expostas. Estas fraturas oblíquas podem ser observadas tanto nos afloramentos quanto no interior de *tafoni* de grandes dimensões, como no Morro do Letreiro (Figura 12B), marcando o limite entre o piso e o teto. Isto sugere que a iniciação do *tafone* se deu seguindo estes horizontes. A expansão do *tafoni* ocorre notadamente devido a precipitação de cristais de halita, o que causa, via haloclastia, o deslocamento de porções do teto.

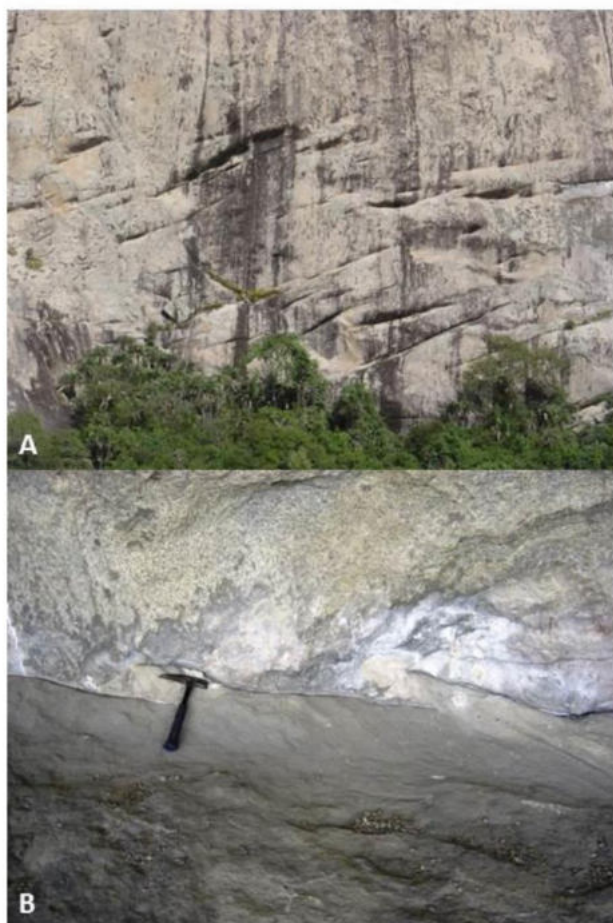


Figura 12. Fraturas oblíquas na superfície de um inselberg (A) e fraturas oblíquas descontínuas no contato entre piso e teto no *tafone* inserido no Morro do Letreiro (B) (Itatim/BA, 2018).

Na cidade do Rio de Janeiro, entre os afloramentos rochosos com ocorrência de *tafoni* destaca-se o morro do Pão de Açúcar. O morro do Pão de Açúcar é considerado marco natural e histórico do município e uma das principais feições do relevo granítico-gnáissico do Brasil, sendo amplamente reconhecido no meio internacional em virtude de sua beleza cênica. Cabe ressaltar que durante o *31st International Geological Congress*, em julho de 2000, o morro do Pão de Açúcar foi declarado como um dos principais sítios geológicos mundiais, recebendo inclusive uma placa comemorativa (SILVA; RAMOS, 2002).

Na face norte do morro do Pão de Açúcar, porção voltada para o interior da Baía de Guanabara, é possível observar uma ampla distribuição de cavidades do tipo *tafone* de dimensões variadas e que recobrem a superfície rochosa constituída por gnaisse facoidal (ortognaisse de composição granítica associada a suites magnéticas sin-colisionais) (VALERIANO et al., 2003). Os tafoni de maiores dimensões tendem a ocorrer sob a fratura (ou lasca) de descamação suspensa (*sheet structure*) (Figuras 13 e 14). A distribuição das cavidades do tipo tafone no paredão

rochoso configura uma forma semelhante a uma ave e que ao longo de tempo acabou por receber dos populares a alcunha de "Íbis do Pão de Açúcar".

Assim, a famosa Íbis do Pão de Açúcar corresponde ao total de cinco tafoni com disposição diagonal e que se encontram localizados em uma altitude de aproximadamente 160 m. Nas paredes internas dos tafoni podem ser observados diferentes tipos de desagregação, como a desagregação granular e descamação em placas (*flaking*), assim como o desenvolvimento de alvéolos isolados ou em grupos (*honeycombs* ou *estrutura em panal*), protuberâncias convexas e estruturas mamelonares.

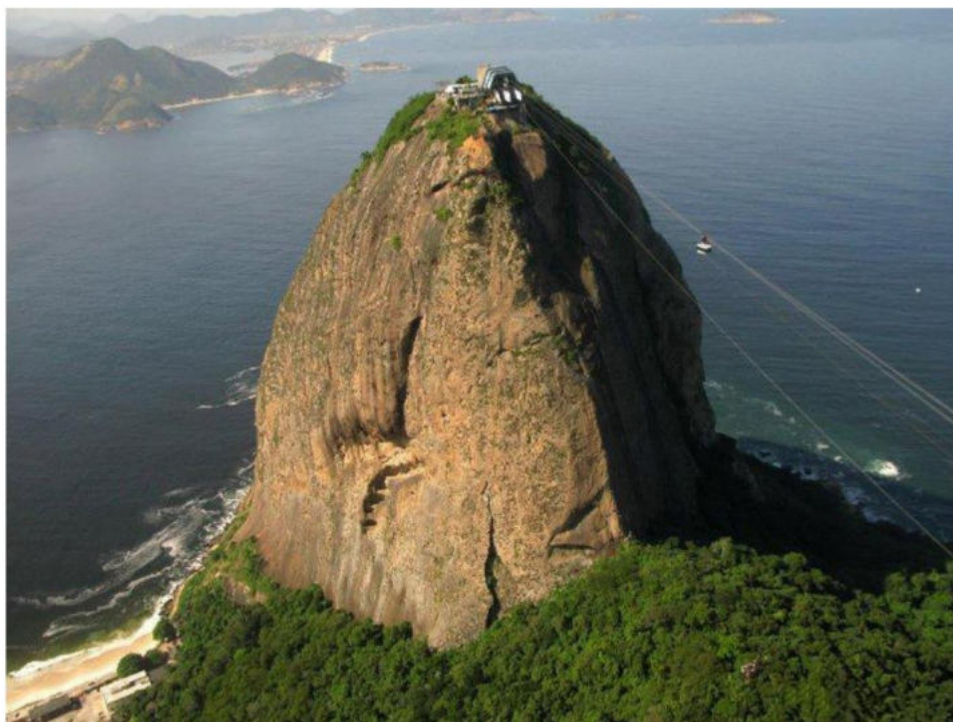


Figura 13. A Íbis do Pão de Açúcar na face norte (à esquerda) do morro do Pão de Açúcar, orientada para o interior da Baía de Guanabara. As cavidades de tipo *tafone* encontram-se dispostas em diagonal e sob a fratura de descamação suspensa (*sheet structure*). A face sul (à direita) está voltada ao Oceano Atlântico e, ao contrário da face norte, é possível observar a continuidade da fratura (ou lasca) de descamação desde o cume até a base do morro. (Foto cedida gentilmente por Thiago Haussig - Rio de Janeiro/RJ, 2015)

A distribuição espacial e a morfologia das cavidades do tipo *tafone* no morro do Pão de Açúcar sugerem um vínculo com as estruturas de esfoliação (leia-se descamação) que se desenvolveram ao longo de sistemas de juntas gerados desde a etapa intrusiva, em condições confinantes, até o resfriamento da rocha e, posteriormente, associados ao alívio de pressão. O fato de estarem atualmente expostas na superfície sobre a parede vertical se deve ao desprendimento por gravidade de sucessivas placas de descamação (*sheet structure*) que recobriam o domo do Pão de Açúcar (Figura 14).

A abordagem inicial para compreender a possível origem dos *tafoni* na face norte do Pão de Açúcar baseia-se no processo de concentração de cargas em pontos específicos associado às discontinuidades da *sheet structure* (VIDAL ROMANÍ, 1984, 1989, 2008; VIDAL ROMANÍ; TWIDALE, 1999; VIDAL ROMANÍ et al., 2014a, 2014b, 2018, 2020; TWIDALE; VIDAL ROMANÍ, 2005; RODRÍGUEZ, 2011; WALDHERR et al., 2018). Nessa abordagem, a rocha seria previamente afetada por esforços tensionais, resultando nos chamados espaços lacunares, no caso, em zonas deformadas internamente, semelhantes a bulbos de tensões. Os espaços lacunares também corresponderiam a pontos pré-estabelecidos ou áreas preferenciais ao intemperismo físico-químico, estabelecendo ocasionalmente "bolsões areno-argilosos" confinados, onde o contato solo-rocha permaneceria entre o domo e a fratura de descamação em distintas altitudes.

Os denominados "bolsões" tenderiam a ser continuamente umedecidos através da percolação de águas pluviais entre o sistema de fraturas, criando condições ideais para atuação de processos associados à corrosão química e, conseqüentemente, o reafeiçoamento das formas de relevo sobre os espaços lacunares. Ao expor estas partes débeis do domo, decorrente do desprendimento da fratura de descamação, as zonas previamente afetadas (espaços lacunares) começariam a evoluir através da desagregação granular e/ou em placas, junto a remoção do material sedimentar, e a desenvolver as cavidades do tipo tafone.



Figura 14. Parede vertical (metade inferior da foto) e a base da fratura de descamação suspensa (metade superior) com a ocorrência de *tafoni* associados a um sistema de discontinuidades na face norte do morro Pão de Açúcar: registro de estruturas associadas de aglomeração de alvéolos (*honeycombs*) (A-B); ocorrência de alvéolos (pequenas cavidades isoladas, semelhantes àquelas ilustradas na Figura 4A, devido a presença de veio/dique ou arcadas lenticulares (cavidades em sequência) em planos de fratura com disposição subvertical e vertical (C-D); ocorrência de *honeycombs* sobre uma concavidade na parte inferior da fratura de descamação suspensa (E-F); disposição de veios de pegmatites (G-H). Os escorrimentos de água provenientes da parte superior do morro permitiram a colonização, provavelmente por líquens da parede rochosa protegida de precipitação. A direita do C e abaixo do E foi possível

observar em cor cinza-claro os depósitos de opala biogênica formados no interior das fissuras entre as *sheet structures*.
(Rio de Janeiro/RJ, 2018)

4. Discussão

De maneira geral, a gênese das cavidades em granitos pode ser associada aos seguintes fatores: variação da temperatura (termoclastia); variação da temperatura dentro e fora do *tafone*; fatores termo-mecânicos (presença de irregularidades na superfície rochosa); congelamento e descongelamento (crioclastia); influências salinas (haloclastia); influência do sombreamento; ação eólica; abrasão marinha; presença de superfícies endurecidas nas rochas; umidade; e ação biológica (RODRÍGUEZ, 2011) e ascensão de fluidos hipogênicos (KLIMCHOUCK, 2017). Nesse trabalho, sugere-se que o início do processo evolutivo de *tafoni* ocorre a partir de irregularidades estruturais nas paredes dos afloramentos graníticos constituindo áreas de fraqueza.

As áreas de fraqueza das rochas constituem setores que podem proporcionar o início da evolução dos *tafoni*. Esses setores, relacionados a microfraturas, podem estar associadas a rachaduras entre os grãos formados na solidificação, rachaduras induzidas por estresse, fissuras radiais concentradas sobre grãos de diferentes propriedades volumétricas, trincas produzidas por solução de fluido magmático, ataque químico, fissuras induzidas por choques térmicos e trincas de clivagem (SMITH, 2009).

Planos de fratura, falhas e foliação criam superfícies de descontinuidade que podem vir a ser foco de alteração físico-química. *Tafoni* em meios anisotrópicos desenvolvem-se, sobretudo sobre controle estrutural, onde planos de fratura e falhas condicionam a expansão da dissolução. Também é comum encontrar cavidades de colapso, sobretudo em escarpas graníticas onde a fácies sejam ricas em quartzo com presença de veios. Tal contexto gera baixa plasticidade favorecendo assim o fraturamento e colapso de blocos. Nesses casos, associados à cavidade, têm-se depósitos de tálus na base dos escarpamentos.

Essas cavidades, segundo Hejl (2005), possuem uma ampla gama de condições que podem controlar a sua formação e desenvolvimento. Assim, os mecanismos de controle da formação dos *tafoni* podem ser agrupados em quatro categorias; 1: Propriedades mineralógicas e estruturais das rochas hospedeiras. 2: Elementos topográficos independentes da formação do *tafoni*, incluindo as características da encosta e do relevo pré-existent, como inselbergs ou blocos exumados. 3: As condições gerais do clima e da localização. 4: As condições microclimáticas criadas pelo e no próprio *tafone*.

No contexto analisado, como no caso de Quixadá, deve-se ressaltar o papel desempenhado pela variação mineralógica no processo de meteorização, tendo em vista que a solubilidade de determinados minerais pode favorecer o intemperismo químico (biotita) ou limitar sua ação (quartzo).

Nesse trabalho, fora observado que as cavidades em granito, situam-se preferencialmente em zonas afetadas por deformação rúptil. Essas deformações podem ser representadas por planos de fraturas e/ou falhas resultantes da foliação ígnea, de planos de descontinuidade representados por veios e/ou diques, por fraturamento de descompressão e por *sets* de juntas. Os contrastes de composição ou densidade de fraturas são suficientes para iniciar diferenças nos padrões de intemperismo (TWIDALE; VIDAL-ROMANÍ, 1994). Considerando-se a baixa porosidade de rochas graníticas frescas, as fraturas exercem um papel claro no controle do intemperismo, uma vez que a permeabilidade e a porosidade da rocha aumentam exponencialmente por meio das conexões entre as diáclases (VIDAL-ROMANÍ; YEPES TERMEÑO, 2004).

A esse respeito, Bigarella et al. (1994) concorda que as cavidades resultantes do intemperismo, encontrados em granitos, localizam-se ao longo de diáclases sub-horizontais e em locais de menor de resistência aos processos físicos-químicos de alteração, incluindo o intemperismo salino.

Contatos litológicos, planos de fraturas bem como, planos de esfoliação, são locais ideais para o início da tafonização. Isso ocorre por que não só as soluções ricas em sais podem penetrar na rocha, mas também porque a umidade rica em sais pode penetrar ainda mais e ficar retida por mais tempo no interior desses planos de fraqueza. Isto parece ocasionar, a partir da lenta evaporação, a nucleação de cristais ainda maiores, o que acelera o intemperismo. Aumento do teor de umidade carregado de sais provoca a deliquescência dos cristais anteriormente formados e, posteriormente, cristais ainda maiores e puros são formados causando a desagregação mais rápida da rocha (SILVA et al., 2013).

Existem ainda pesquisas que associam a formação de cavidades e concavidades à corrosão química em condições epigênicas. Nesse caso, as cavidades poderiam resultar do avanço irregular da frente de alteração e do

acúmulo de umidade do manto de intemperismo sobre as zonas de debilidade de embasamento cristalino (TWIDALE et al., 2002, ROQUÉ et al., 2013). Essa perspectiva de análise corrobora com uma interpretação morfogênica da teoria da *etchplanação* (BÜDEL, 1982), que concebe a existência de profundos mantos de intemperismo pretéritos associados a condições paleoclimáticas mais úmidas.

Nessa perspectiva, a principal causa da formação de *tafoni* é o desgaste químico da caolinização, onde a alteração de feldspatos alcalinos para formar um agregado de grão fino do mineral caulinita, resulta do trabalho que a água da chuva ácida é capaz de realizar em rochas graníticas (ALLABY, 2013). Esse processo tende a ser mais intenso nas zonas de maior deformação rúptil e, portanto, maior porosidade secundária.

Nos terrenos graníticos, a coincidência de uma rocha com características geotécnicas muito especiais (isotropia, baixa porosidade, reduzida permeabilidade ao sistema de descontinuidades, baixa solubilidade, etc.) significa que as formas resultantes dos processos de intemperismo-denudação devam ser muito semelhantes em ambientes climáticos muito diferentes (VIDAL-ROMANÍ; YEPES TERMINO, 2004). Dessa forma é fundamental a influência lito-estrutural no início da formação dos *tafoni*, mesmo que sua evolução possa ocorrer de maneira diferenciada em condições climáticas distintas.

Apesar da indicação das variáveis estruturais apresentadas ao longo do trabalho como fatores de grande relevância no desenvolvimento dos *tafoni*, a ocorrência das cavidades mais expressivas no contexto brasileiro se localiza sob condições de clima semiárido na região Nordeste. No Brasil os *tafoni* em afloramentos sob condições de clima tropical úmido são insipientes se comparados aos do semiárido.

A origem dos *tafoni* tem sido associada a diferentes processos tais como erosão eólica, ciclos de umedecimento, haloclastia, termoclastia, crioclastia, dissolução de cimentos carbonatados e intemperismo epigênico (UÑA ÁLVAREZ, 2012). Em termos globais, *tafoni* têm uma distribuição muito ampla sendo relatados em todas as zonas morfoclimáticas do globo, porém, são mais comuns e melhor desenvolvidos em ambientes áridos e semiáridos (MIGÓN, 2006; TWIDALE; VIDAL ROMANÍ, 2005), onde quer que a haloclastia prevaleça (VIDAL ROMANÍ; TWIDALE, 2010). Os ambientes permanentemente úmidos parecem não favorecer o desenvolvimento do *tafoni*.

Levando-se em consideração que o desenvolvimento dos *tafoni* demanda uma escala temporal, de intervalos ainda desconhecidos, pode-se afirmar que os maiores *tafoni* são mais antigos (RODRÍGUEZ, 2011). Nessa perspectiva, considera-se que os *tafoni* do Nordeste brasileiro são muito mais antigos do que aqueles que se desenvolvem nos climas úmidos da região Sudeste. Cabe destacar que o desenvolvimento morfogênico aqui sugerido refere-se aos *tafoni*, e não à evolução dos inselbergs ou domos rochosos onde os respectivos *tafoni* estão inseridos.

Em termos altimétricos a tafonização parece decrescer com elevadas altitudes. Porém, já foram encontrados *tafoni* desde o nível do mar até cotas de 2.200m (RODRÍGUEZ, 2011). No entanto, discussões relacionadas à influência da altitude no desenvolvimento de *tafoni* não cabe na presente abordagem tendo em vista que os recortes espaciais analisados se localizam em superfícies baixas cujas cotas altimétricas não ultrapassam os 500 m.

5. Conclusões

A formação de cavidades em escarpas graníticas, quando associada a um controle estrutural por fraturamento e/ou falha, pode ser compreendida como resultado de um conjunto de variáveis onde o intemperismo ao longo de fraturas resultantes da descompressão, *sets* de juntas, fraturamento ao longo de veios e de planos de foliação, constituem os principais fatores de nucleação de nichos de intemperismo que possam vir abrigar uma cavidade.

Em escarpas graníticas situadas nos estados do Ceará, Paraíba, Bahia e no Pão de Açúcar, no Rio de Janeiro, foi observado que a formação de cavidades depende da conjunção de fatores como grau de anisotropia da rocha, presença de enclaves, veios e diques, diferentes graus de fraturamento, texturas e composição da rocha hospedeira. Cada uma destas variáveis pode atuar no sentido de nuclear pontos de partida para a tafonização.

Mesmo em contextos hidroclimáticos distintos, as informações aqui apresentadas indicam importantes elementos estruturais como pontos de partida para a evolução de *tafoni*, tais como veios, diaclases, foliações e diques, cuja origem se deve, sobretudo, a deformações rúpteis e dúcteis do estágio pré-exumação. Nas superfícies rochosas expostas, estes fatores representam áreas de resistência diferenciada permitindo o desenvolvimento de pequenas cavidades e consequentemente, o acúmulo de umidade.

Os *tafoni* têm sido designados como morfologias azonais tendo em vista que a sua ocorrência se dá em diferentes domínios morfoclimáticos da Terra. No entanto, no contexto brasileiro, o desenvolvimento dessas

cavidades tem sido muito mais expressivo no semiárido do que nas áreas de climas úmidos. Dessa forma, cada contexto deve ser analisado de forma individualizada, tanto do ponto de vista estrutural como climático.

No Nordeste brasileiro, as cavidades de colapso, resultantes da propagação de fraturas em meio anisotrópico podem ser observadas amplamente em áreas com ocorrências de inselbergs, desde que possuam *sets* de veios paralelos ou com tendência multidirecional. Nesse caso, observa-se que o fraturamento seguido de colapso expõem os planos de fratura antes da implantação do nicho de intemperismo. A principal variável de controle das características dimensionais e morfológicas é relacionada ao volume de rocha disponíveis que poderia ser desintegrada dentro da unidade de acolhimento, que é limitada por um sistema de descontinuidade. Esse controle sobre o tamanho e a forma resulta da densidade de distribuição de superfícies de descontinuidade. Em meio isotrópico, os *tafoni* expandem-se como cúpulas elipsoidais orientadas segundo o plano de descontinuidade. Em meios anisotrópicos, apresentam padrão assimétrico associado principalmente à densidade de distribuição de fraturas e veios.

No Rio de Janeiro, em razão da atual localização dos *tafoni*, acima dos 160 m de altitude sobre a base do domo, a explicação das cavidades por meio do controle estrutural se torna mais viável que o modelo de meteorização restrito ao contato solo-rocha. Bastaria a exumação do domo pelo desprendimento das placas de fraturas de descamação (*sheet structure*) para que fosse iniciada sobre essas zonas a atuação do processo de desagregação mecânica nos pontos afetados pela concentração de cargas e, possivelmente, alterados pela atuação local de processos associados a corrosão química, resultando assim na exposição das cavidades do tipo *tafoni*.

Contribuições dos Autores: Rubson Pinheiro Maia foi responsável pela concepção inicial do artigo, organizando a sua estruturação, participando dos trabalhos de campo e da elaboração do manuscrito, contribuindo com os resultados, discussões e revisões. Frederico de Holanda Bastos participou dos levantamentos de campo e participou da elaboração do manuscrito, contribuindo com os resultados, discussões e revisões. Felipe Rodrigues Waldherr participou da elaboração do manuscrito com ênfase nas ocorrências de *tafoni* do Rio de Janeiro (Pão de Açúcar). Marcos Antônio Leite do Nascimento contribuiu com a revisão do manuscrito. Augusto Sarreiro Auler participou da elaboração do manuscrito com ênfase nas ocorrências de *tafoni* da Bahia (Itatim).

Financiamento: Esta pesquisa recebeu financiamento parcial através do Projeto intitulado "Caracterização Geomorfológica dos principais campos de inselbergs do Nordeste setentrional brasileiro", aprovado no Edital MCPI/CNPq (Chamada Universal 2016).

Agradecimentos: Os autores agradecem ao CNPq (Centro Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo financiamento parcial desta pesquisa.

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

Referências

1. ALLABY, M. A **dictionary of geology and earth sciences**. 4th revised ed. New York: Oxford University Press. Inc. 2013. 672 p.
2. ALMEIDA, F. F. M., HASUI, Y., BRITO NEVES, B. B., FUCK, R. Províncias estruturais brasileiras. In: VIII Simpósio de Geologia do Nordeste. **Anais...** Campina Grande: SBG. p. 363. 1977.
3. BIGARELLA, J. J. BECKER, R. D., SANTOS, G. F. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Volume 1. Florianópolis: Editora UFSC, 1994. 425 p.
4. BÜDEL, J. **Climatic geomorphologie**. Tradução de L. Fischer e D. Busche. New Jersey: Princeton University Press, 1982. 444p.
5. GOUDIE, A. S. (ed) **Encyclopedia of geomorphology**. Volume 1. London and New York: Routledge, 2003. 578 p.
6. GOUDIE, A. S.; VILES, H. A. *Tafoni, alveoles, honeycombs, and overhangs, in salt weathering hazards*. New York: Wiley, 1997. 256 p.
7. GROOM, K. M.; ALLEN, C. D.; MOL, L.; PARADISE, T. R.; HALL, K. Defining tafoni: Re-examining terminological ambiguity for cavernous rock decay phenomena. **Progress in Physical Geography**, v. 39, n. 6. 2015. p. 1-19.
8. HEJL, E., A pictorial study of tafoni development from the 2nd millennium BC. **Geomorphology**, v. 64, p. 87-95, 2005.
9. INKPEN, R. HALLB, K. Using morphospaces to understand tafoni development. **Geomorphology**. Volume 261, Pages 193-199, 2016.

10. KLIMCHOUK, A. Tafoni and honeycomb structures as indicators of ascending fluid flow and hypogene karstification in: **Advances in Karst Research: Theory, Fieldwork and Applications**. Geological Society, London, Special Publications, 2017. 486p.
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. (org.) **Landscapes and landforms of Brazil**. Springer, Dordrecht: p 371-380. 2015.
12. 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. 16, p. 239, 2015.
13. MIGON, P.; MAIA, R. Pedra da Boca, Pai Mateus, and Quixadá – Three Possible Key Geoheritage Sites in Northeast Brazil. **Geoheritage**, 12(3), 2020.
14. MIGON, P. **Geomorphological landscapes of the world: granite landscapes of the world**. Oxford University Press Inc., New York. 2006. 375p.
15. MUSTOE, G. E. The origin of honeycomb weathering. **Geological Society of America Bulletin**, v. 93. 1982. p. 108-115.
16. RODRIGUEZ, J. A. M. **Génesis de cavidades graníticas en ambientes endógenos y exógenos**. Tese (Doutorado em Geologia). Instituto Universitario de Geología Isidro Parga Pondal, Universidad de Coruña, La Coruña, 2011. 396p.
17. ROQUÉ, C.; ZARROCA, M.; LINARES, R. Subsurface initiation of tafoni in granite terrains - Geophysical evidence from NE Spain: Geomorphological implications. **Geomorphology**, n. 196, p. 94-105, 2013.
18. SANTIAGO, J. S. Estruturas e tectónica da zona de transição entre os blocos Jequié e Itabuna-Salvador-Curaçá, região de Itatim, Bahia, Brasil. Monografia (Graduação em Geologia). Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia. 2010. 82p.
19. SILVA, L. C.; RAMOS, A. J. L. A. Pão de Açúcar, RJ Cartão Postal Geológico do Brasil. In SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D. A.; QUEIROZ, E. T.; WINGE, M.; BERBERT-BORN, N. (org.) **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. Brasília, DNPM, p: 263-268. 2002.
20. SILVA, M. A. M.; NETO, J. A. B.; SILVA, A. L. C.; SMITH, B.; MCALISTER, J.; WARKE, P.; CURRAN, J. Intemperismo decorrente da acumulação de sal e formação de alvéolos e tafoni nos afloramentos das praias de Niterói (Rio de Janeiro, Brasil). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 14, n. 2, p. 189-195, 2013.
21. SMITH, B. J. Weathering Processes and Forms in A.J. Parsons, A.D. Abrahams (eds.). **Geomorphology of Desert Environments**. 2nd ed., DOI 10.1007/978-1-4020-5719-9 4, Springer Science Business Media B.V. p. 69-100. 2009.
22. TWIDALE, C. R.; VIDAL-ROMANÍ, J. R. On the multistage development of etch forms. **Geomorphology**, n. 11, p. 107-124, 1994.
23. TWIDALE, C. R.; VIDAL-ROMANÍ, J. R. **Landforms and Geology of Granite Terrains**. Boca Raton, USA: CRC Press Inc., 2005. 354p.
24. TWIDALE, C. R.; BOURNE, J. A.; VIDAL-ROMANÍ, J. R. Multistage landform development in various settings and at various scales. **Cadernos do Laboratório Xeolóxico de Laxe**, n. 27, p. 55-76, 2002.
25. UÑA ÁLVAREZ, E. Interpretación de sistemas naturales complejos: el problema de los tafoni. **Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles** Nº 60, p. 349-368, 2012.
26. VALERIANO, C. M.; ALMEIDA, J. C. H.; HEILBRON, M. Precambrian gneisses in Rio de Janeiro: from the Sugar Loaf to the Arpoador outcrops. In CHAVES, H.; CAMOZZATO, E.; LOGUERCIOS, S.; CAMPOS, D.A. (org.) **Field Trips of the 31st International Geological Congress**. Rio de Janeiro, SBG/CPRM. 2003
27. VIDAL ROMANÍ, J. R. Microformas graníticas tipo tafoni (cachola) y gnamma (pía). Un micromodelado sin relación con el clima o la estacionalidad. **Cadernos do Laboratório Xeolóxico de Laxe**, n. 7, p. 273-277, 1984.
28. VIDAL ROMANÍ, J. R. Geomorfología granítica en Galicia (NW España). **Cadernos do Laboratório Xeolóxico de Laxe**, n. 13, p. 89-163, 1989.
29. VIDAL-ROMANÍ, J. R. Tipos de fabric plana y su relación con la generación de formas graníticas. **Cadernos do Laboratório Xeolóxico de Laxe**, n. 16, p. 301-312, 1991.
30. VIDAL ROMANÍ, J. R. Forms and structural fabric in granite rocks. **Cadernos do Laboratório Xeolóxico de Laxe**, n. 33, p. 175-198, 2008.
31. VIDAL ROMANÍ, J. R.; TWIDALE C. R. Sheet fractures, other stress forms and some engineering implications. **Geomorphology**, n. 31, v. 1-4, p. 13-27, 1999.
32. 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**, n. 35, p. 189-208, 2010.

33. VIDAL-ROMANÍ, J. R.; UÑA ALVAREZ, E.; VAQUEIRO RODRÍGUEZ, M. An endogenous origin for the form tafone developed in magmatic rocks. In: Reunión Nacional de Geomorfología, 8., 2014a, Cáceres. **Anais...** Cáceres: Relieves Graníticos y Cársticos. p. 486-489. 2014a.
34. VIDAL ROMANÍ, J. R.; VAQUEIRO RODRÍGUEZ, M.; SANJURJO, J. Granite landforms in Galicia. In GUTIÉRREZ, F.; GUTIÉRREZ, M. (org.) **Landscapes and landforms of Spain**. Springer, New York: p. 63-69. 2014b. 365p.
35. VIDAL ROMANÍ, J. R.; VAQUEIRO RODRIGUEZ, M.; VÁZQUEZ, R. Ría de Aldán. **Colección Geología**, n. 18. 2018. p. 1-32.
36. VIDAL ROMANÍ, J. R.; SONG, Z.; LIU, H.; SUN, Y.; LI, H.. Orogenic Movements during the Paleozoic Period: Development of the Granitoid Formations in the Northwestern Region of Spain's Iberian Peninsula. **Journal of Earth Science**, n. 31, p. 611-620, 2020.
37. VIDAL-ROMANÍ, J. R.; YEPES TERMIÑO, J. Historia de la morfogénesis granítica. **Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe**, n. 29, p. 331-360, 2004.
38. WALDHERR, F. R.; VIDAL-ROMANÍ, J. R.; RODRIGUES, S. W. O. Consideraciones previas sobre las formas del tipo tafone y otras estructuras menores en la vertiente norte del Pão de Açúcar, Rio de Janeiro - Brasil. **Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe**, n. 40, p. 139-158, 2018.



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 distribuíam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuíam o devido crédito pela criação original.

ANEXO H - Paleobiogeography of meso-megamammals from South America and the potential historically stable intertropical areas during the Late Quaternary.

DANTAS, M.A.T.; ASEVEDO, L.S.; PANSANI, T.R.; FRANÇA, L.M.; ARAGÃO, W.S.; SANTOS, F.S.; FERNANDES, E.C.; WALDHERR, F.R.; XIMENES, C.L. Paleobiogeography of meso-megamammals from South America and the potential historically stable intertropical areas during the Late Quaternary. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA, 27., 2022, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: SBP, 2022. v. 37, p. 111.

PALEOBIOGEOGRAPHY OF MESO-MEGAMAMMALS FROM SOUTH AMERICA AND THE POTENTIAL HISTORICALLY STABLE INTERTROPICAL AREAS DURING THE LATE QUATERNARY

MÁRIO ANDRÉ TRINDADE DANTAS¹, LIDIANE DE ASEVEDO SILVA², THAIS RABITO PANSANI³, LUCAS DE MELO FRANÇA², WILCILENE SANTOS DE ARAGÃO⁴, FRANCIELY DA SILVA SANTOS⁵, ELISA CRAVO FERNANDES⁵, FELIPE RODRIGUES WALDHERR⁶, CELSO XIMENES⁶

¹Laboratório de Ecologia e Geociências, Universidade Federal da Bahia (IMS/CAT), Vitória da Conquista, BA, Brasil; ²Programa de Pós-graduação em Ecologia e Conservação, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, Brasil; ³Programa de Pós-graduação em Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil; ⁴Laboratório de Paleontologia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, Brasil; ⁵Programa de Pós-graduação em Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil; ⁶Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brazil. matdantas@yahoo.com.br, lidi.asevedo@gmail.com, thais-pansani@hotmail.com, lucasmfrauca@hotmail.com, felipewald@gmail.com, wilcilenearagao@gmail.com, franciely.ufs@gmail.com, elisa_cravo@yahoo.com.br, cliximenes@gmail.com

The present study aimed to investigate the potential distribution and Historically Stable Intertropical Areas (HSIA) for the South American megafauna during the late Quaternary. We generated maps, using Paleo-Species Distribution Models (PSDM's), for 17 megafaunal taxa (14 herbivores and three carnivores) during three paleoclimate periods in the late Quaternary: 120 ka, 21 ka, and 6 ka. The PSDM's were produced using only the MaxEnt algorithm. Climate reconstructions were acquired from the database of the WorldClim project images, where we choose seven specific variables regarding temperature and precipitation data. Considering the consensus map based on the biogeographical range of meso-megamammals, as well the climatic conditions which prevailed during the late Quaternary. Our results suggest three HSIA in South America during the late Quaternary: (i) North Intertropical Region (NIR), which includes basin areas of the Maracaibo lake and Gulf of Venezuela (nowadays a region composed by xerophytic plants and woodlands), and the eastern part of the Cuenca del Mar (dominated by dry deciduous forest). (ii) West Intertropical Region (WIR), which should comprise the fluvial plains of the Pacific coast of Ecuador (rivers basins of Esmeraldas, Guayas and Jubones), nowadays dominated by dry and deciduous forests; the river basins of Chira and Piura-Cascajal in Peru, a region dominated by dry forests; and a small part of the western Amazon forest, in the basin of the river Marañón. Lastly, the largest predicted historically stable area, the (iii) Brazilian Intertropical Region (BIR), comprises parts of the eastern of Parnaíba basin, the northeastern of São Francisco basin, the Atlantic Oriental Northeastern and East Atlantic basins, and the northeastern of the Southeastern Atlantic basin. This whole area is currently dominated by a type of seasonally dry forest phytogeographic domain known as Caatinga. We highlight that all the proposed HSIA are superimposed with Seasonal Dry Forests hotspots propositions (between 21 ka and present). Also, they do not reach a specific region in the northeastern Atlantic coast of Brazil (between the Rio Grande do Norte to Espírito Santo states), which is a predicted area for the currently Atlantic Forests. [#PQ/CNPq 311003/2019-2; *CAPES 88882.443670/2019-01; **CAPES 88887.569989/2020-00].

THE PATH OF HYPERCARNIVOROUS SPARASSODONTS: A TAXONOMIC REVIEW OF CF. *NEMOLESTES* (METATHERIA, SPARASSODONTA) FROM THE ITABORAÍ FAUNA

CAIO CÉSAR RANGEL¹, LEONARDO MELO CARNEIRO², ÉDISON VICENTE OLIVEIRA², LILLIAN PAGLARELLI BERGQVIST³

¹Laboratório de Paleontologia Estratigráfica, Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia - Campus Monte Carmelo, MG; ²Laboratório de Paleontologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE; ³Laboratório de Macrofósseis, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. caiorangel@hotmail.com, leonardo.carneiro8@gmail.com, edison.vicente@ufpe.br, bergqvist@geologia.ufrrj.br

Sparassodonts were South American mammalian predators that lived during Cenozoic. Amongst their Paleogene occurrences, the Itaboraí Basin (lower Eocene) includes two of the oldest records assigned to this group: *Patene simpsoni* and cf. *Nemolestes*, which is based on a single specimen (MN 1344-V). *Nemolestes* is also known from Sarmiento Formation, Argentina (Casamayoran), and Guabirotuba Formation, Brazil (Barrancan). Herein, the specimen DGM 657-M, previously considered as 'borhyaenid indet.', is assigned to cf. *Nemolestes*. These two specimens were compared with *Nemolestes spalacotherinus* in order to support their phylogenetic affinities. A more detailed study of these specimens suggests that they represent a new genus and species, featured by a more developed paraconid on m2, like in *Moyulestes*, *Allqokirus* and *Patene*. Furthermore, this new taxon is larger bears a less developed metaconid and a much reduced talonid on m4 in comparison with *Tiupampam* taxa and *Patene*, indicating some specialization for hypercarnivory. A phylogenetic analysis recovered the new taxon in a polytomy with *Patene*, and both as the sister taxa to remaining sparassodonts, including *Nemolestes*. The m2 of cf. *Nemolestes* resembles *P. simpsoni* whereas its m4 is closer to derived sparassodonts, showing that the tendency to hypercarnivory of metatherians developed early in the Cenozoic. The recognizing of this new taxon widens the diversity of carnivore metatherians of the Itaboraí fauna and contributed to the understanding of paleoenvironmental communities of South American Paleocene/Eocene boundary. [CNPq 305281/2020-8 e FAPERJ E-26/202.1029/2018].

ANEXO I - Considerações sobre a dinâmica paleoambiental a partir da análise de depósitos de tanque no Sítio Paleontológico Jirau, município de Itapipoca (CE).

WALDHERR, F.R.; SILVA, T.M.; XIMENES, C.L.; CASTRO, H.S.; MACHADO, R.M. Considerações sobre a dinâmica paleoambiental a partir da análise de depósitos de tanque no Sítio Paleontológico Jirau, município de Itapipoca (CE). *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 19., 2022, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: UERJ, 2022.



XIX Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada

CONSIDERAÇÕES SOBRE A DINÂMICA PALEOAMBIENTAL A PARTIR DA ANÁLISE DE DEPÓSITOS DE TANQUE NO SÍTIO PALEONTOLÓGICO JIRAU, MUNICÍPIO DE ITAPIPOCA (CE)

FELIPE RODRIGUES WALDHERR ^a, TELMA MENDES DA SILVA ^b, CELSO LIRA XIMENES ^c, HENRIQUE SAMPAIO
DE CASTRO ^d, RICARDO MATOS MACHADO ^d

^a DOUTORANDO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA / IGEO-UFRJ, ^b PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
GEOGRAFIA / IGEO-UFRJ, ^c MUSEU DE PRÉ-HISTÓRIA DE ITAPIPOCA, CE, ^d UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

e-mail: felipewald@gmail.com

Direitos autorais 2022, SBGFA: No caso da seleção do presente artigo pelo Comitê Científico do evento, após revisão das informações contidas no resumo submetido pelo(s) autor(es), os mesmos autorizam a publicação, cientes de que ao se inscreverem, aceitaram a concederem essa faculdade aos organizadores do evento, em razão do caráter de atendimento à comunidade, sem fins lucrativos que o evento abrange.

RESUMO

Os depósitos de tanque constituem pequenos corpos sedimentares de idade quaternária que preenchem os tanques naturais em afloramentos rochosos, em especial, lajedos e domos, na região semiárida do Nordeste do Brasil. Esses depósitos são, na maior parte das vezes, sedimentos siliciclásticos estratificados e, eventualmente, fossilíferos, preservando restos de uma diversificada fauna que integra a megafauna pré-histórica do Pleistoceno Final - Holoceno Inicial. No presente trabalho, o depósito que preenche o interior do tanque natural fossilífero Jirau 01, no Sítio Paleontológico Jirau - município de Itapipoca (CE), corresponde ao principal alvo de investigação. A análise de amostras coletadas em campo, indica que a dinâmica deposicional encontra-se vinculada a atuação de diversos fatores que influenciaram os processos superficiais e do transporte de sedimentos em distintas escalas espaço-temporais, resultando em interpretações no que se refere ao entulhamento do tanque natural. Há evidências de distintos pulsos erosivos e deposicionais, em especial, de eventos referentes a remobilização de mantos de alteração - decorrentes do intemperismo físico-químico no entorno do sítio paleontológico - e de lascas de descamação da parede lateral do tanque que proveram parte do material sedimentar do depósito de tanque. A discussão em referência aos tanques tende a ampliar perspectivas através da obtenção de novos dados, auxiliando mesmo que em escala restrita do depósito de tanque, na compreensão da complexa reconstituição da história geológica, geomorfológica e paleontológica do Nordeste brasileiro. Deste modo, a temática associada ao preenchimento dos tanques naturais constitui um capítulo importante sobre a Geomorfologia do Quaternário, em especial do semiárido brasileiro, uma vez que tais feições de relevo, quando completamente colmatadas, tendem a preservar informações sobre a dinâmica da paisagem e de seu entorno, auxiliando na reconstituição de parte do cenário paleoambiental.

Palavras-chave: Depósitos de tanque; Tanques naturais; Paleoambientes; Geomorfologia do Quaternário; Semiárido nordestino.

Keywords: Tank deposits; Natural tanks; Paleoenvironments; Quaternary Geomorphology; Northeastern semi-arid.

Introdução

No Nordeste do Brasil, os tanques naturais têm servido ao longo do tempo como eixos preferenciais de coalescência de fluxos de sedimentos transportados a partir do escoamento superficial (WALDHERR *et al.*, 2017; 2019). Cabe ressaltar que entre o material carreado para o interior dos tanques, a maior parte das vezes constituído por sedimentos siliciclásticos, pode também ser encontrado concentrações de fragmentos ósseos, convertendo essas depressões naturais em autênticas tanatocenoses (WALDHERR *et al.*, 2019). No município de Itapipoca, na porção norte do estado do

Ceará, os tanques naturais são formas recorrentes no entorno do maciço granítico de Uruburetama (XIMENES, 2003; 2009), formando estreitas depressões preenchidas por depósitos sedimentares.

A conformação geomorfológica entre os tanques naturais e os depósitos fossilíferos constitui uma característica, até o presente momento, exclusiva (*sui generis*) do semiárido nordestino brasileiro (WALDHERR *et al.*, 2019). A ocorrência de feições semelhantes aos tanques naturais tem sido reportada em diversos continentes (TWIDALE e VIDAL-ROMANÍ, 2005). Os depósitos de tanque consistem um tipo singular de armazenamento de

depósito fossilífero de idade quaternária da América do Sul e, em especial, nos tanques em rochas do embasamento pré-cambriano no semiárido brasileiro (ARAÚJO-JÚNIOR *et al.*, 2013). Estes depósitos, estratificados e, ocasionalmente, fossilíferos, preservam restos de uma diversificada fauna, incluindo a megafauna do Pleistoceno Final - Holoceno inicial; por exemplo, *megateriídeos*, *gliptodontídeos*, *gonfoteriídeos*, *toxodontídeos*, *macrauchenídeos* e *felídeos* (XIMENES, 2003, 2009; OLIVEIRA *et al.*, 2014).

No presente trabalho, foi selecionado o tanque natural fossilífero Jirau 01, área de referência no Sítio Paleontológico Jirau, para o levantamento de dados a partir do registro estratigráfico do depósito de tanque. O preenchimento sedimentar, constituído por material siliciclástico e fossilífero, ainda se encontra resguardado no interior do tanque. Uma cacimba (poço) aberta na década de 1990 sobre o depósito de tanque expôs o perfil estratigráfico, junto as camadas assentadas sobre o embasamento granítico. A análise estratigráfica e sedimentológica do depósito de tanque tem o objetivo de compreender, de modo incipiente, a dinâmica da paisagem - no Sítio Paleontológico Jirau e entorno - responsável pelo preenchimento sedimentar do tanque natural Jirau 01.

O tanque natural Jirau 01 está localizado no município de Itapipoca (CE), porção norte do estado do Ceará. A depressão é compreendida como um tanque natural escarpado de grandes dimensões e com morfologia de fundo do tipo côncavo (Figura 1). Em relação aos aspectos dimensionais, o tanque natural possui extensão de mais de 50 metros de comprimento, dispendo de largura máxima de 5,30 metros e profundidades que superam 5 metros (WALDHERR *et al.*, 2022).



Figura 1. Imagem obtida por *drone* do tanque natural fossilífero Jirau 01, no Sítio Paleontológico Jirau - Itapipoca (CE). O registro fotográfico foi realizado no período de estiagem. Foto: Henrique Sampaio, Dez./2021.

Material e Métodos

Em dezembro de 2021, foram coletadas três amostras, controladas estratigraficamente, no interior do tanque natural Jirau 01 (Sítio Paleontológico Jirau). A descrição estratigráfica foi elaborada a partir de perfis sedimentológicos *in situ*, assim como a descrição sedimentológica. Uma vez coletado, o material sedimentar foi encaminhado para análise em laboratório. No intuito de elaborar uma investigação detalhada dos sedimentos, foi utilizado um microscópio estereoscópio com ampliação de 40x. Os termos para classes de tamanhos de grãos foram empreendidos de acordo com a classificação de Blair e McPherson (1999) e Terry e Golf (2014). Cabe ressaltar que foi elaborado um levantamento prévio sobre os estudos acadêmicos realizados no tanque natural Jirau 01 (XIMENES, 2003; 2009; ARAÚJO-JÚNIOR *et al.*, 2013). Entre as pesquisas, têm destaque as análises tafonômicas sobre a camada fossilífera do depósito de tanque, o qual viabilizou uma discussão multidisciplinar em relação as condições paleoambientais e, conseqüentemente, da dinâmica da paisagem durante o período de exposição e, posteriormente, colmatação do tanque natural Jirau 01.

Discussão de resultados

A presença de uma cacimba que foi escavada na zona central do tanque natural permitiu a visualização do perfil estratigráfico e, conseqüentemente, a análise do registro sedimentar do depósito de tanque (Figura 2). Os dados preservados no interior do tanque podem subsidiar parte da compreensão sobre a dinâmica local da paisagem durante o Quaternário.



Figura 2. Registro sedimentar da cacimba (poço) com abertura e exposição do perfil estratigráfico. Foto: Henrique Sampaio, Dez./2021.

O perfil estratigráfico configura-se como um recorte do quadro paleopaisagístico (Figura 3), sugerindo - de forma inicial - uma sequência de eventos, a saber: um período de exposição do tanque natural; o desenvolvimento de uma zona de acomodação a partir do esvaziamento do tanque (resultante de fluxos hidrodinâmicos); e, posteriormente, o seu preenchimento, de modo sucessivo, por sedimentos conglomeráticos e lamosos pleistocênicos, conformando a atual feição deposicional interna. A cacimba segue a orientação estrutural WNW-ESSE, apresenta um formato retangular, tendo profundidade máxima aproximada de 1,80 m.

Cabe destacar que a escavação do depósito de tanque foi iniciada, dentro de um contexto científico, somente na década de 2000. De acordo com Ximenes (2003), há relatos locais de desentulhamentos que foram realizados anteriormente com intuito de armazenar a água resultante das "precipitações de inverno". Assim, a camada sedimentar - que anteriormente recobria a camada fossilífera - era constituída por um material argilo-siltoso (lamoso) com matéria orgânica e foi completamente removida, expondo atualmente a camada fossilífera no topo do perfil estratigráfico.

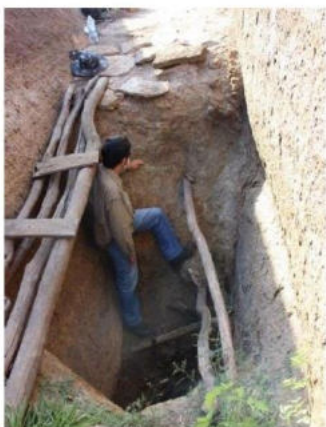


Figura 3. Exposição do registro sedimentar no interior do tanque natural Jirau 01. O contato entre as camadas siltico-argiloso e a fossilífera é indicado pelo Prof. Celso Ximenes. Foto: Felipe Waldherr, Dez./2021.

Em trabalho de campo foram reconhecidas três camadas assentadas no interior do tanque natural. As camadas sedimentares que constituem o depósito de tanque são interpretadas da seguinte maneira (Figura 4): conglomerados sustentados pelos clastos (porção basal); material siltico-argiloso / lamoso maciço (depósito colúvio-aluvial); e camada fossilífera.

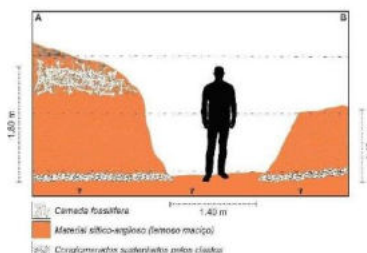


Figura 4. Desenho esquemático da seção transversal à cacimba escavada no tanque Jirau 01. Há a presença da camada fossilífera à esquerda da seção (A), enquanto que em B, a camada foi removida por completo.

A camada basal sobre o embasamento granítico é constituída por conglomerados polimíticos suportados pelos clastos em matriz argilosa de tonalidade esverdeada a cinza, principalmente no contato com o material saprolítico do embasamento cristalino. Há presença de seixos e calhaus finos arredondados com diâmetros que variam de 2 a 8 cm, compostos predominantemente por quartzos leitosos (Figura 5). A camada possui uma espessura de aproximadamente 10 cm. O elevado grau de arredondamento tende a indicar a atuação do transporte longo e a ocorrência de *flash floods* na localidade, seguindo os principais eixos de drenagem até alcançar as proximidades do Sítio Paleontológico Jirau. Uma vez disponível no entorno, os clastos arredondados foram então remobilizados e depositados no interior do tanque natural.



Figura 5. Conglomerados suportados pelos clastos reconhecida na base do depósito de tanque. Foto: Felipe Waldherr, Dez./2021.

A camada sobreposta é caracterizada por um espesso material inconsolidado de 1,30 m, constituído por um sedimento lamoso maciço com grãos de quartzo tamanho areia muito grossa, subangulosos a angulosos, pobremente selecionados, dispersos na matriz pelítica. O material siltico-argiloso possui coloração laranja a vermelho alaranjado, sendo verificado de modo eventual a presença de grânulos e seixos, e, em menor

FELIPE R. WALDHERR, TELMA M. DA SILVA, CELSO L. XIMENES, HENRIQUE S. DE CASTRO, RICARDO M. MACHADO

porcentagem, minerais micáceos (Figura 6). As características indicam que o material síltico-argiloso pode ser associado a depósitos do tipo colúvio-aluvial.



Figura 6. Contato entre a camada intermediária síltico-argilosa a esquerda e a rocha alterada a direita. Foto: Felipe Waldherr, Dez./2021.

E, por fim, a camada superior, fossilífera, constituída por fragmentos fósseis provenientes da megafauna pré-histórica que habitou a região durante o Pleistoceno-final e Holoceno Inicial (Figura 7). A camada fossilífera possui 40 cm de espessura. Cabe ressaltar que os fragmentos ósseos foram encontrados envolvidos por uma matriz argilosa com presença de clastos e grãos de quartzo pobremente selecionados; sendo erosivo o contato entre essa camada e a inferior. O tipo de material sedimentar e o aspecto de deposição do conjunto fóssil, junto a análise tafonômica (ARAÚJO-JÚNIOR *et al.*, 2013;), evidencia o transporte rápido e de elevada energia associado ao papel das enxurradas ou *flash floods* a partir do escoamento superficial concentrado (chuvas torrenciais).



Figura 7. Camada fossilífera na porção superior do depósito de tanque no Jirau 01. Foto: Felipe Waldherr, Dez./2021.

A escavação da cacimba também expôs um aspecto interessante evidenciado no contato entre o depósito e o conjunto de lascas de descamação (*sheet structure*), em estado saprolítico, que delimita o material sedimentar. As lascas de descamação constituem estruturas rúpteis do embasamento granítico e que no interior do tanque permanecem verticalizadas (Figura 8). Na parede lateral, ainda há resquícios de lascas que desprenderam e

contribuíram para o próprio preenchimento do depósito de tanque.



Figura 8. Presença de lascas de descamação verticalizadas em estado saprolítico, posicionadas de modo paralelo, que delimita o registro sedimentar no interior do tanque natural. A escala está posicionada no contato da parede lateral, conformada rocha granítica (Granito Penedos), e as lascas de descamação saprolitizadas. Foto: Felipe Waldherr, Dez./2021.

A análise do perfil estratigráfico, junto a descrição sedimentológica, do depósito de tanque indica uma série de eventos em relação a dinâmica paleoambiental durante o Quaternário. O primeiro ponto a levar em consideração é a conversão do tanque natural em um eixo preferencial para coalescência de fluxos do escoamento superficial e, conseqüentemente, do aporte de sedimentos. Outra observação reside na ocorrência do pacote sedimentar alóctone (depósito de tanque) no interior do tanque natural que sugere a formação prévia de um espaço de acomodação. O espaço de acomodação é decorrente da remoção através de processos erosivos do material inconsolidado *in situ*, denominado "*grus*", que anteriormente preenchia o interior do tanque natural. O *grus* corresponde ao material granítico alterado e não mobilizado, corresponde na literatura geomorfológica a "*arena in situ*", sendo bastante vulnerável a remoção e ao transporte através da erosão fluvial e pluvial.

Assim, uma vez estabelecido a condição de depocentro em escala reduzida, o tanque natural começou a ser preenchido por sedimentos pleistocênicos. A camada de conglomerado com elevado grau de arredondamento dos clastos que corresponde a porção basal do depósito de tanque sugere um transporte de longa distância, remobilizados a partir de enxurradas que seguiam os principais eixos de drenagem e afluentes (Rio Cruxati e Riacho Sororó) no entorno do sítio paleontológico. O registro sedimentar indica uma condição paleoambiental distinta, sugerindo uma drenagem volumosa com maior energia e capacidade de transporte, diferente da atual que é caracterizada como drenagem intermitente. A camada sedimentar sobreposta, constituída por um material inconsolidado (depósito colúvio-aluvial), remete a fluxos de escoamento superficial concentrados, típico de chuvas torrenciais em ambientes do semiárido. O

conjunto de chuvas torrenciais seria o responsável por carrear os sedimentos oriundos das áreas adjacentes, no desmantelamento de mantos intempéricos, e o desprendimento de lascas de descamação da parede lateral para o interior do tanque. No topo do depósito de tanque encontra-se a camada fossilífera, constituída por fragmentos ósseos oriundos da megafauna pré-histórica. Os estudos tafonômicos junto a análise da matriz sedimentar, apontaram um transporte rápido a partir de enxurradas que carrearam os fragmentos ósseos para o interior do tanque natural. Cabe ressaltar a característica caótica da camada fossilífera que denota uma mistura temporal e, de certo modo, uma baixa capacidade de deslocamento dos fragmentos fósseis em zonas específicas do tanque em virtude do estreitamento de fundo da feição geomorfológica.

A presença de fósseis de megamamíferos (mamíferos com peso acima de 1.000 kg) e grandes mamíferos (acima de 44kg) preservados no depósito de tanque constitui uma forte evidência de um antigo mosaico de vegetação composto por campos abertos, savanas e florestas na caatinga, assim como de maior ou menor quantidade de cursos de água durante o Pleistoceno. E, em vista disso, os registros paleontológicos que se encontram resguardados nos tanques naturais constituem áreas relevantes no que se refere as informações sobre a atuação de paleoclimas que podem ter viabilizado condições ambientais apropriadas ao desenvolvimento desse amplo conjunto faunístico pré-histórico.

Considerações Finais

Os depósitos de tanque constituem importantes feições geomorfológicas que preservam informações que podem auxiliar na interpretação da dinâmica paleoambiental local durante o Quaternário. O tanque natural fossilífero Jirau 01, área de referência no Sítio Paleontológico Jirau, resguarda no seu interior um relevante material que constitui o depósito de tanque. A importância do registro sedimentar reside no recorte preservado do quadro paleopaisagístico, um perfil constituído por sedimentos alóctones, culminando na camada fossilífera tida do Pleistoceno final - Holoceno inicial. A análise das camadas que constituem o depósito de tanque, junto a interpretação estratigráfica, sedimentológica e tafonômica, permite elaborar apontamentos iniciais sobre as condições ambientais e os processos erosivos e deposicionais envolvidos no preenchimento do tanque natural Jirau 01. O levantamento sistemático em relação aos depósitos de tanque no Sítio Paleontológico Jirau, além de fornecer novos dados sobre a dinâmica paleoambiental local, visando demonstrar distintos pulsos erosivos / deposicionais e condições de domínios morfoclimáticos de acordo com a distribuição geográfica dos tanques, constitui sobretudo em um importante

capítulo sobre a Geomorfologia do Quaternário, em especial no que se refere ao semiárido brasileiro.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPERJ (Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro) pela Bolsa de Doutorado; e ao Prof. Dr. Renato Rodriguez Cabral Ramos (UFRJ) pelos comentários que auxiliaram na elaboração do presente trabalho.

Referências

- ARAÚJO-JÚNIOR, H. I. *et al.* Unveiling the taphonomy of natural tank deposits: A case study in the Pleistocene of Northeastern Brazil. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 378, p. 52-74, 2013.
- BLAIR, T. C.; MCPHERSON, J. G. Grain-size and textural classification of coarse sedimentary. **Journal of Sedimentary Research**, v. 69, n. 1, p. 6-19, 1999.
- OLIVEIRA, P. E. *et al.* Paleoclimas da Caatinga brasileira durante o Quaternário Tardio. In: CARVALHO, I. S. *et al.* (org.). **Paleontologia: Cenários de Vida - Paleoclimas**. Rio de Janeiro, Interciência, 2014. p. 501-516.
- TERRY, J. P.; GOFF, J. Megaclasts: Proposed revised nomenclature at the coarse end of the Udden-Wentworth grain-size scale for sedimentary particles Grain-size and textural classification of coarse sedimentary. **Journal of Sedimentary Research**, v. 84, n. 3, p. 192-197, 2014.
- TWIDALE, C. R.; VIDAL-ROMANÍ, J. R. **Landforms and geology of granitic terrains**. Leiden: Balkema. 2005. 352p.
- WALDHERR, F. R.; ARAÚJO-JÚNIOR, H. I.; RODRIGUES, S. W. O. Origem e morfologia de tanques naturais do Nordeste do Brasil. **Pesquisas em Geociências**, v. 44, n. 3, p. 467-488, 2017.
- WALDHERR, F. R. *et al.* La importancia de los tanques naturales (mega gnammas) en la preservación de fósiles de la Megafauna cuaternaria en el Noreste de Brasil. **Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe**, n. 41, p. 99-122, 2019.
- WALDHERR, F. R. *et al.* Geomorphological aspects of the Jirau 01 fossiliferous natural tank, municipality of Itapipoca, Ceará state, Brazil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 23, n. 2, p. 1317-1333, 2022.
- XIMENES, C. L. **Proposta metodológica para um programa de micro-reservatórios alternativos de água nos sertões semi-áridos brasileiros, associado ao resgate de fósseis**. 2003. 146p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2003.
- XIMENES, C. L. 2009. Tanques fossilíferos de Itapipoca, CE: Bebedouros e cemitérios de megafauna pré-histórica. In: WINGE, M. *et al.* (org.). **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. Brasília: SIGEP - Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos, 2009. p. 465-478

ANEXO J - Tanques naturais fossilíferos de João Cativo - Patrimônio natural, geocientífico e histórico de Itapipoca (CE).

WALDHERR, F.R.; SILVA, T.M.; XIMENES, C.L.; MACHADO, R.M.; CASTRO, H.S. Tanques naturais fossilíferos de João Cativo - Patrimônio natural, geocientífico e histórico de Itapipoca (CE). *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 19., 2022, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: UERJ, 2022.



XIX Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada

TANQUES NATURAIS FOSSILÍFEROS DE JOÃO CATIVO - PATRIMÔNIO NATURAL, GEOCIENTÍFICO E HISTÓRICO DE ITAPIPOCA (CE)

FELIPE RODRIGUES WALDHERR ^a, TELMA MENDES DA SILVA ^b, CELSO LIRA XIMENES ^c, RICARDO MATOS MACHADO ^d, HENRIQUE SAMPAIO DE CASTRO ^d

^a DOUTORANDO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA / IGEO-UFRJ, ^b PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA / IGEO-UFRJ, ^c MUSEU DE PRÉ-HISTÓRIA DE ITAPIPOCA, CE, ^d UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

e-mail: felipewald@gmail.com

Direitos autorais 2022, SBGFA: No caso da seleção do presente artigo pelo Comitê Científico do evento, após revisão das informações contidas no resumo submetido pelo(s) autor(es), os mesmos autorizam a publicação, cientes de que ao se inscreverem, aceitaram a concederem essa faculdade aos organizadores do evento, em razão do caráter de atendimento à comunidade, sem fins lucrativos que o evento abrange.

RESUMO

Os tanques naturais de João Cativo integram um conjunto de formas menores do relevo granítico que ocorrem no interior do município de Itapipoca, estado do Ceará. Atualmente, a localidade de João Cativo, onde os tanques são encontrados, é reconhecida como área de referência para pesquisas acadêmicas, em especial, no âmbito da Paleontologia. Além do aspecto cênico, a localidade de João Cativo tem fomentado ao longo dos anos uma série de discussões na esfera multidisciplinar, estimulando pesquisas que abordam desde a importância da descoberta e a coleta de peças ósseas provenientes da megafauna pré-histórica através de uma expedição do Museu Nacional até as hipóteses associadas a origem e ao desenvolvimento das feições geomorfológicas - os tanques naturais - que resguardam os depósitos fossilíferos. Um breve levantamento histórico revelou a existência de um Quilombo na localidade de João Cativo e a utilização dos tanques para o armazenamento e consumo da água em períodos de estiagem. A informação de um núcleo de resistência frente ao regime escravocrata durante o Império do Brasil em um local tão longínquo no sertão cearense transmite, além de um importante marco de resistência (influindo na dinâmica sociocultural), a importância da área e dos valores culturais que a permeiam. A confluência histórica e científica dos tanques de João Cativo tem enriquecido o debate sobre a geodiversidade, a identificação do geossítio e a geoconservação a partir dos valores atribuídos ao patrimônio geomorfológico de João Cativo. O presente trabalho realiza de forma inicial uma abordagem que denota uma avaliação qualitativa, considerando a área de pesquisa como local de interesse geomorfológico ou patrimônio geomorfológico do município e Itapipoca. Assim, os tanques naturais de João Cativo podem ser analisados sob a esfera de debate do patrimônio natural, possibilitando a conformação de um importante geossítio ou geomorfossítio e, conseqüentemente, das iniciativas que buscam a sua geoconservação.

Palavras-chave: Tanques naturais fossilíferos; Geodiversidade; Geoconservação; Geomorfossítios; Semiárido brasileiro.

Keywords: Fossiliferous natural tanks; Geodiversity; Geoconservation; Geomorphosites; Brazilian semi-arid.

Introdução

Os tanques naturais de João Cativo constituem um conjunto de formas menores do relevo granítico que ocorrem em afloramentos rochosos, em especial lajedos e domos, no interior do município de Itapipoca (CE) - Figura 1. Os tanques naturais encontram-se distribuídos em uma área localmente conhecida como "João Cativo", no sopé do Maciço de Uruburetama e integrada à propriedade particular "Fazenda Carrapato". Atualmente a localidade é reconhecida como Sítio Paleontológico João Cativo, marco histórico de uma das maiores descobertas do século passado no que se refere ao avanço da Paleontologia em âmbito nacional e de pesquisas associadas ao Quaternário do Brasil e da América do Sul (XIMENES, 2003; XIMENES e

SANTOS, 2011; ARAÚJO-JÚNIOR, 2013).

Além da beleza cênica, cabe destacar que a localidade de João Cativo ainda estimula uma série de discussões. Desde a origem e o desenvolvimento das feições geomorfológicas que resguardam os fósseis até a história de ocupação e dinâmica social do município. O levantamento, a longo prazo, junto ao investimento em pesquisas associadas ao Museu de Pré-história de Itapipoca (MUPHI) e instituições parceiras (UFRJ, UERJ e UFC), tem gerado dados e informações que enriquecem o debate sobre a geodiversidade, a identificação do geossítio e a geoconservação a partir dos valores atribuídos ao patrimônio geomorfológico de João Cativo.

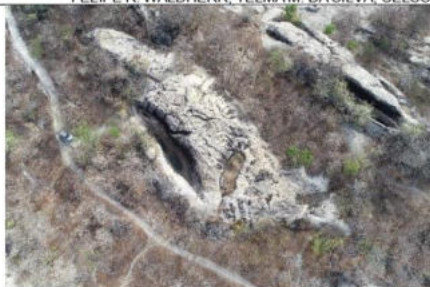


Figura 1. Vista aérea sobre os tanques naturais no Sítio Paleontológico João Cativo, no município de Itapipoca (CE). O automóvel à esquerda, próximo ao tanque natural, serve como escala. Foto: Henrique Sampaio, Dez./2021.

As temáticas que envolvem o contexto histórico dessa descoberta e do estudo deste patrimônio geomorfológico tornaram a área propensa a discussões sobre valorização, identidade e conservação de geossítios no Brasil.

A origem do topônimo João Cativo encontra-se vinculado ao regime escravocrata que perdurou desde o Período Colonial até o Império do Brasil (OLIVEIRA, 1971; XIMENES e SANTOS, 2011). Segundo tradições locais, João Cativo foi um senhor escravizado e desertor, que conseguiu evadir-se para uma área de difícil acesso e onde havia depressões (tanques naturais) que desempenharam importante papel como reservatórios de água durante os períodos de estiagem. Em curto intervalo de tempo, João Cativo converteu-se em líder e guia espiritual, estabelecendo ao sopé do Maciço de Uruburetama um respeitado Quilombo, reduto de resistência e de acolhimento aos companheiros que conseguiam escapar da então dominante elite escravocrata (OLIVEIRA, 1971).

Deste modo, a confluência histórica e científica dos tanques de João Cativo pode ser analisada sob a esfera de debate do patrimônio natural, possibilitando uma discussão a partir da identificação de patrimônio geomorfológico, a conformação de um importante Geossítio e, conseqüentemente, das iniciativas que visam a sua Geoconservação.

O presente trabalho tem, portanto, por objetivo identificar os recursos abióticos, a partir do ponto de vista geomorfológico, com o intuito de realizar a valorização e divulgação dos componentes do meio físico da paisagem da referida área. Com base na abordagem da Geoconservação e que leva a uma série de discussões sobre iniciativas que visem o desenvolvimento socioeconômico local por meio do Turismo Sustentável, buscando alternativas e incentivos para conscientizar a sociedade da importância deste patrimônio natural.

Estratégia Metodológica

Na avaliação que tange a questão de patrimônio geomorfológico, alguns trabalhos estabelecem consenso na definição dos valores que uma forma de relevo pode conter enquanto local de interesse. Estes locais são definidos como geoformas e também pelos processos passados e atuais existentes que podem atribuir valor científico, cultural, estético e/ou econômico (PEREIRA *et al.*, 2006).

Em relação à Itapipoca, Machado (2018) expõem, a partir de pontos de interesse geomorfológico, as potencialidades para o desenvolvimento do geoturismo no município em questão, incluindo as áreas com ocorrência de tanques naturais fossilíferos.

Ao buscar uma visão multidisciplinar em relação aos tanques de João Cativo, que abrangesse o contexto histórico e geocientífico, foi utilizado o método qualitativo elaborado por Pereira (2006) onde a identificação de pontos de interesse geomorfológico é realizada considerando o fato de possuir um conjunto de valores do ponto de vista da Geodiversidade. No caso, o valor intrínseco; valor cultural; valor estético; valor econômico; o valor funcional; e o valor científico-educacional. A inventariação dos pontos, inseridos na análise qualitativa (PEREIRA, 2006), consiste em quatro etapas: (i) Identificação dos potenciais locais de interesse geomorfológico; (ii) Avaliação qualitativa; (iii) Seleção dos locais de interesse geomorfológico; (iv) Caracterização dos locais de interesse geomorfológico.

Para análise detalhada e reconhecimento da área foi utilizada uma imagem de alta resolução, obtida através de uma RPA de classe 3, modelo *Phantom 4 Pro*, equipado com uma câmera de 20 megapixel de resolução acoplada. Os levantamentos aéreos foram feitos a partir de sobrevoos com 100 m de altura em relação ao solo, proporcionando um *Ground Sample Distance* (representação do pixel da imagem do terreno) de 2,73 cm. O aplicativo de sobrevoos utilizado foi o *Pix4D Capture*, instalado em um dispositivo móvel com sistema operacional IOS (*iPhone 6*). O processamento das imagens foi feito no programa de aerofotogrametria *Agsoft Photoscan*.

Discussão de resultados

Inicialmente, será apresentado um panorama dos trabalhos já elaborados para área em estudo. O Sítio Paleontológico João Cativo é composto por dezenas de tanques naturais, sendo dois preenchidos com um abundante material fossilífero proveniente da megafauna pré-histórica (XIMENES, 2003). Segundo a classificação

FELIPE R. WALDHERR, TELMA M. DA SILVA, CELSO L. XIMENES, RICARDO M. MACHADO, HENRIQUE S. DE CASTRO

elaborada por Waldherr et al. (2017), os tanques naturais de João Cativo podem ser compreendidos em um padrão de tanques escarpados de grandes dimensões e que apresentam morfologia de fundo do tipo côncavo.

Em avaliação de campo, considera-se que os tanques naturais foram desenvolvidos em condições subedáficas a partir de estruturas rúpteis/dúcteis estabelecidos sobre os lajedos graníticos, resultando ao longo do tempo na exposição das formas *etch* ao ambiente subaéreo. A disposição do conjunto de lineamentos, assim como o grau de aprofundamento associado ao intemperismo físico-químico, reflete sobre as feições geomorfológicas que configuram a paisagem interiorana de Itapipoca (CE).

De modo geral, esses tanques naturais apresentam um desenvolvimento contínuo ao longo da disposição dos lineamentos. O lineamento principal apresenta direção que varia entre N-S e NWN-SES (N10W); enquanto as ombreiras são sustentadas por rochas graníticas que se prolongam de forma quase ininterrupta, ocasionalmente rebaixada por fraturas oblíquas e transversais, até o exutório ou abertura do tanque.

O perfil longitudinal dos tanques de maiores dimensões tende a apresentar uma extensão que varia entre 25 a 30 metros de comprimento (Figura 2). A largura máxima entre as ombreiras é de 5,70 metros e a morfologia no que se refere à presença de estruturas menores no interior (*honeycomb*, *tafoni* e alvéolos) varia de acordo com a seção do tanque analisada. Já o fundo da depressão, embora mantenha um padrão côncavo, apresenta distintos níveis de aprofundamento, alcançando 6 metros de profundidade. Cabe destacar a presença de fraturas de direção N50W, tendo a extensão de 10 a 13 metros de comprimento, posicionadas de forma oblíqua ao eixo longitudinal das depressões.

Importantes contribuições científicas são registradas para a área a partir de 1952, em razão da quantidade de ossadas que foram encontradas a partir da escavação sobre depósitos de tanque para o armazenamento de água em períodos de estiagem (Ximenes e Santos, 2011). Segundo estes autores, no ano de 1953, o Museu Nacional, sediado no Rio de Janeiro, recebe uma carta de um cidadão de Itapipoca (CE), o então jovem José Paurilo Barroso, informando o achado de grandes ossadas pré-históricas em um lajedo na localidade de João Cativo. Mas somente após oito anos, em janeiro de 1961, o Museu Nacional enviou a Itapipoca os paleontólogos, Prof. Carlos de Paula Couto e o Prof. Fausto Luiz de Souza Cunha, para uma campanha de campo de 44 dias.



Figura 2. Tanque natural fossilífero João Cativo 02 no Sítio Paleontológico João Cativo, em Itapipoca (CE). Foto: Felipe Waldherr, Dez./2021.

Segundo Cunha (1961), a escavação resultou na coleta de 40 peças ósseas de grande porte e mais de 3.000 peças de pequeno porte (Figuras 3 e 4). Cabe ressaltar que a partir da análise taxonômica elaborada por Paula Couto (1961) se obteve o primeiro registro de alguns gêneros do Pleistoceno-Final na Região Nordeste do Brasil, p. ex., *Nothrotherium* (espécie de preguiça-gigante terrestre) e *Smilodon* (popularmente conhecido como tigre dentes-de-sabre). Posteriormente, Paula Couto (1980) identificou o total de 24 táxons, sendo 18 de mamíferos, 4 de répteis e 2 de aves.



Figura 3. Imagens da escavação liderada pelos paleontólogos Carlos de Paula Couto e Fausto Luiz de Souza Cunha no Sítio Paleontológico João Cativo no ano de 1961. Foto: Francisco de Alencar, Jan./1961. Fonte: Ximenes e Santos (2011).

FELIPE R. WALDHERR, TELMAM. DASILVA, CELSO L. XIMENES, RICARDO M. MACHADO, HENRIQUE S. DE CASTRO

paleontológico pelo SIGEP - Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (XIMENES, 2009).



Figura 4. Hemimandíbula de preguiça-gigante (*Eremotherium laurillardi*). O material fóssil constituía parte do acervo do Museu Nacional e infelizmente foi perdido no incêndio de 2018. Foto: Hermínio Ismael de Araújo-Júnior, 2018.

No tocante à análise da geodiversidade, tem-se que esta é composta pelos elementos abióticos como um todo, sendo o geopatrimônio considerado como um conjunto de elementos que adquirem relevância e valor superlativo de acordo a avaliação humana (Brilha, 2016).

De acordo com Carcavilla *et al.* (2008) entende-se por geopatrimônio "o conjunto de elementos geológicos e geomorfológicos que se destacam devido ao seu valor científico, cultural ou educativo".

Os principais objetivos que envolvem a temática do geopatrimônio são a conservação desses elementos excepcionais, popularização de conceitos referentes às ciências da Terra e a consolidação de uma consciência ambiental que contempla a natureza como fruto da relação dialética entre ambientes abióticos e biológicos. Essas finalidades resultariam, assim, na Geoconservação que, segundo Cumbe (2007), consiste em "atividades que têm como finalidade a conservação e gestão do geopatrimônio e dos processos naturais a ele associados". Brilha (2005; 2016), salienta que a geoconservação enquadra-se no paradigma da sustentabilidade, sendo uma daquelas atividades ou ações que podem ser repetidas, por um tempo indefinido, tendo em consideração três eixos fundamentais: Ambiental; Social e Cultural; e Econômico.

Assim, baseado na avaliação qualitativa elaborada por Pereira (2006), o Sítio Paleontológico, junto com a ocorrência dos tanques naturais fossilíferos pode ser considerado como local de interesse geomorfológico ou patrimônio geomorfológico do município e Itapipoca. Ao atender as condições ou requisitos especificados por este autor, no caso, o interesse geográfico, turístico e/ou científico.

Cabe ressaltar que já houve uma proposta intitulada "Tanques fossilíferos de Itapipoca", elaborada pelo Prof. Celso Ximenes (2007), já aprovada como patrimônio

Entende-se que o Geoturismo se apresente como uma via de conscientização através de maneira mais ampla e que pode vir a agregar valores distintos às localidades. E como os principais atrativos para o geoturismo referem-se à existência de feições geológicas e geomorfológicas, as áreas de tanques naturais e, em especial os fossilíferos, junto ao simbolismo histórico da existência do antigo Quilombo, agregariam valor cultural a localidade de João Cativo.

Considerações Finais

Segundo Nascimento e Santos (2013), a sociedade brasileira ainda é pouco sensível em relação à importância dos componentes abióticos (Geodiversidade) que compõem o estrato natural. Dessa forma, existe necessidade de se efetivar medidas contundentes de sensibilização que contemplem todas as esferas sociais; com o intuito de educar e conscientizar quanto à importância de se preservar aquilo considerado como pilares da vida terrestre.

Deste modo, foi possível destacar com este trabalho que os tanques naturais de João Cativo possuem elementos que podem e devem ser incluídos em estratégias de geoconservação e de geoturismo. Este trabalho buscou contribuir, ainda que de forma incipiente, com argumentos que visam elucidar a maneira de como a diversidade de fatores geográficos e geológicos locais podem ser agregados e aplicados na elaboração e desenvolvimento da educação ambiental, voltada ao entendimento do meio físico-social de forma integrada. E, assim, a atividade geoturística viria não só estimular a conscientização da população local, aproximando o público não especializado da importância da área para as geociências, mas servindo diretamente como localidade a ser implementada na atividade turística do município, e, assim, contribuindo com divisas para a Prefeitura e para a gestão e mantimento das atividades.

Os proprietários da Fazenda Carrapato, o Sr. Fernando Diógenes e familiares, onde se encontra o Sítio Paleontológico João Cativo, têm ciência das ideias de preservação e do desenvolvimento socioeconômico local através de iniciativas que visem o reconhecimento do patrimônio natural. A família tem dado todo o apoio possível para as investigações científicas na área.

Vale destacar que esse trabalho entrará na fase de uma abordagem quantitativa, através da metodologia proposta para realização da avaliação do patrimônio geomorfológico que busca atribuir um caráter mais detalhado e preciso, utilizando-se de métodos numéricos na avaliação de critérios, permitindo a comparação de localidades, ou o estabelecimento de uma seriação

FELIPE R. WALDHERR, TELMA M. DA SILVA, CELSO L. XIMENES, RICARDO M. MACHADO, HENRIQUE S. DE CASTRO

baseada no valor, principalmente, se o objetivo do trabalho estiver ligado à tomada de decisões relativas à geoconservação e/ou divulgação de locais de interesse geomorfológico. Será empregada a sequência metodológica de Pereira (2006) que destaca as subetapas para inventariação e quantificação de geoformas como patrimônio geomorfológico, mantendo de certo modo a continuidade do trabalho de Machado (2018) em relação a potencialidade de pontos de interesse geomorfológico no município de Itapipoca (CE).

Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPERJ (Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro) pela Bolsa de Doutorado; e ao Sr. Fernando Diógenes e familiares, proprietários da Fazenda Carrapato, pelo apoio nas investigações científicas no Sítio Paleontológico João Cativo no município de Itapipoca (CE).

Referências

- ARAÚJO-JÚNIOR, H. I. *et al.* Unveiling the taphonomy of natural tank deposits: A case study in the Pleistocene of Northeastern Brazil. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 378, p. 52-74, 2013.
- BRILHA, J. B. R. **Patrimônio Geológico e Geoconservação: A Conservação da Natureza na sua vertente Geológica**. Braga, Portugal: Palimage Editores. 2005.
- BRILHA, J.B.R. Inventory and Quantitative Assessment of Geosites and Geodiversity Sites: a Review. **Geoheritage**, p. 119-134, 2016.
- CARCAVILLA, L.; DURÁN, J. J.; LÓPEZ-MARTINÉZ, J. Geodiversidade: concepto y relación con el patrimonio geológico. **Geo-Temas. Las Palmas de Gran Canaria**, v. 10, p. 1299-1303, 2008.
- CUMBE A. N. F. **O patrimônio geológico de Moçambique: proposta de metodologia de inventariação, caracterização e avaliação**. 2007. 240 f. Dissertação (Mestrado em Patrimônio Geológico e Geoconservação) - Escola de Ciências, Universidade do Minho, Portugal. 2007.
- MACHADO, R. M. **Potencialidades para o desenvolvimento do geoturismo no Município de Itapipoca (CE)**. 2018. 183 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- NASCIMENTO, M. A. L.; SANTOS, O. Geodiversidade na Arte Rupestre no Seridó Potiguar. **Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN)**. Natal: IPHAN-RN, 2013.
- PANIZZA, M. Geomorphosites: Concepts, methods and examples of geomorphological survey. **Chinese Science Bulletin**, v. 46, p. 4-6, 2001.
- CUNHA, F. L. S. Relatório de excursão ao Nordeste. **Arquivo do Museu Nacional** (não publicado), Rio de Janeiro, 8 p. 1961.
- OLIVEIRA, F. F. Um testamento de 30 mil anos. **Revista do Instituto do Ceará**, V. 85, p. 285-289, 1971.
- PAULA-COUTO, C. Relatório e prestação de contas de excursão. **Arquivo do Museu Nacional** (não publicado), Rio de Janeiro, 15 p. 1961.
- PAULA-COUTO, C. Fossil Pleistocene to sub-recent mammals from northeastern Brazil. I- Edentata Megalonychidae. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 52, n. 1, p. 144-151. 1980.
- PEREIRA, P. J. S. Patrimônio geomorfológico: conceptualização, avaliação e divulgação. Aplicação ao Parque Natural de Montesinho. Tese (Doutorado em Ciências – Área de conhecimento de Geologia) – Escola de Ciências, Universidade de Minho, Braga, 2006.
- PEREIRA, D. *et al.* Inventariação temática do patrimônio geomorfológico português. **Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos, Guimarães** - Porto, Portugal. v.3, p.155-159, 2006. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/5370/1/geomorf.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2022.
- WALDHERR, F. R.; ARAÚJO-JÚNIOR, H. I.; RODRIGUES, S. W. O. Origem e morfologia de tanques naturais do Nordeste do Brasil. **Pesquisas em Geociências**, v. 44, n. 3, p. 467-488, 2017.
- XIMENES, C. L. **Proposta metodológica para um programa de micro-reservatórios alternativos de água nos sertões semi-áridos brasileiros, associado ao resgate de fósseis**. 2003. 146f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2003.
- XIMENES, C. L. Tanques fossilíferos de Itapipoca, CE: Bebedouros e cemitérios de megafauna pré-histórica. In: WINGE, M. *et al.* (org.). **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. Brasília: SIGEP - Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos, 2009. p. 465-478.
- XIMENES, C.L.; SANTOS, A.S.T. Itapipoca 1961: A expedição João Cativo e seu legado para a paleontologia brasileira. In: CARVALHO, I. (org.) **Paleontologia: Cenários de Vida - Paleoclimas**. Rio de Janeiro: Interciência, v. 5, 2011. p. 795-806.

ANEXO K - Os tipos de fundo de tanque no município de Itapipoca, estado do Ceará.

A - Exemplo de tanque natural com tipo de fundo côncavo. Foto: Felipe Waldherr, Jul. 2019.



B - Exemplo de tanque natural com tipo de fundo plano. Foto: Felipe Waldherr, Jul. 2019.



C - Conjunto de tanques naturais com tipo de fundo plano. Foto: Felipe Waldherr, Jul. 2019.



D - Exemplo de tanque natural com fundo em forma de "poltrona". Foto: Felipe Waldherr, Jul. 2019.

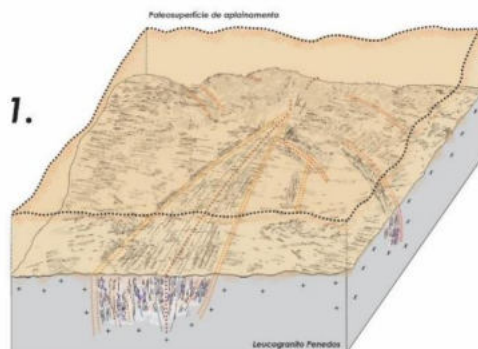


E - Exemplo de tanques naturais com fundo em forma de cunha. Foto: Felipe Waldherr, Jul. 2019.

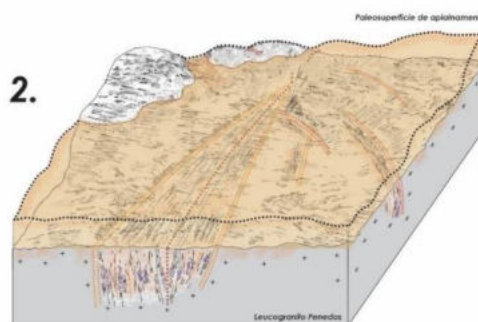


ANEXO L - Proposta de sequência evolutiva do tanque natural fossilífero Jirau 01 em bloco-diagrama. Elaborado por: Felipe Waldherr (2023).

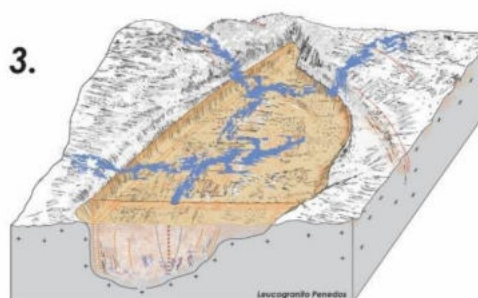
PROPOSTA DE SEQUÊNCIA EVOLUTIVA DO TANQUE NATURAL JIRAU 01



O momento 01 corresponde ao período que o embasamento granítico (Leucogranito Penedos) se encontra recoberto por um espesso manto regolítico. Embora o manto regolítico corresponda a paleosuperfície de aplainamento e a um distinto período do tempo geológico, é interessante refletir sobre a possibilidade da existência de irregularidades topográficas a qual corresponderia as zonas e/ou setores de debilidade no substrato rochoso. A conformação da paisagem no ambiente subaéreo estaria vinculada ao intemperismo diferencial, evidenciando áreas de rugosidades e de confluência (concentração) do escoamento superficial e subsuperficial.



O momento 02 consiste no período de remoção da cobertura regolítica e, assim, no dismantelamento da paleosuperfície aplainada, com a exposição episódica do embasamento granítico. Os sistemas de fraturas e juntas tendem a rearranjar a distribuição de formas do relevo, as áreas que apresentam menor ocorrência de estruturas secundárias tendem a formar núcleos maciços que se sobressaem no conjunto paisagístico. O entendimento do controle estrutural reflete igualmente em subsuperfície, por exemplo, os núcleos expostos tendem a atuar como dispersores de escoamento superficial, redistribuindo para as áreas de convergência de fluxos. Desse modo, a redistribuição do escoamento superficial é conduzida preferencialmente para as zonas topograficamente inferiores, promovendo a recarga sobre as zonas de debilidade da rocha em subsuperfície. A manutenção de zonas vadasas e bolsões de umidade em determinados pontos do substrato rochoso torna, assim, mais eficiente a atuação da corrosão química e o reafeiçoamento de formas menores do relevo granítico em condições subedáficas. Na ilustração observa-se o aprofundamento significativo em relação ao eixo principal e as fraturas conjugadas (*sheet structure*), ambas em viés de saprolitização, transformando gradativamente as estruturas rúpticas em zonas de *arena* ou denominado simplesmente como *grus* (material intemperizado *in situ*).



O momento 03 corresponde ao período de exposição do tanque natural Jirau 01 e a remoção do material intemperizado *in situ* que preenchia o interior da depressão. A remoção e o transporte do material intemperizado *in situ* (zonas de *arena* ou *grus*) era então realizado a partir da ação do escoamento superficial estabelecido pela rede de drenagem. É importante destacar o reaproveitamento da rede drenagem sobre as zonas de debilidade do embasamento granítico, anteriormente recobertas pelo manto regolítico, e que ainda inferem atualmente, sobre a dinâmica da paisagem. Os sistemas de fraturas conjugadas e o eixo central do tanque natural encontram-se amplamente saprolitizados e compreendem autênticas zonas de *arena* ou *grus*. A remoção do material intemperizado através do escoamento superficial se mantém até alcançar o seu exutório.

>>> BLOCO DIAGRAMA - LEGENDA:

Eixo central do tanque natural Jirau 01

Sistema de fraturas conjugadas

Concentração de fraturas (*sheet structure*)

Sistema de fraturas oblíquas

Zona de *arena* ou *grus*

Estabelecimento de zonas vadasas

Afloramentos rochosos

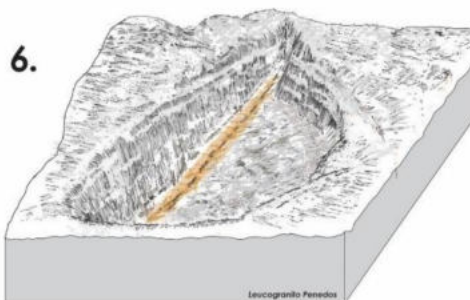
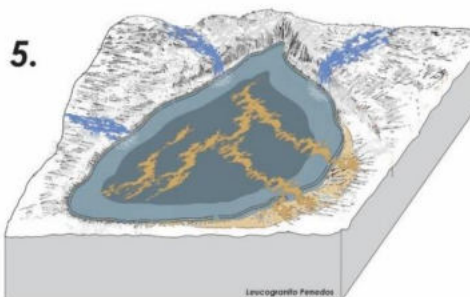
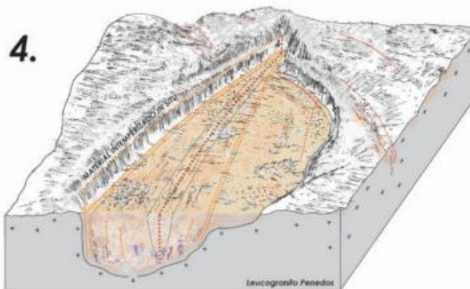
Material intemperizado *in situ*

Primeira frente de intemperismo

Segunda frente de intemperismo

Sedimento transportado

Detritos (*lascas de descamação*)



O momento 04 corresponde ao período da remoção parcial do material intemperizado, expondo uma série de formas e estruturas menores do relevo granítico. A remoção e o transporte do material intemperizado (zonas de *arena* ou *grus*) é interrompido pela exumação do exutório, localizado a jusante do tanque natural, e que corresponde um nível de base local ao tanque. O processo de intemperismo segue atuando no interior do tanque em condições de subsuperfície, no entanto de modo mais restrito e pontual. A área anteriormente definida através da concentração de fraturas conjugadas e onde encontrava-se o eixo principal (lineamento estrutural WNW-ESE), já está totalmente modificada. A transformação física, química e mineralógica alterou o conjunto de estruturas rúpteis (secundárias ou tardias).

O momento 05 corresponde ao período de transbordamento do tanque natural, resultante da confluência dos fluxos de escoamentos superficiais e, conseqüentemente, na remoção dos sedimentos finos. Além de revolver os sedimentos assentados sobre o fundo do tanque natural, a contínua entrada de fluxos d'água pode ter contribuído de modo a manter em suspensão os materiais intemperizados mais finos e, como efeito, remover parte desse material através do transbordamento.

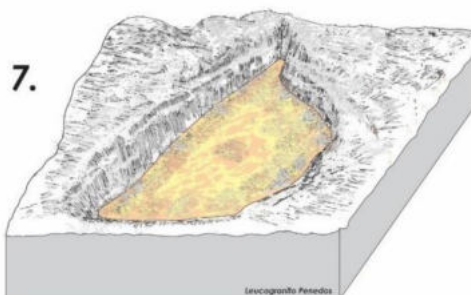
O momento 06 refere-se ao período da remoção de sedimentos finos em suspensão a partir da entrada de água por escoamento superficial no interior do tanque e, conseqüentemente, do seu transbordamento. Uma porção do material intemperizado permaneceu no fundo do tanque natural, mascarando irregularidades e desníveis ocasionados pela atuação da frente de intemperismo. A remoção da maior parte do depósito sedimentar de caráter autóctone resulta na formação de zonas de acomodação, ou seja, a disponibilidade de espaço de preenchimento no interior do tanque. É provável que a deposição da camada basal, formada por conglomerados polimíticos suportados pelos clastos em matriz argilosa de tonalidade esverdeada a cinza, principalmente no contato com o material saprolítico do embasamento cristalino, tenha ocorrido durante esse momento. É notório igualmente a exposição de formas e estruturas menores (flared slopes, tafoni e alvéolos), assim como texturas associadas a corrosão química (pitting), que ocorrem sobre as superfícies do tanque. Uma vez removido o material do contato solo-rocha (material intemperizado e o Leucogranito Penedos), compreende-se que há uma descontinuidade na atuação do intemperismo químico em áreas específicas, sobretudo nas superfícies verticalizadas, por exemplo, nas paredes laterais do tanque natural. É possível indicar a atuação incipiente do intemperismo em condições subaéreas, por exemplo, o efeito de termoclastia sobre as paredes laterais, resultando no desprendimento e desagregação de lascas de descamação (mecanismo de flaking), e na desintegração e dinâmica restrita de transporte no interior do tanque natural.

>>> BLOCO DIAGRAMA - LEGENDA:

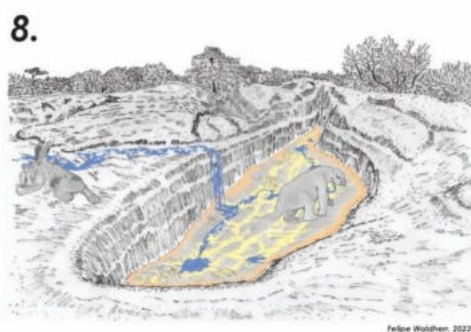
- Eixo central do tanque natural Jirau 01
- Sistema de fraturas conjugadas
- Concentração de fraturas (sheet structure)
- Sistema de fraturas oblíquas

- Zona de arena ou grus
- Estabelecimento de zonas vadasas
- Afloramentos rochosos
- Material intemperizado in situ

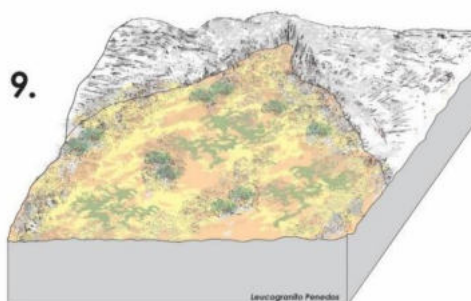
- Primeira frente de intemperismo
- Segunda frente de intemperismo
- Sedimento transportado
- Detritos (lascas de descamação)



O momento 07 corresponde ao período de preenchimento sedimentar sobre as zonas de acomodação do tanque natural. O novo aporte sedimentar seria carregado ao interior do tanque a partir do escoamento superficial, principalmente por enxurradas (flash flood). O escoamento superficial seria o responsável por transportar o material intemperizado de característica alóctone para o interior do tanque natural. O material intemperizado, carregado ao interior do tanque, corresponde ao depósito de tanque atual, sendo constituído por um sedimento lamoso maciço com grãos de quartzo tamanho (de fração) areia muito grossa, subangulosos a angulosos, pobremente selecionados, dispersos na matriz pelítica. As características indicam que o material siltico-argiloso poderia estar associado a depósitos do tipo colúvio-aluvial. É possível notar também a continuidade do efeito de termoclastia, junto ao mecanismo de flaking (desagregação e desprendimento de lascas de descamação), resultando no acúmulo no interior do tanque de material detrítico no sopé das ombreiras graníticas e na desintegração de material intemperizado recém carregado e depositado no interior do tanque natural e que se encontrava no entorno do sítio paleontológico.



O momento 08 corresponde ao período de formação da camada fossilífera no interior do tanque natural. A camada é constituída por fragmentos fósseis oriundos da megafauna pré-histórica que habitou a região durante o Pleistoceno Final e Holoceno Inicial. Os fragmentos ósseos foram encontrados envolvidos por uma matriz argilosa com presença de clastos e grãos de quartzo pobremente selecionados; sendo erosivo o contato entre essa camada e a inferior. O contato erosivo pode ser atribuído a condição de alta energia o qual os fluxos d'água em enxurradas adentravam o interior do tanque, revolvendo as camadas sedimentares do depósito de tanque. O tipo de material sedimentar e o aspecto de deposição do conjunto fóssil, junto a análise tafonômica (ARAÚJO-JÚNIOR et al., 2013), evidencia o transporte rápido e de elevada energia associado ao papel de flash floods ou enxurradas, resultante de chuvas torrenciais. O escoamento superficial atuaria de modo a transportar e depositar, eventualmente, os fragmentos ósseos no interior do tanque natural. É aceito na literatura acadêmica que a maior parte do material fossilífero encontrado no depósito de tanque são de animais que haviam perecido nas proximidades da depressão. É importante destacar que a partir da deposição dos fragmentos ósseos da megafauna pré-histórica pode ser atribuída a denominação "tanque natural fossilífero Jirau 01", resultante da conformação entre o "tanque natural" e o "depósito de tanque fossilífero" (feição deposicional).



O momento 09 corresponde ao período de preenchimento generalizado do tanque natural fossilífero Jirau 01. A área do tanque natural converteu-se em uma ampla zona de sedimentação, ultrapassando o próprio nível de base local estabelecido pelo exutório. A camada superior do depósito de tanque corresponderia aos sedimentos finos, com aproximadamente 1,5 m de espessura, composto por sedimentos argilosos e siltitos, com eventual ocorrência seixos de quartzo e abundância de material orgânico. A sedimentação, predominantemente alóctone, sobre o tanque natural e área de entorno tenderia a mascarar as irregularidades do relevo granítico. Em imagens fotográficas da década de 60, há registro de vegetação arbustiva e arbórea, inclusive de grande porte, sobre o depósito de tanque. Infelizmente, a maior parte do material da camada superior foi desentulhada para a abertura de cacimbas (poços) para armazenamento de água e, conseqüentemente, o conjunto de dados e informações que poderiam provir da análise estratigráfica da camada sedimentar foram descartadas e eliminadas.

>>> BLOCO DIAGRAMA - LEGENDA:



Afloramentos rochosos



Detritos (lascas de descamação)



Sedimento transportado



Zona de arena ou grus