

Mapeamento da Borda Sul-Sudeste da Bacia do Araripe com auxílio de gamaespectrometria e magnetometria

Survey of the Araripe Basin S-SE Border with the use of gamma spectrometry and magnetometry

Tito Aureliano¹, Aline Marcele Ghilardi¹

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Geologia, Diversity, Ichnology and Osteohistology Laboratory (DINOLab). Campus Universitário - Rua das Engenharias, s/n, Lagoa Nova, CEP: 59.078-970, Natal, RN, BR. (aureliano.tito@gmail.com; aline.ghilardi@ufrn.br)

Recebido em 27 de abril de 2023; aceito em 12 de março de 2024.

RESUMO

A Bacia do Araripe, localizada na fronteira entre os estados de Pernambuco, Piauí e Ceará, no Nordeste do Brasil, apresenta um modelo evolutivo clássico para a compreensão dos eventos de separação do Gondwana durante o Período Cretáceo. Além disso, a bacia também contém unidades de grande relevância paleontológica e econômica. A maior parte dos estudos geológicos e paleontológicos realizados na bacia concentrou-se na margem nordeste da mesma, enquanto o sul e o oeste ainda carecem de pesquisas. Este estudo testou a aplicação de gamaespectrometria e magnetometria para o mapeamento das unidades em um trecho da borda sul-sudeste da Bacia do Araripe. Em conjunto com dados obtidos em campo, foi possível identificar três unidades principais na região: os arenitos aluvionares da Formação Exu, os arenitos ricos em troncos fósseis da Formação Missão Velha e os folhelhos ricos em concreções calcárias fossilíferas da Formação Romualdo. Com o auxílio também de dados geofísicos, foi possível identificar e individualizar as formações Romualdo e Exu, e o contato da bacia com o embasamento. As anomalias observadas nos dados radiométricos foram utilizadas para mapear a unidade do tipo *lagerstätten*, apresentando um modelo replicável em outros contextos e bacias. Por fim, o levantamento geológico desses detalhes, evidenciou que a Formação Romualdo possui uma extensão ao sul superior à estimada em trabalhos anteriores, estendendo-se ao longo do sopé da chapada com orientação aproximadamente E-W.

Palavras-chave: Sedimentologia; Estratigrafia; Geofísica; Gamaespectrometria; Formação Romualdo.

ABSTRACT

The Araripe Basin is located on the border between the states of Pernambuco, Piauí and Ceará in Northeast Brazil, and presents an evolutionary classic model for understanding the Gondwana breakup events during the Cretaceous Period. Additionally, the basin also contains units of great paleontological and economic relevance. Most of the geological and paleontological studies conducted in the basin have focused on the northeastern margin of the basin, while the south and west still lack research. This study tested the application of gamma spectrometry and magnetometry for mapping the units in part of the south-southeastern border of the Araripe Basin. Three main units were identified in the region: the alluvial sandstones of the Exu Formation, the fossil-rich sandstones of the Missão Velha Formation, and the shales rich in fossiliferous calcareous concretions of the Romualdo Formation. It was possible to identify and individualize the Romualdo and Exu formations, and the basin contact with the basement with the support of geophysical data. Anomalies observed in radiometric data were used to map the *lagerstätten* unit, presenting a replicable model for other contexts and basins. Finally, the detailed geological survey showed that the Romualdo Formation is more extensive to the south than previously estimated, extending along the foot of the plateau with approximate E-W orientation.

Keywords: Sedimentology; Stratigraphy; Geophysics; Gamma spectrometry; Romualdo Formation.

INTRODUÇÃO

A Era Mesozoica foi palco de grandes mudanças ambientais, climáticas e paleogeográficas. Durante essa era, supercontinentes se fragmentaram e abriram espaço para o surgimento de novos oceanos, incluindo o Atlântico (Carvalho et al., 2012; Guzmán-González et al., 2020). A Bacia do Araripe sempre despertou muita atenção por apresentar um modelo que favorece o estudo dessas mudanças a partir do Jurássico (Neumann e Cabrera, 1999; Assine, 2007; Fambrini et al., 2020). Suas sequências sedimentares oriundas do rifte do centro-oeste do Gondwana, apresentam modelos para compreensão da geração e armazenamento de óleo e gás (Ramos et al., 2020; Rosa et al., 2023). Ademais, seus depósitos fossilíferos excepcionais estão entre os mais importantes do mundo, sendo imprescindíveis para a compreensão da evolução da biota cretácea (Cisneros et al., 2022).

A maioria dos estudos sedimentares e estratigráficos foram conduzidos na margem nordeste da bacia, no Estado do Ceará, onde ocorrem as sequências mais completas. Com isso, há a demanda para mapeamento da borda sul e oeste da Bacia do Araripe. Para suprir esta necessidade, este estudo se propôs a coletar dados litológicos e estruturais, realizar geoprocessamento e fotointerpretação 3D da área, e testar a aplicação de gamaespectrometria e magnetometria para auxiliar o mapeamento da borda sul-sudeste da bacia, no entorno do município de Exu, Estado de Pernambuco. Os resultados aqui apresentados contribuem para o refinamento da compreensão da extensão da Bacia do Araripe, bem como sobre a aplicação de geofísica para mapeamento e busca de recursos em depósitos sedimentares.

Geologia Regional

A Bacia do Araripe compreende uma área de aproximadamente 12.200 km² (Figura 1), abrangendo o noroeste do estado de Pernambuco, a borda sul do Ceará, e uma pequena porção a Leste do Piauí (Carvalho et al., 2012). A origem da Bacia do Araripe está associada a uma fase da evolução tectônica neocomiana da formação do Atlântico Sul (Matos, 1992). As bacias do tipo rifte do Vale do Cariri são um conjunto de meio-grábens assimétricos separados por falhas e soerguimentos do embasamento. Essa tectônica individualizou as sub-bacias Crato e Feira Nova, limitando-as por falhas de transferência de direção NW e/ou zonas de acomodação (Carvalho et al., 2012). Falhas normais de direção NE-SW afetaram a região, altos do embasamento e, localmente, blocos mergulhando em direções opostas.

A Bacia do Araripe compõe parte de um complexo de vales de rifte localizado na extremidade oeste de um rifte abortado (envolvendo as bacias do Recôncavo, Tucano e Jatobá), isolando-se por regiões soerguidas pelos lineamentos Pernambuco e Paraíba (Silva, 1983). As falhas destras que constituem o Lineamento Paraíba limitam a bacia ao

norte; as falhas transcorrentes destras sob influência da Zona de Cisalhamento Pernambuco resultaram em feições compressionais a SW, e extensionais a SE. Ademais, a NE ocorrem deformações compressionais, e a NW, extensionais. A origem da Bacia do Araripe está relacionada à coalescência de pequenos grábens, devido à movimentação lateral desse sistema de falhas (Silva, 1983; Carvalho et al., 2012).

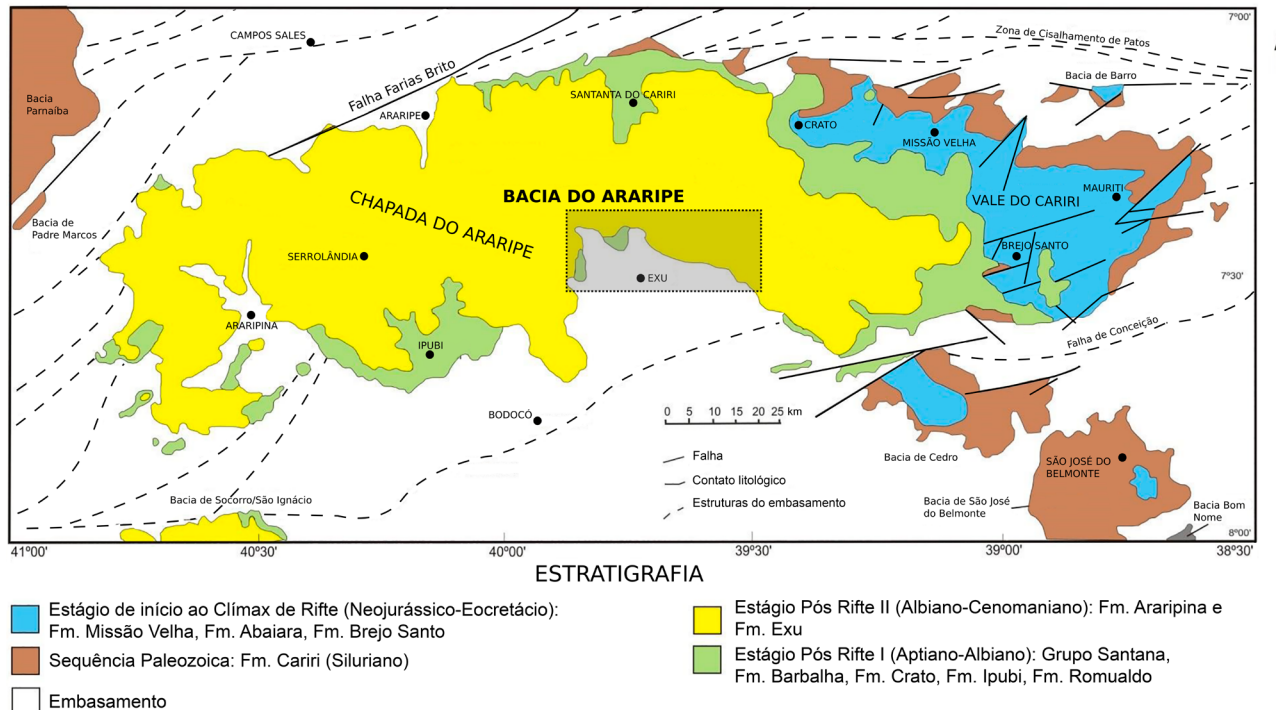
A história evolutiva da Bacia do Araripe a partir do Paleozoico é comumente agrupada de acordo com os regimes tectônicos dominantes (Neumann e Cabrera, 1999; Assine, 2007; Fambrini et al., 2015, 2020). Quatro estágios distintos foram propostos por Assine (2007): a sequência paleozoica, onde os depósitos estão relacionados às outras grandes sinéclises cronocorrelatas; a supersequência pré-rifte, que abrange sedimentos do contexto da Depressão Afro-Brasileira do final do Jurássico; supersequência rifte, compreendendo pacotes sedimentares continentais do Cretáceo Inferior; e supersequência pós-rifte, durante o Neopálio-Eoalbio, onde ocorrem ingressões marinhas resultantes de subsidência flexural térmica.

Uma série de estudos conduzidos por Fambrini e colaboradores historicamente propõem quatro tectonosequências principais da bacia (Figura 1), e descrevem o empilhamento sedimentar da mesma como:

- sequência sinéclise, constituída pela Formação Cariri, representada por arenitos médios a grossos granodécrescentes;
- sequência de ‘Início de Rifte a Clímax de Rifte Inferior’, de idade jurássica superior, composta pela Formação Brejo Santo e porção inferior da Formação Missão Velha;
- sequência de ‘Clímax de Rifte Tardio’, constituída pela porção superior da Formação Missão Velha e pela Formação Abaiara, com idade neocomiana; e
- sequência pós-rifte, separada em duas: ‘Pós-rifte Inferior’, de idade aptiano-albiana, constituída pelas formações Barbalha, Crato, Ipubi, Romualdo e Arajara, e ‘Pós-rifte Superior’, de idade albiano-ceanomaniana, caracterizada por sedimentos aluvionares da Formação Exu (Fambrini et al., 2011, 2020; Guzmán et al., 2015).

Materiais e Método

Este trabalho apresenta uma síntese das informações geológicas coletadas em campo entre os anos de 2013 e 2017 (Figuras 2–10). O objetivo foi testar o uso de gamaespectrometria e magnetometria para o estudo das rochas sedimentares e seu embasamento cristalino, em complemento às observações estruturais, texturais, faciológicas e fossilíferas. Para tal, elaborou-se um mapa geológico na escala 1:50.000 da região do município de Exu, no Araripe pernambucano (Figuras 1 e 2). A área estudada está delimitada pelas coordenadas dos vértices superior direito 738130-752660E e inferior esquerdo 3990610-3954390N (WGS 84), totalizando cerca de 68 km².



Fm.: Formação – Fonte: Modificado de Fambrini et al. (2011)

Figura 1. Mapa da Bacia do Araripe e suas principais subdivisões baseadas em eventos tectônicos ocorrentes na região. O polígono pontilhado delimita a área de estudo, apresentada em detalhe na Figura 2.

Coleta de dados em campo

A descrição dos 69 afloramentos identificados (Figura 2; Tabela S1 – Documento Suplementar 3) foi realizada seguindo a metodologia padrão de obtenção de dados em campo (Argles, 2010). Foi utilizado o *software* Rock-Logger Pro v1.97 em conjunto com a bússola geológica para obtenção de dados e auxiliar nas medidas estruturais de planos de falhas, flancos de dobras e paleocorrentes, bem como na geração das projeções estereoscópicas (Zeng et al., 2014).

Geoprocessamento e fotointerpretação 3D

Para fotointerpretação das feições geológicas da área, foram utilizadas fotografias aéreas fornecidas pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM; projeto SUDC/PC-D-5/64, quadrante SB-24U, faixas 12 a 16). A reconstrução tridimensional dos afloramentos baseando-se em fotografias aéreas em série, é amplamente utilizada na mineração, na avaliação de desastres urbanos e ambientais, e na arqueologia (Feres, 2002; Menezes, 2004). O *software* Pix4D versão 2.1.49 (Pix4D, 2021) foi utilizado neste mapeamento para construir automaticamente o mosaico da região. Modelos digitais de elevação gerados a partir de *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM - NASA), foram adaptados para o sistema de referência oficial brasileiro (SIRGAS 2000) pelo Laboratório de Geoprocessamento da Universidade

Federal do Rio Grande do Sul (Weber et al., 2004). Esses dados foram utilizados para processar o modelo digital da área estudada, gerando as linhas de curvas de nível do mapa topográfico (Figura 2). Posteriormente, os pontos (Tabela S1 – Documento Suplementar 3) foram inseridos no *software* Quantum Gis, versão 2.12 Lyon (Gray, 2008), utilizado para elaborar o mapa geológico apresentado. O mosaico com a vista aérea da região foi georreferenciado e visualizado em uma camada sobreposta ao modelo de elevação digital. O plugin *ThreeJS* (Herman et al., 2017) foi utilizado para gerar modelos tridimensionais da área selecionada, auxiliando na interpretação das feições geológicas, concomitante ao delineamento das unidades.

Geofísica

Os dados aerogeofísicos (aerogamaespectrométricos e aeromagnetométricos) que abrangem a área de estudo, estão relacionados ao ‘Projeto Aerogeofísico Pernambuco-Piauí/PE-PI’ (código 1067), de 2006. Esses dados foram fornecidos pelo SGB-CPRM.

O estudo da magnetometria contribui na investigação da geologia com base nas anomalias do campo magnético da Terra, resultantes do contraste de susceptibilidade magnéticas das rochas, tanto em superfície quanto em profundidade (Kearey et al., 2009). A gamaespectrometria se baseia no decaimento natural dos radioelementos K, e membros da família radioativa do Th e U presentes na superfície terres-

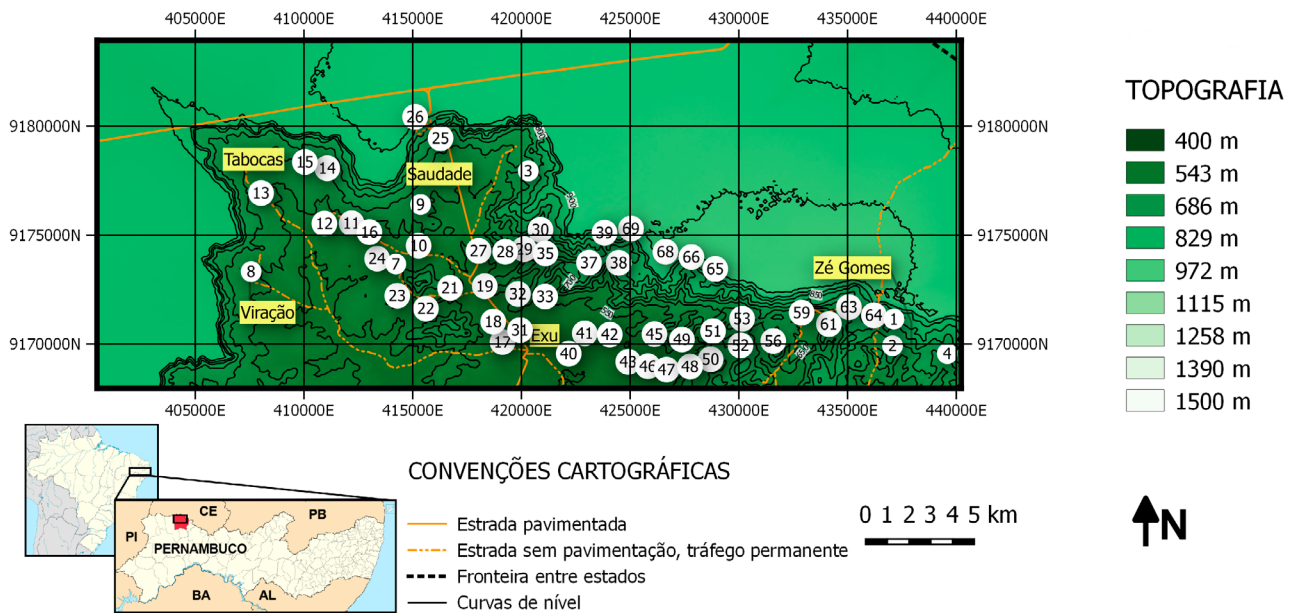


Figura 2. Mapa topográfico da porção norte do município de Exu, com os pontos de afloramento pesquisados. A identificação dos afloramentos é apresentada nas Tabelas S1 e S2 – Documento Suplementar 3.

tre. Como o espectro de energia da radiação gama emitida depende diretamente do elemento pai, esta informação pode ser utilizada para diferenciar litologias presentes na área de estudo com base na concentração destes elementos (Kearey et al., 2009).

Os dados geofísicos foram coletados seguindo plano de voo N-S, com linhas de voo espaçadas em 500 m, e linhas de controle E-W com espaçamento de 10 km. A altura do voo nominal foi de 100 m sobre o terreno. O método de pré-processamento de ambos os dados foi realizado pela Lasa Engenharia e Prospecção S.A Prospectores Aerolevantamentos e Sistemas e está descrito em SGB-CPRM (2006). As interpolações dos dados aéreos foram efetuadas a partir de uma janela de interpolação quadrada de 125x125 m. O *software* Oasis Montaj v.6.4.2 (Montaj, 2007) foi utilizado para as análises dos dados geofísicos. Os mapas radiométricos utilizados foram os de contagens individuais dos radioelementos (K, eTh e eU) (Figuras 11A–11C) e a composição com distribuição ternária desses com padrão de cor CMY (Cyan, Magenta, Yellow) (Figura 11D). Os mapas magnéticos considerados foram o de campo magnético anômalo e de Derivada em Z (Figuras 11E, 11F).

RESULTADOS

Geologia Local

Durante o trabalho de campo na área estudada, localizada na borda S-SE da Bacia do Araripe (Figura 2), foram observadas duas unidades principais (além do embasamento): pacotes de arenitos fluviais e folhelhos com abundantes concreções calcáreas com ocorrência de fósseis. Além

destas, observou-se também pequenas ocorrências de uma unidade arenítica com troncos fósseis silicificados. Nenhuma das unidades observadas foram mapeadas pelo SGB-CPRM em escala menor que 1:1.000.000, adotadas para o mapa geológico que engloba o município de Exu, denominado de Folha Jaguaribe (Angelim et al., 2004). A seguir, é apresentada uma descrição dessas unidades.

Embasamento

O embasamento da área envolvida neste estudo (Figura 3), havia sido previamente mapeado pelo SGB-CPRM, na Folha Jaguaribe em escala 1:1.000.000 (Angelim et al., 2004). Segundo esses autores, o embasamento da região é composto por uma única unidade, o Corpo Granitoide Bodocó. Ainda segundo esses autores, essa unidade é caracterizada por granitos e granodiorito grosso a porfírico associado a diorito e a fases intermediárias de mistura calcálicas de alto K. A partir das viagens de campo executadas neste trabalho, observou-se matacões rolados de granitoides de composições e texturas diversas, localizados principalmente na porção centro-oeste da área (e.g. pontos 19 e 20). Esses matacões variam de uma composição sienítica a diorítica, e suas texturas, de finas a mais predominantemente grossas e, pegmatíticas com presença de contato/mistura entre fluidos (Figuras 3A, 3B, 3G). Nas regiões da borda oeste da bacia são observados ortognaisses e biotita xistos com sistema de falhas com trends predominantes para SE (Figuras 3C, 3D, 4A – 4C; e.g., ponto 38). Ortognaisses com dobras apertadas em Chevron de médio porte foram observados localmente no

ponto 38. Enquanto na mesma litologia encontra-se Par de Riedel, indicando um regime compressional com certa influência transcorrente, no centro-leste da borda da bacia, além dos matacões plutônicos mencionados anteriormente, ocorrem também anfibolitos, biotita-

-granada xistos e ortognaisses com sistema de falhas com trends na direção NW (Figuras 3E, 3H), onde há presença comum de Par de Riedel e mergulho subvertical (Figura 4), indicando uma predominância de regime transcorrente na área.

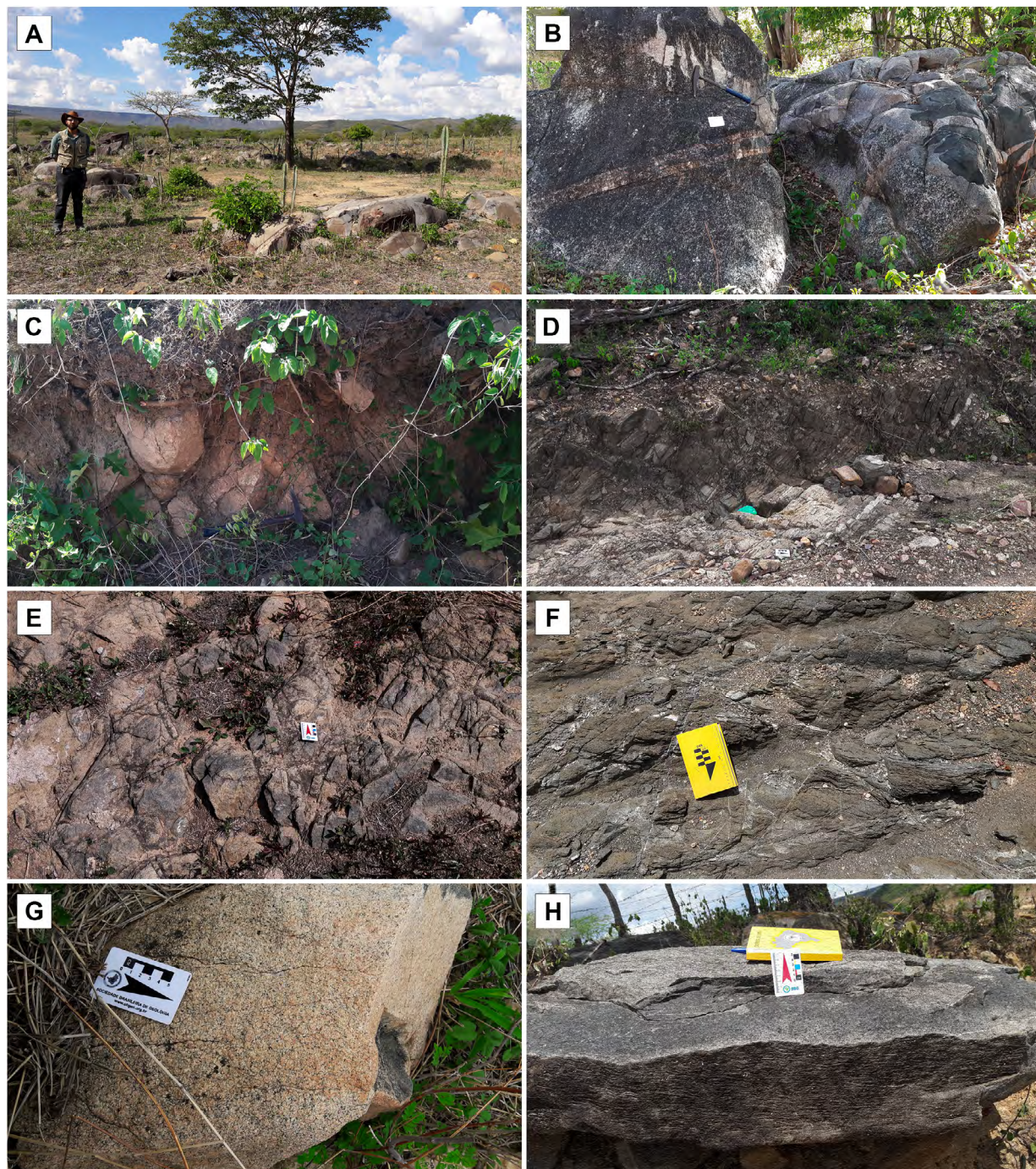


Figura 3. O embasamento da Bacia do Araripe nas cercanias do município de Exu, PE. (A) matacões de granitoides diversos dominam as regiões a oeste e ao sul do mapa (ponto 20); (B) contato em fase fluida entre magmas de composição e textura pegmatíticas (Peg), félsica (Fel) e diorítica (Dio) no ponto 19; (C) dobra Chevron de médio porte em rochas ortoderivadas no ponto 38; (D) biotita xistos (Xis) com sistema de falhas com trend para SE (ponto 38); (E) biotita-granada xisto (Xis) com sistema de falhas com trend para NW (ponto 40); (F) anfibolito (Anf); metabasalto intrudido no ortognaisse no ponto 44); (G) granitoide de composição quartzo-sienítica (QS) no ponto 43; (H) matacão alóctone de ortognaisse milonitizado (OrG; ponto 52).

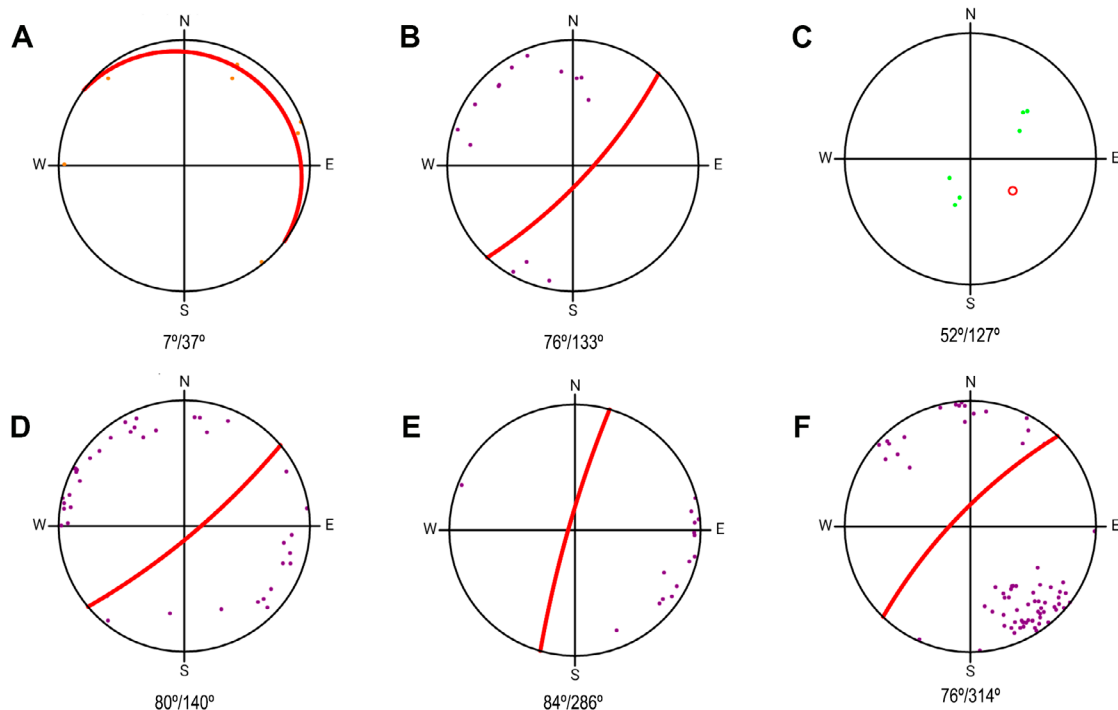


Figura 4. Projeções estereográficas dos polos (pontos menores em A, B e D a F) e seus planos de falhas, e flancos de dobra em C (com respectivo eixo, em circunferência com contorno, branca por dentro) das medidas estruturais do embasamento no município de Exu, PE. (A) planos de falhas no ponto 21, 07°/037° (NE); (B) planos de falhas no ponto 37, 76°/133° (SE); (C) um regime de dobras em Chevron no ponto 37, com eixo/trend 52°/127° (SE); (D) planos de falhas no ponto 38, 80°/140° (SE); (E) planos de falhas no ponto 40, 84°/286° (NW); (F) planos de falhas nos pontos 41 e 42, 76°/314° (NW).

Formação Missão Velha (sensu Fambrini et al., 2011, 2020)

De acordo com Fambrini et al. (2011, 2020), a Formação Missão Velha é composta em parte por arenitos conglomeráticos com abundante preservação de troncos fósseis constituídos por sílex, e seria correspondente à fase da sequência de Início de Rifte a Clímax de Rifte Inferior, de idade Neojurássico-Eocretáceo. Em campo, foram encontradas seis ocorrências interpretadas como Formação Missão Velha (pontos 5, 7, 23, 49, 53, 55), todas de pequena abrangência e localizadas na borda da bacia, entre o embasamento (Figura 5A) e a Formação Romualdo (Figura 5B). A unidade foi identificada pela enorme quantidade de troncos fossilizados aflorantes, todos silicificados (pontos 5, 7, 23 e 55), típicos da Formação Missão Velha, havendo alguns blocos e matacões de arenitos aluvionares próximos aos fragmentos de sílex (não foi encontrado fósseis nos pontos 49 e 53). A Figura S2 – Documento Suplementar 2, mostra alguns dos troncos fósseis recuperados.

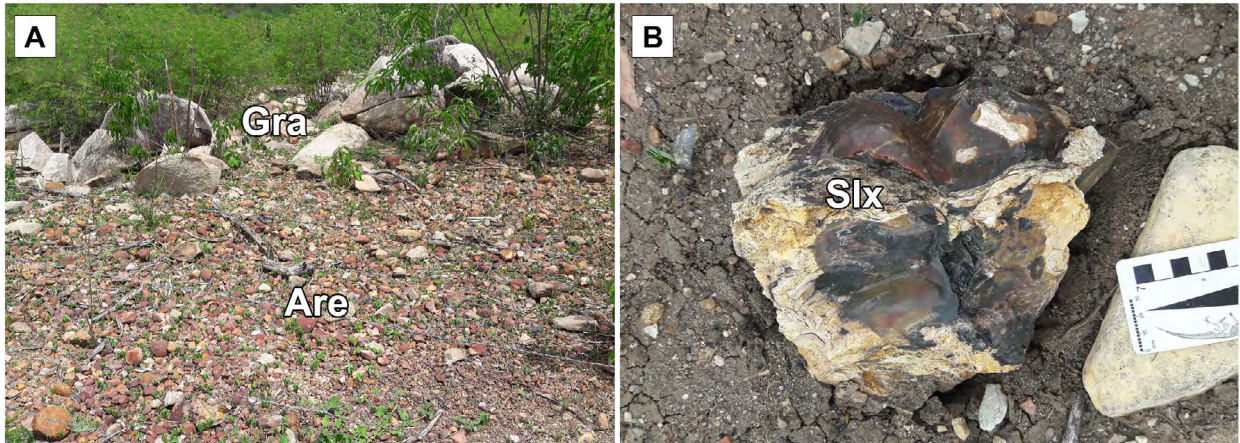
Formação Romualdo (sensu Neumann e Cabrera, 1999)

De acordo com Neumann e Cabrera (1999), essa unidade é composta por folhelhos escuros contendo concreções calcárias (em grande parte com preservação de fósseis). Segundo Fambrini et al. (2020), essa unidade pertence à sequência

Pós-rifte Inferior, de idade aptiano-albiana e foi reconhecida em 14 afloramentos (pontos 1-4, 6 e 8-16), em uma faixa orientada aproximadamente E-W, ao longo das bordas na base da chapada. Observou-se que o folhelho escuro, bastante intemperizado, ocorre sob a forma de solo massapê, com enorme quantidade de concreções calcárias aflorantes (Figura 6). Centenas de fósseis foram recuperados nessa formação, ao longo de quatro anos, com uma assembleia paleoictiológica típica da Formação Romualdo (Polck et al., 2015). Alguns dos materiais recuperados estão listados no Documento Suplementar 3 deste artigo, e a maioria foram publicados separadamente (Aureliano et al., 2014; Prado et al., 2018a, 2018b; Cavalcanti e Barreto, 2019; Pereira et al., 2022). Um perfil estratigráfico foi realizado na região do Sítio Zé Gomes, aproveitando uma atividade de garimpo (Figura 7). Esse perfil evidencia sucessivas alternâncias entre folhelhos com concreções calcárias e pacotes de arenitos calcíferos. Desde a Formação Romualdo aflorante no topo do perfil, a fácies arenito calcífero de granulação fina torna-se mais presente em direção à base, onde ocorrem finas lentes de gipsita (Figura 7).

Formação Exu

De acordo com Fambrini et al. (2020), a Formação Exu é composta por arenitos aluvionares avermelhados referentes à fase de sequência Pós-Rifte Superior de idade Albiano-Cenomaniano. Em campo, esta unidade é representada por



Are: arenito; Gra: granitoide; Slx: sílex

Figura 5. Afloramentos da Formação Missão Velha no município de Exu, PE. (A) arenito da Formação Missão Velha em contato com granitoide do embasamento no ponto 62; (B) bloco de sílex rolado da Formação Missão Velha, em contato com a Formação Romualdo (ponto 1).

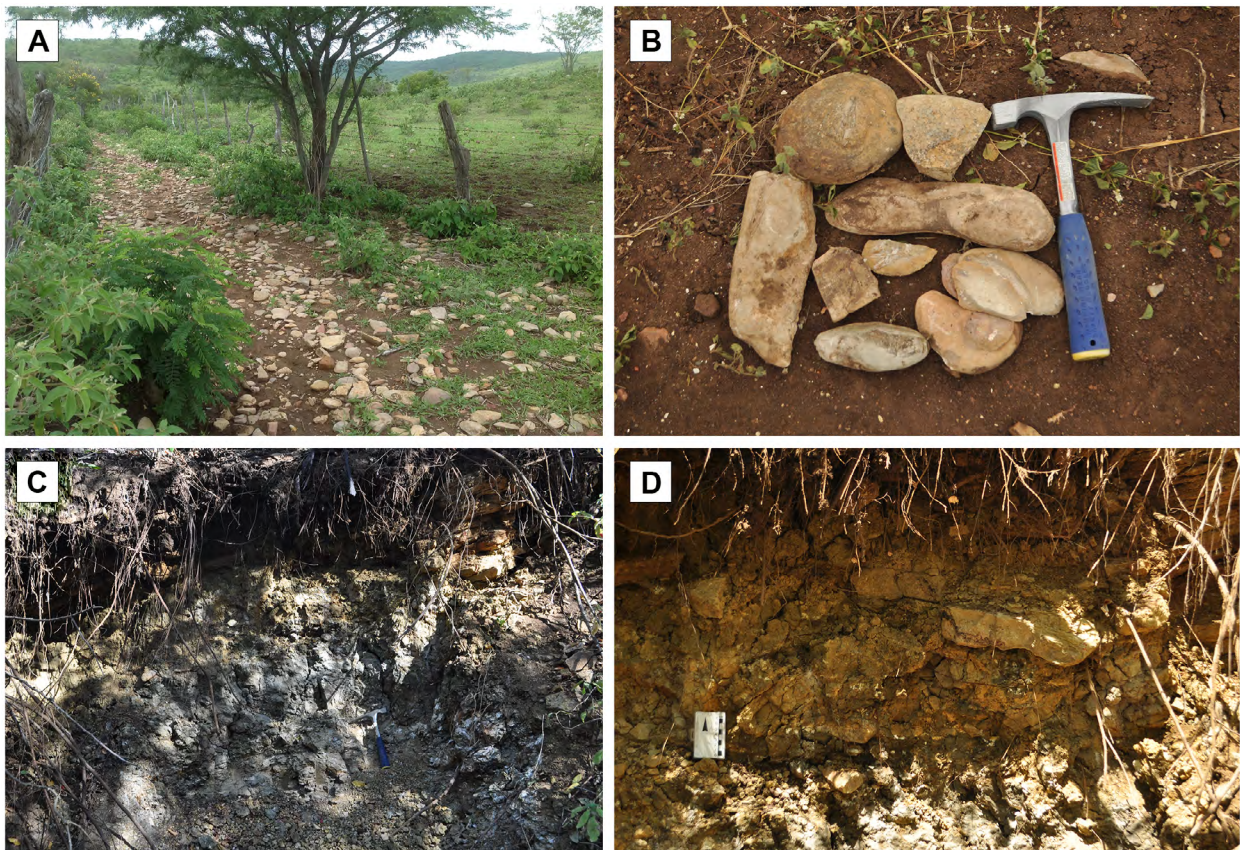


Figura 6. Afloramentos da Formação Romualdo no município de Exu, Pernambuco. (A) típica exposição da unidade na zona rural do Distrito de Saudade, sob a forma de solo massapê rico em concreções calcárias; (B) detalhe das concreções calcárias. Os fósseis são comumente preservados em excelente qualidade; (C) perfil da unidade apresentando sucessão de folhelhos com concreções e níveis com calcarenito, com visão mais detalhada em; (D) Escala em D = 7 cm.

arenitos aluvionares avermelhados, com presença de canais, estratificações cruzadas de pequeno porte (Figuras 8, 9) e se estende de E-NW a W-SE. Medidas de paleocorrentes foram realizadas em quatro pontos de altitudes distintas, localizados a oeste e a leste da área (Figura 9). Observa-se,

tanto em escala de afloramento, quanto nas medidas obtidas, alternância na orientação do fluxo dos paleocanais (Figura 10). A média de paleocorrentes na cota de 768 m de altitude é $11^{\circ}/269^{\circ}$ (*trend* para W - ponto 25). A média para depósitos das camadas superiores (825 m) é $06^{\circ}/056^{\circ}$ (*trend*

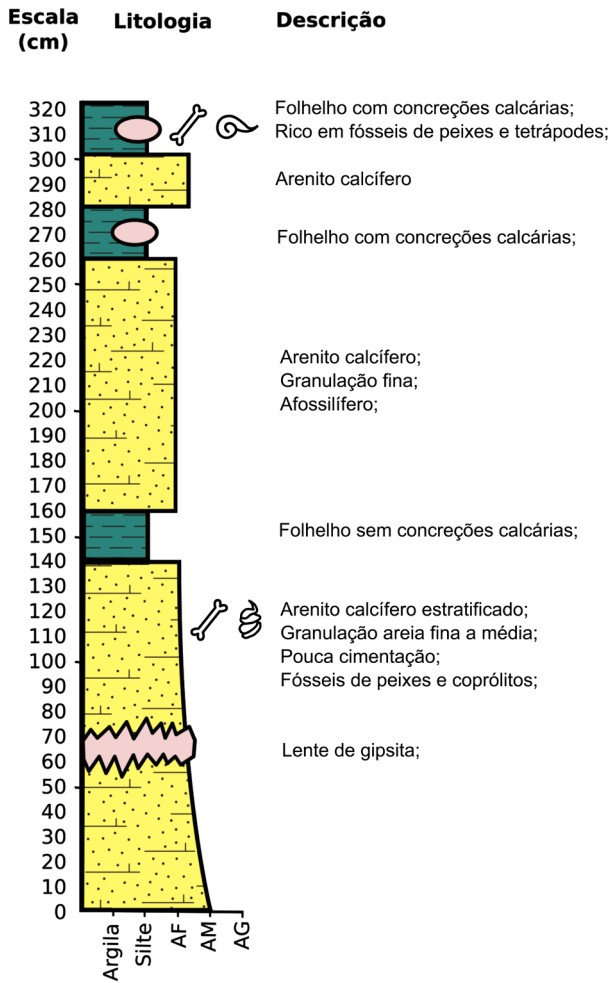


Figura 7. Perfil estratigráfico do Ponto 2, Formação Romualdo, no Sítio Zé Gomes.

para NE - ponto 26). Em camadas a 829 m, $58^{\circ}/234^{\circ}$ (*trend* para SW - ponto 39); a média para depósitos das camadas mais elevadas (850 m) é $31^{\circ}/336^{\circ}$ (*trend* para NW - ponto 65). Foram encontrados icnofósseis nesta unidade durante as atividades de mapeamento (Figura S3 – Documento Suplementar 2).

Interpretação dos mapas geofísicos

Os mapas radiométricos auxiliaram na distinção de corpos com diferentes contagens de radiação provenientes de cada elemento (Figuras 11A – 11D), permitindo identificar duas litologias dominantes do embasamento na região mapeada: granitoides e ortognaisses. No mapa de contagem de K (Figura 11A) há um maior destaque para o embasamento composto, majoritariamente, por granitoides e rochas metamórficas ortoderivadas no centro-sul da área mapeada, com uma orientação E-W. O embasamento na porção centro-leste também apresenta uma forte anomalia de eTh estreita, orientada E-W. O mapa de distribuição das conta-

gens de eU (Figura 11C) apresenta maior concentração na porção do embasamento orientado em um estreito corredor do centro a leste da área mapeada. O embasamento aflorante apresenta concentrações mais elevadas dos três elementos, caracterizado pela coloração mais escura no mapa ternário (Figura 11D).

O mapa de contagem de eTh (Figura 11B) apresenta altas concentrações desse elemento para as rochas que compõem o platô: os arenitos cretáceos da Formação Exu. A Formação Exu também apresenta moderadas concentrações pontuais de eU, embora ainda que em teores inferiores aos observados para o embasamento. O mapa com distribuição ternária dos radioelementos (K, eTh e eU; Figura 11D) apresenta uma anomalia de baixas contagens de K, altas contagens de eTh e médias a altas de eU associados aos arenitos da Formação Exu. Os folhelhos calcíferos da Formação Romualdo apresentam baixa a média contagem de K, e baixas de eTh e eU.

O mapa de campo magnético total obtido para a região de estudo (Figura 11E) apresentou dipolos magnéticos alongados com direção preferencial E-W e polarização normal em relação ao hemisfério sul. A derivada vertical desse campo magnético (Figura 11F) resalta o contraste entre as assinaturas magnéticas do embasamento (comportamento magnético perturbado) e a Bacia do Araripe (comportamento calmo). As setas em branco no mapa de derivada em Z (Figura 11F) delimita parte do embasamento aflorante, representada em campo por granitoides e ortognaisses.

DISCUSSÃO

O mapeamento efetuado (Mapa S1 – Documento Suplementar 1) indica que a Bacia do Araripe apresenta uma extensão para o sul maior do que a proposta por trabalhos anteriores (Neumann e Cabrera, 1999; Assine, 2007; Fambrini et al., 2020), estendendo-se ao longo do sopé do penhasco, em uma faixa quase sempre estreita, orientada, aproximadamente E-W, sendo bem mais larga a oeste (e.g., sítios Tabocas e Saudade) que a leste (Sítio Zé Gomes e Cedro). O perfil estratigráfico da Formação Romualdo (Figura 7) corrobora com a interpretação de Neumann e Cabrera (1999), no qual esta unidade registraria lagunas costeiras com sucessivas transgressões marinhas durante o Aptiano-Albiano. Segundo Assine (2007), o fluxo de drenagem nos afloramentos da Formação Exu é majoritariamente para oeste, havendo alternâncias pontuais em alguns estratos. Os dados coletados neste trabalho indicam uma predominância de fluxo de drenagem com direção N-W, corroborando com os resultados obtidos por esse autor.

As seguintes sequências da Bacia do Araripe foram identificadas: sequência de Início de Rife ao Clímax de Rife Inferior, de idade neojurássico-eocretáceo, caracterizado por arenitos fluviais de alta energia, abundantes em troncos fósseis, da porção inferior da Formação Missão Velha; Pós-rife Inferior, de idade aptiano-albiana, cons-

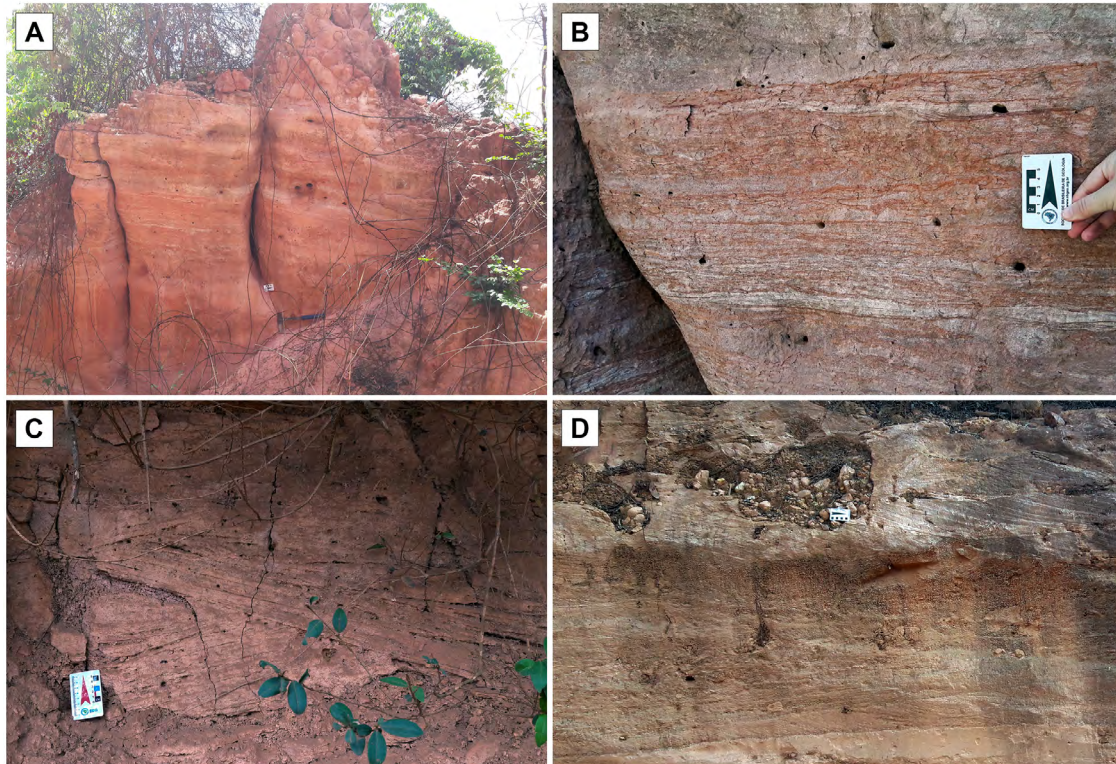


Figura 8. Arenitos aluvionares da Formação Exu aflorantes na região mapeada. (A) sucessão de arenitos de granulação grossa e média, com estratificação plano-paralela e cruzada de pequeno porte (ponto 25); (B) detalhe da porção mediana de A, mostrando a estratificação plano-paralela, intercalada com cruzada de pequeno porte, com paleocorrentes para oeste; (C) estratificações cruzadas acanaladas de médio porte no ponto 39; (D) pacote de arenito grosso, sobreposto por um de granulação média apresentando estratificação cruzada de pequeno porte, com paleocorrentes direcionadas para noroeste (ponto 65).

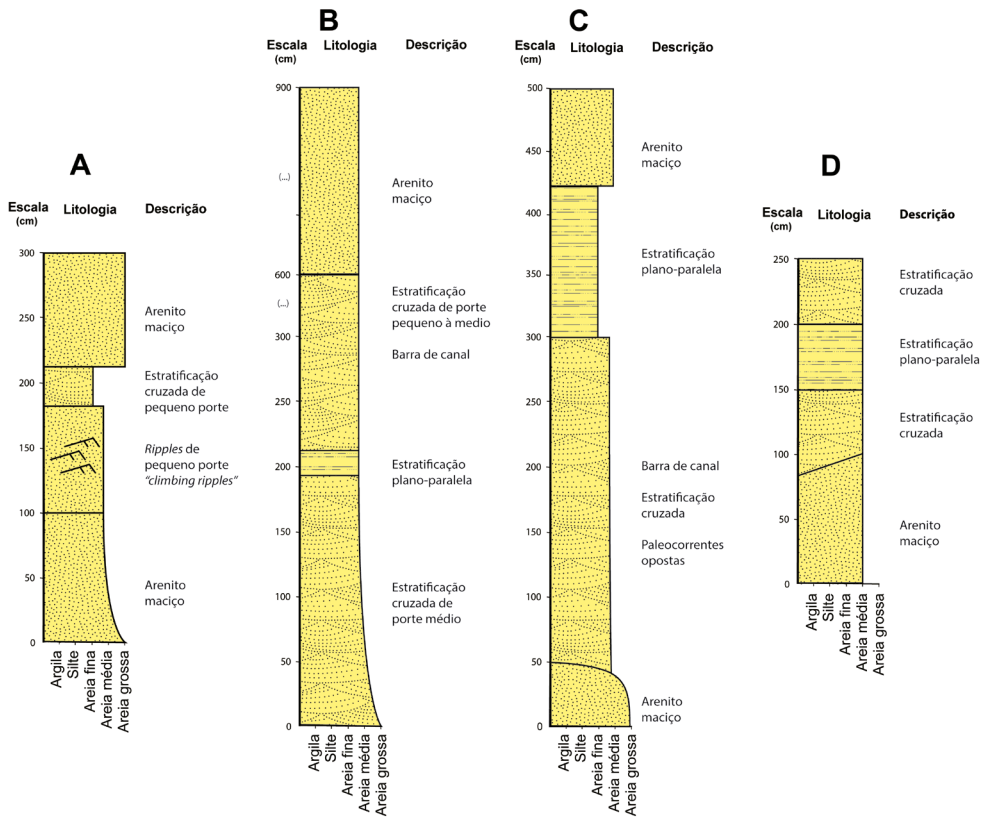


Figura 9. Perfis estratigráficos dos arenitos da Formação Exu, na área mapeada. (A) ponto 25 (768 m de altitude); (B) ponto 26 (825 m); (C) ponto 39 (829 m); (D) ponto 65 (850 m).

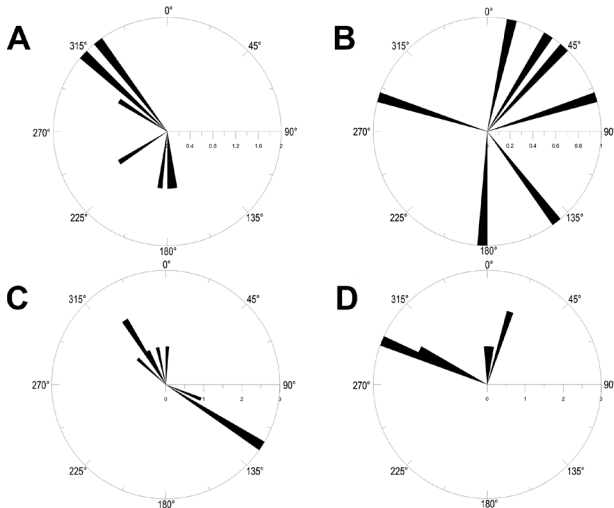


Figura 10. Diagramas em roseta com a direção das paleocorrentes medidas na Formação Exu, no município de Exu, PE. A: ponto 25, 11°/269° (W); B: ponto 26, 06°/056° (NE); C: ponto 39, 58°/234° (SW); D: ponto 65, 11°/269° (NW).

tituído pelo registro lagunar costeiro, com transgressões marinhas, ricos em fósseis preservados em concreções calcárias da Formação Romualdo; e, por fim, Pós-Rifte Superior, de idade albiano-cenomaniano, caracterizado pelos sedimentos aluviais da Formação Exu. Como é esperado para bordas de bacias, há um notável estreitamento dos pacotes sedimentares das formações Missão Velha e Romualdo. Uma peculiaridade da área mapeada é a presença de um grande hiato entre a sequência de início de rifte e o pós-rifte interior.

A aplicação de métodos geofísicos para o mapeamento da Bacia do Araripe se mostrou eficiente. A gamaespectrometria foi efetiva para delinear unidades, tanto da bacia, quanto do seu embasamento. A magnetometria somente foi útil para delinear o contato da borda da bacia com o embasamento cristalino. Os dados radiométricos foram muito eficazes para mapear os arenitos da Formação Exu, com claras anomalias de alto teor de eTh, e baixo K. A Formação Romualdo apresentou um contraste químico que a permitiu

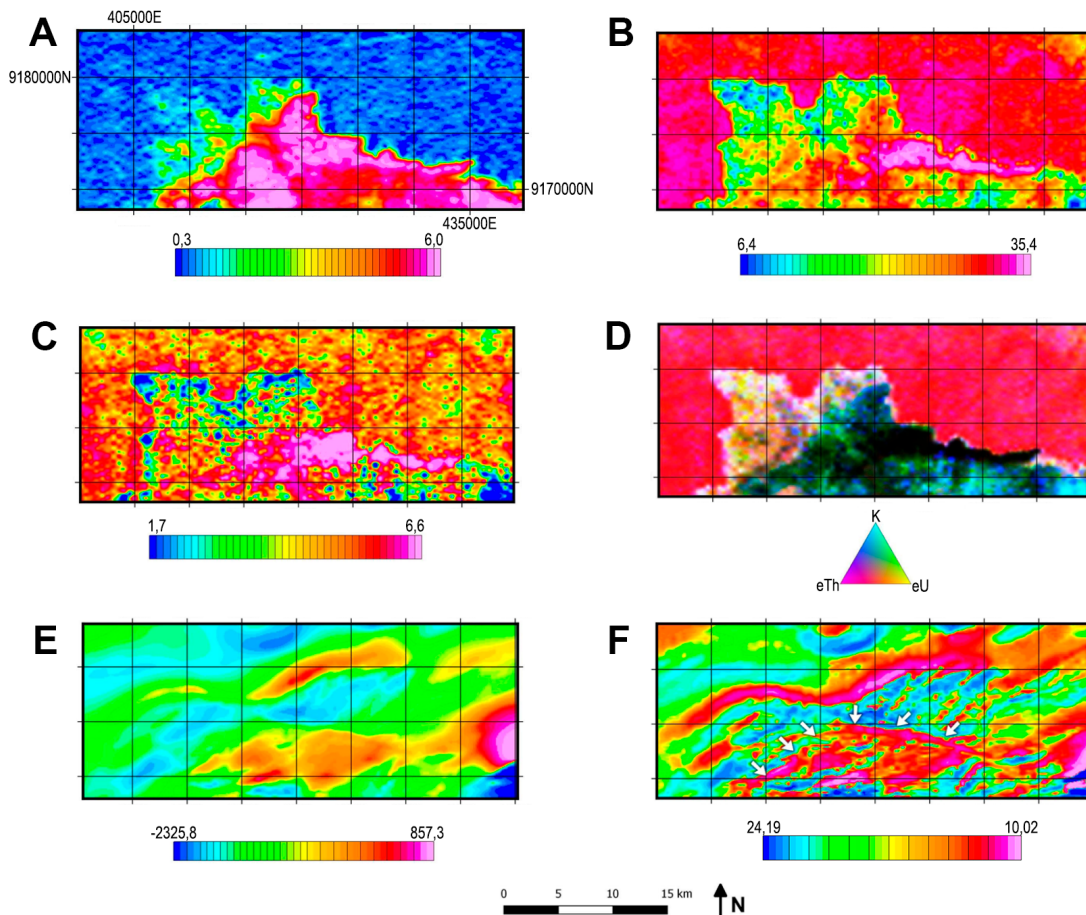


Figura 11. Gamaespectrometria e magnetometria da área mapeada. (A-C) mapa radiométrico de anomalias de Potássio (K), Tório (eTh) e Urânio (eU), respectivamente; (D) mapa radiométrico ternário. Unidade da escala em porcentagem (%) em A e D. Unidade da escala em partes por milhão (ppm) em B e C; (E) mapa de contorno do campo magnético anômalo (reduzido do IGRF); (F) mapa de contorno da 1ª derivada vertical do campo magnético total (reduzido do IGRF). Setas brancas indicam o contorno teórico do embasamento aflorante, onde em campo foram encontrados granitoides e ortognaisses. Unidade da escala em nanotesla (nT). Dados coletados provenientes do CPRM.

diferenciar, ainda que de maneira difusa, do embasamento e da Formação Exu. Esse resultado é promissor, pois demonstra o potencial do uso dessa ferramenta para encontrar novos sítios fossilíferos, dada a relevância paleontológica dessa unidade. Contudo, na janela analisada, e apenas com os dados de K, eTh, e eU, não foi possível diferenciar quimicamente os afloramentos interpretados como Formação Missão Velha em relação aos da Formação Romualdo. Portanto, a eficácia da replicagem dessas técnicas para o mapeamento de unidades fossilíferas em outros contextos dependerá das condições geológicas específicas da área a ser analisada. Sugerimos, por fim, que esta análise seja replicada em outros contextos e bacias com a finalidade de testar a eficácia na detecção de unidades sedimentares de interesse.

CONCLUSÃO

O uso complementar de gamaespectrometria e magnetometria para auxiliar o mapeamento a partir de dados geológicos coletados em campo se provou eficaz para unidades da borda sul-sudeste da Bacia do Araripe. Os destaques principais do estudo foram:

- O mapeamento da Bacia do Araripe indica que sua extensão para o sul é maior do que proposto em trabalhos anteriores, estendendo-se ao longo do sopé do penhasco em uma faixa estreita, orientada aproximadamente E-W, com maior largura a oeste (sítios Tabocas e Saudade) do que a leste (Sítio Zé Gomes e Cedro);
- O perfil estratigráfico da Formação Romualdo corrobora a interpretação de que esta unidade registra lagunas costeiras com sucessivas transgressões marinhas durante o Aptiano-Albiano;
- Os dados coletados indicam predominância de fluxo de drenagem com direção N-W na Formação Exu, em concordância com resultados de outros trabalhos;
- Foram identificadas três sequências da Bacia do Araripe: Início de Rifte ao Clímax de Rifte Inferior (neojurássico-eocretáceo), Pós-rifte Inferior (aptiano-albiano) e Pós-Rifte Superior (albiano-cenomaniano), cada uma com características sedimentares distintas;
- A aplicação de métodos geofísicos mostrou-se eficiente para mapear a Bacia do Araripe. A gamaespectrometria foi efetiva para delinear unidades tanto da bacia quanto do embasamento, enquanto a magnetometria foi útil apenas para delinear o contato da borda da bacia com o embasamento cristalino;
- Os dados radiométricos foram eficazes para mapear os arenitos da Formação Exu, com alta concentração de eTh e baixa de K. A Formação Romualdo também apresentou um contraste que permitiu diferenciá-la do embasamento e da Formação Exu;
- No entanto, a análise com base apenas nos dados de K, eTh e eU não possibilitou a diferenciação química dos afloramentos interpretados como Formação Missão Velha em relação à Formação Romualdo.

Por fim, sugere-se que a análise seja replicada em outros contextos e bacias para testar a eficácia da detecção de unidades sedimentares de interesse, especialmente em relação à relevância paleontológica da Formação Romualdo.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Vanessa Biondo, José Antonio Barbosa, e revisores anônimos, por todos os comentários realizados em uma versão anterior deste estudo; à Alcina Barreto e equipe, por conduzirem parte das excursões de campo na região; à Genilma, Cícero e Antonio Alencar, pelo suporte de campo em Exu; e ao SGB-CPRM pelo fornecimento das fotografias aéreas e dos mapas da região. À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP 09/2023), Fundação Norte-Rio-Grandense de Pesquisa e Cultura (FUNPEC-UFRN/PIB21712-2023) pelos financiamentos dos autores e ao projeto “Jovens Pesquisadores” da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

BIBLIOGRAFIA

- Angelim, L. A. A., Vasconcelos, A. M., Gomes, J. R. C. Wanderley, A. A. Forgiarini, L. L., Medeiros, M. F. (2004). *Folha SB-24-Jaguaribe. Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, SIG. Programa Geologia do Brasil*. Brasília: SGB-CPRM, CD-ROM. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/4978>. Acesso em: 119 mar. 2024.
- Argles, T. W. (2010). Recording structural information. In: Coe, A.L., (org.) *Geological Field Techniques*; (Chapter 8, p. 163-191). Walton Hall: Wiley-Blackwell Publishing.
- Assine, M. L. (2007). Bacia do Araripe. *Boletim de Geociências da PETROBRAS*. 15, 371-89
- Aureliano, T., Ghilardi, A. M., Duque, R. R. C., Barreto, A. M. F. (2014). On the occurrence of Pterosauria in Exu, Pernambuco (Lower Cretaceous Romualdo Formation, Araripe Basin), Northeastern Brazil. *Estudos Geológicos*, 24(2), 15-27. Disponível em: https://www.academia.edu/25784005/On_the_Occurrence_of_Pterosauria_in_Exu_Pernambuco_Lower_Cretaceous_Romualdo_Formation_Araripe_Basin_Northeastern_Brazil. Acesso em: 06 dez. 2023.
- Carvalho, I. S., Freitas, F. I., Neumann, V. (2012). Chapada do Araripe. In: Hasui, Y., Carneiro, C., Almeida, F., Bartorelli, A., (orgs.) *Geologia do Brasil*. São Paulo: Beca; 900 p.
- Cavalcanti, R. R., Barreto, A. M. F. (2019). Novos Sítios Fossilíferos da Formação Romualdo, Cretáceo Inferior, Bacia do Araripe, Exu, Pernambuco, Nordeste do Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências*. 41(1), 5-14. https://doi.org/10.11137/2018_1_05_14

- Cisneros, J. C., Raja, N. B., Ghilardi, A. M., Dunne, E. M., Pinheiro, F. L., Regalado Fernández, O. R., Sales, M. A. F., Rodríguez-de la Rosa, R. A., Miranda-Martínez, A. Y., González-Mora, S., Bantim, R. A. M., Lima, F. J., Pardo, J. D. (2022). Digging deeper into colonial palaeontological practices in modern day Mexico and Brazil. *Royal Society and Open Science*, 9(3), 210898. <https://doi.org/10.1098/rsos.210898>
- Fambrini, G. L., Lemos, D. R., Tesser Jr., S., Araújo, J. T., Silva-Filho, W. F., Souza, B. Y. C., Neumann, V. H. M. L. (2011). Estratigrafia, arquitetura deposicional e faciologia da formação Missão Velha (Neojurássico-Eocretáceo) na área-tipo, bacia do Araripe, nordeste do Brasil: exemplo de sedimentação de estágio de início de rifte a clímax de rifte. *Geologia USP. Série Científica*, 11(2), 55-87. <https://doi.org/10.5327/z1519-874x2011000200004>
- Fambrini, G. L., Menezes-Filho, J. A. B., Jesuíno, P. C. L., Araújo, J. T., Durval, L. G. L., Neumann, V. H. M. L. (2015). Sucessão Faciológica da Formação Barbalha, Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Estudos Geológicos*, 25, 137-64. <https://doi.org/10.18190/1980-8208/estudosgeologicos.v25n1p137-164>
- Fambrini, G. L., Silvestre, D. C., Barreto Jr., A. M., Silva-Filho, W. F. (2020). Estratigrafia da Bacia do Araripe: estado da arte, revisão crítica e resultados novos. *Geologia USP. Série Científica*, 20(4), 169-212. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v20-163467>
- Feres, R. (2002). *Análise de processos de erosão acelerada, com base em fotografias aéreas e geoprocessamento: Bacia do Rio Bonito (Descalvado, SP)*. Tese (Doutorado). São Carlos: Universidade Federal de São Carlos. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/1611>. Acesso em: 06 dez. 2023.
- Gray, J. (2008). Quantum GIS: The open-source geographic information system(GIS). *Linux J.*, 2008(8). Disponível em: <https://www.linuxjournal.com/magazine/quantum-gis-open-source-geographic-information-system>. Acesso em: 12 mar. 2024.
- Guzmán, J., Fambrini, G. L., Oliveira, E. V., Usma, C. D. (2015). Estratigrafia da Bacia de Jatobá: estado da arte. *Estudos Geológicos*, 25(1), 53-76. <https://doi.org/10.18190/1980-8208/estudosgeologicos.v25n1p53-76>
- Guzmán-González, J., Sial, A. N., Piovesan, E. K., Oliveira, E. V., Fambrini, G. L. (2020). Paleolimnological reconstruction of a marginal area of Jurassic Capianga Lake, Jatobá Basin, northeast Brazil. *Journal of Paleolimnology*, 63, 113-128. <https://doi.org/10.1007/s10933-019-00105-0>
- Herman, L., Řezník, T., Stachoň, Z. (2017). Others. Achieving 3D Thematic Cartography through Open Source: Synergy of QGIS and Three.js. *28th International Cartographic Conference*. Brun, República Tcheca
- Disponível em: <https://www.muni.cz/en/research/publications/1385178>. Acesso em: 12 mar. 2024.
- Kearey, P., Brooks, M., Hill, I. (2009). *Geofísica de exploração*. São Paulo: Oficina de textos.
- Matos, R. M. D. (1992). The northeast Brazilian rift system. *Tectonics*. 11(4), 766-791. <https://doi.org/10.1029/91TC03092>
- Menezes, L. (2004). *Mapeamento digital de análogos a reservatórios petrolíferos: exemplos para depósitos fluviais da Unidade Açú-3 - Bacia Potiguar*. Dissertação (Mestrado). Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/18764>. Acesso em: 12 mar. 2024.
- Montaj, O. (2007). *Geosoft mapping and application system*. Inc, Suit 500, Richmond St. West Toronto, ON Canada N5SIV6.
- Neumann, V. H., Cabrera, L. (1999). Una nueva propuesta estratigráfica para la tectonosecuencia post-rifte de la cuenca de Araripe, noreste de Brasil. *V Simpósio Cretáceo Brasileiro*, 279-285. Serra Negra: UNESP.
- Pereira, P. A., Prado, L. A. C., Araripe, R. V. C., Oliveira, D. H., Lemos, F. A. P., Silva Lobo, L. R., Tomé, M. E. T., Barreto, A. M. F. (2022). Gastropods Colour Patterns in Cassiopids and Naticids from Romualdo Formation, Araripe Basin, Northeast Brazil. *Anuário do Instituto de Geociências*, 45, 16p. https://doi.org/10.11137/1982-3908_2022_45_51358
- Pix4D (2021). *Pix4D*, versão 2.1.49. Pix4D SA. Disponível em: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/115005738363-Technical-release-notes-PIX4Dmapper>. Acesso em: 06 dez. 2023.
- Polck, M. A. R., Carvalho, M. S. S., Miguel, R., Gallo, V. (2015). *Guia de identificação de peixes fósseis das formações Crato e Santana, da Bacia do Araripe*. SGB-CPRM. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/15689>. Acesso em: 06 dez. 2023.
- Prado, L. A. C., Luque, J., Franca Barreto, A. M., Palmer, A. R. (2018a). New brachyuran crabs from the Aptian–Albian Romualdo Formation, Santana Group of Brazil: evidence for a tethyan connection to the Araripe Basin. *Acta Palaeontologica Polonica*, 63(4), 737-750. <https://doi.org/10.4202/app.00480.2018>
- Prado, L. A. C., Fambrini, G. L., Barreto, A. M. F. (2018b). Tafonomy of macroinvertebrates and Albian marine ingressión as recorded by the Romualdo Formation (Cretaceous, Araripe Basin, Brazil). *Brazilian Journal of Geology*, 48(3), 519-531. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201820180048>

- Ramos, G. M. S., Araujo, A. F. L., Barbosa, J. A., Celestino, A. M. L., Correia Filho, O. J., Alencar, M. L., Miranda, T. S., Neumann, V. H. M. L., Topan, J. G. (2020). Estimation of compaction rates for a tight carbonate reservoir based in analyses of diagenetic concretions. Rio Oil & Gas Expo and Conference 2020. Rio de Janeiro: *Technical Papers*. <https://doi.org/10.48072/2525-7579.rog.2020.036>
- Rosa, M. C., Morales, N., Assine, M. L. (2023). Trans-tensional tectonics during the Gondwana breakup in northeastern Brazil: Early Cretaceous paleostress inversion in the Araripe Basin. *Tectonophysics*, 846, 229666. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229666>
- Silva, M. A. M. (1983). *The araripe basin, Northeastern Brazil: regional geology and facies analysis of a lower cretaceous evaporitic depositional complex*. PhD (Theses). Columbia University, 8406549. Disponível em: <https://www.proquest.com/docview/303139057?pq-origsite=gscholar&fromopenview=true&-sourcetype=Dissertations%20&%20Theses>. Acesso em: 06 dez. 2023.
- SGB-CPRM. Serviço Geológico do Brasil. (2006). *Projeto Aerogeofísico Pernambuco-Piauí: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos*. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/10138>. Acesso em: 06 dez. 2023.
- Weber, E., Hasenack, H., Ferreira, C. J. S. (2004). *Adaptação do modelo digital de elevação do SRTM para o sistema de referência oficial brasileiro e recorte por unidade da federação*. Porto Alegre: UFRGS, Centro de Ecologia.
- Zeng, A., Zeng, K., Gil, Y., Mookerjee, M. (2014). An overview of mobile applications for field science. *GeoSoft Project Report*. Disponível em: <https://www.isi.edu/~gil/papers/Report-MobileApplicationsForFieldScience-Sept2014.pdf>. Acesso em: 06 dez. 2023.