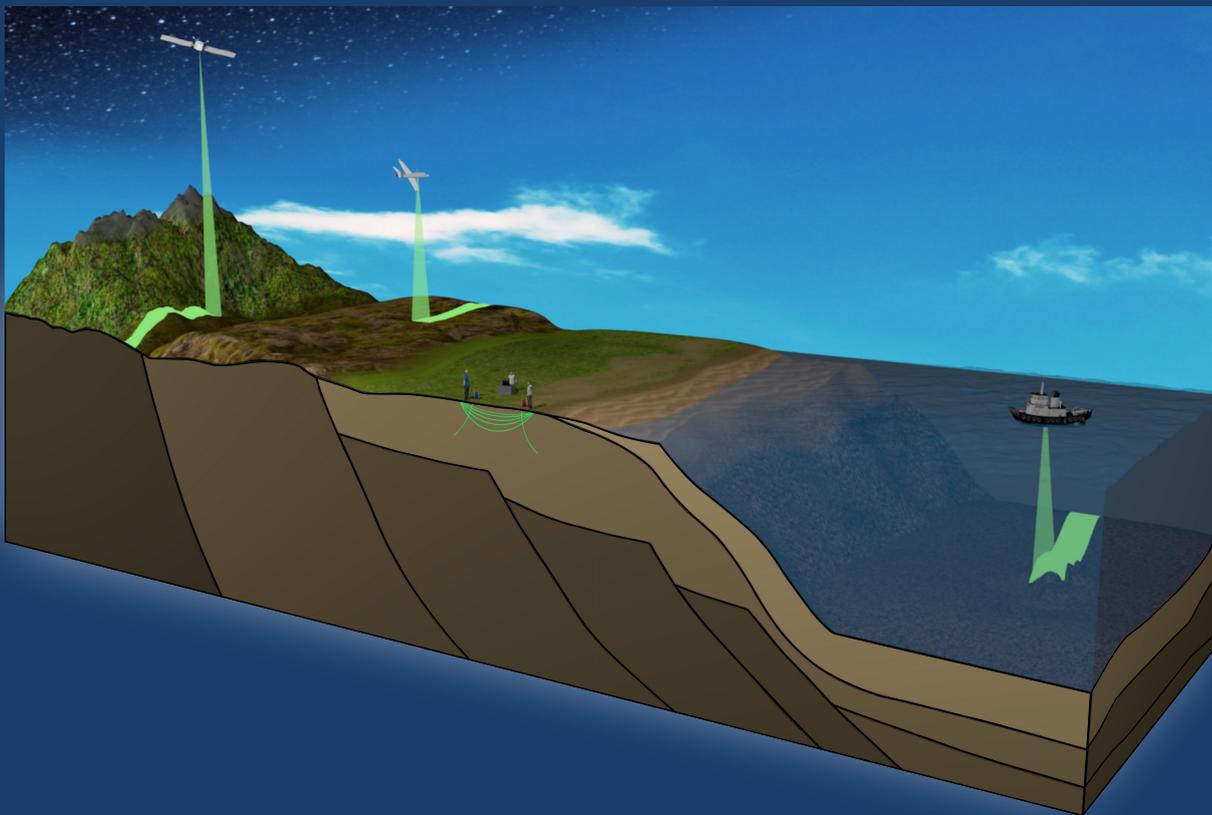


INFORME DE GEOFÍSICA APLICADA Nº9



SISMICIDADE DO ESTADO DO CEARÁ



MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

Ministro de Estado

Alexandre Silveira

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB/CPRM)

DIRETORIA EXECUTIVA

Diretor-Presidente interino

Cassiano de Souza Alves

Diretor de Geologia e Recursos Minerais interino

Paulo Afonso Romano

Diretora de Hidrologia e Gestão Territorial

Alice Silva de Castilho

Diretor de Infraestrutura Geocientífica

Paulo Afonso Romano

Diretor de Administração e Finanças

Cassiano de Souza Alves

COORDENAÇÃO TÉCNICA

Chefe do Departamento de Geologia

Valter Rodrigues Santos Sobrinho

Chefe da Divisão de Sensoriamento Remoto e Geofísica

Luiz Gustavo Rodrigues Pinto

Chefe da Divisão de Geoquímica

Silvana de Carvalho Melo

Chefe da Divisão de Geologia Básica

Patrick Araújo dos Santos

Chefe do Departamento de Recursos Minerais

Marcelo Esteves Almeida

Chefe do Departamento de Informações Institucionais

Edgar Shinzato

Chefe da Divisão de Documentação Técnica

Roberta Pereira da Silva de Paula

Chefe do Departamento de Relações Institucionais e Divulgação

Patrícia Durringer Jacques

Chefe do Núcleo de Comunicação

Heber Vieira de Oliveira

Chefe da Divisão de Editoração Geral

Lucas Victor de Alcântara Estevão

Chefe da Divisão de Marketing e Divulgação

Guilherme de Oliveira Silva Pinheiro

RESIDÊNCIA DE FORTALEZA

Chefe da Residência

Maria da Guia Lima

Assistente de Produção de Geologia e Recursos Mineais

Edney Smith de Moraes Palheta

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL
SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM
DIRETORIA DE GEOLOGIA E RECURSOS MINERAIS
PROGRAMA GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL

**LEVANTAMENTOS GEOLÓGICOS
E INTEGRAÇÃO GEOLÓGICA REGIONAL**

**SISMICIDADE DO
ESTADO DO CEARÁ**

AUTORES

Frederico Ricardo Ferreira Rodrigues de Oliveira e Sousa
Iramaia Furtado Braga
Marcos Vinícius Ferreira

INFORME DE GEOFÍSICA APLICADA
Nº 09



FORTALEZA
2023

REALIZAÇÃO

Residência de Fortaleza

COORDENADOR DO PROJETO

Frederico Ricardo Ferreira Rodrigues de Oliveira Sousa

ASSISTENTE DE PRODUÇÃO DE GEOLOGIA E RECURSOS MINERAIS

Edney Smith de Moraes Palheta

COMPATIBILIZAÇÃO E REVISÃO GERAL

Luiz Gustavo Rodrigues Pinto

CRÉDITOS DE AUTORIA POR CAPÍTULO**1. Introdução**

Frederico Ricardo F. R. de O. e Sousa
Marcos Vinícius Ferreira

2. Métodos

Frederico Ricardo F. R. de O. e Sousa
Iramaia Furtado Braga

3. Resultados

Frederico Ricardo F. R. de O. e Sousa
Iramaia Furtado Braga

4. Discussão

Frederico Ricardo F. R. de O. e Sousa
Iramaia Furtado Braga

5. Conclusões

Frederico Ricardo F. R. de O. e Sousa
Iramaia Furtado Braga

6. Referências

Frederico Ricardo F. R. de O. e Sousa
Iramaia Furtado Braga
Marcos Vinícius Ferreira

COLABORADORES

Felipe Grandjean Costa

CRÉDITOS AUTORAIS

Frederico Ricardo F. R. de O. e Sousa
Iramaia Furtado Braga
Marcos Vinícius Ferreira

APOIO TÉCNICO**REVISÃO ORTOGRÁFICA**

Irinéa Barbosa da Silva

NORMALIZAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

Margareth Lopes Moraes

PROJETO GRÁFICO/EDITORAÇÃO**Capa**

DIEDIG

Miolo (DIEDIG)

Agmar Alves Lopes

Diagramação (DIEDIG)

DIEDIG

Serviço Geológico do Brasil – CPRM

www.cprm.gov.br
seus@cprm.gov.br

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

S725a	Sousa, Frederico Ricardo Ferreira Rodrigues de Oliveira e. Sismicidade do estado do Ceará / Frederico Ricardo Ferreira Rodrigues de Oliveira e Sousa, Iramaia Furtado Braga, Marcos Vinícius Ferreira. - Fortaleza : CPRM, 2023. 1 recurso eletrônico : PDF. – (Informe de geofísica aplicada ; 9) Levantamentos geológicos e integração geológica regional. ISBN 978-65-5664-354-0 1.Geofísica. I. Braga, Iramaia Furtado. II. Ferreira, Marcos Vinícius. III. Título. IV. Série. CDD 550
-------	--

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Teresa Rosenhayme CRB/7 5662

Direitos desta edição: Serviço Geológico do Brasil – CPRM
Permitida a reprodução desta publicação desde que mencionada a fonte.

APRESENTAÇÃO

O conhecimento geológico do território brasileiro constitui um instrumento indispensável para o planejamento e a execução das políticas públicas voltadas para o desenvolvimento sustentável dos recursos minerais e, simultaneamente, é fonte de dados imprescindível para o conhecimento e gestão do meio físico.

É com esta premissa que o **Serviço Geológico do Brasil – CPRM** tem a grata satisfação de disponibilizar à comunidade técnico-científica, aos empresários do setor mineral e à sociedade em geral mais este produto, o **Informe de Geofísica Aplicada**, vinculado ao **Programa Geologia, Mineração e Transformação Mineral**.

Com os expressivos investimentos realizados nos últimos anos em Geofísica, seja na aquisição de dados aerogeofísicos, seja na aquisição de equipamentos de geofísica terrestre, trabalhos de excelente qualidade de aplicação de dados geofísicos para solução de problemas geológicos vêm sendo desenvolvidos pelos pesquisadores do SGB-CPRM.

Entendendo a importância de divulgar amplamente os trabalhos e as experiências em Geofísica, foi criada esta nova linha editorial, concebida no Departamento de Geologia e na Divisão de Sensoriamento Remoto e Geofísica, que permite aos pesquisadores explorar e apresentar de forma mais detalhada os trabalhos realizados em projetos técnicos, demonstrando a diversidade e potencialidade de aplicação.

Este Informe de Geofísica Aplicada contribui para a compreensão de um dos fenômenos geológicos recorrentes no Nordeste brasileiro e, em especial, no território cearense: a sismicidade intraplaca na crosta continental brasileira. A partir de uma caracterização do arcabouço tectônico-estrutural regional via dados de campo e aerogeofísicos, e sua correlação com dados sismológicos, este trabalho avança no entendimento quanto à identificação de falhas sísmicas ativas e o campo de stress atuante nessa porção da crosta. Conseqüentemente, seus resultados também ajudam no aprimoramento da cartografia geológica e na identificação de áreas de risco geológico no estado. A indicação de zonas sísmicas ativas e sua relação com eventos tectônicos, certamente, norteará trabalhos futuros detalhados de levantamentos geológico nessas regiões do território cearense.

Com mais este lançamento, o Serviço Geológico do Brasil – CPRM dá continuidade à política governamental de atualizar o conhecimento geológico do país, através dos levantamentos geológicos básicos, geoquímicos e geofísicos, e da avaliação integrada das informações, fundamental para o desenvolvimento regional e importante subsídio à formulação de políticas públicas e de apoio à tomada de decisão de investimentos. Este produto está disponível para *download* no banco de dados corporativo do Serviço geológico do Brasil – CPRM, o GeoSGB (<http://geosgb.cprm.gov.br>), e no Repositório Institucional de Geociências (<http://rigeo.cprm.gov.br/>).

Cassiano de Souza Alves
Diretor-Presidente interino

Paulo Afonso Romano
Diretor de Geologia e Recursos Minerais interino

RESUMO

Este trabalho apresenta uma revisão sobre aspectos centrais da sismicidade intraplaca que ocorre na região do estado do Ceará e a sua associação com as principais estruturas geológicas presentes em seu arcabouço estrutural, baseando-se na correlação de dados geológicos, sismológicos e geofísicos compilados das bases de dados da Rede Sismográfica do Brasil (RSBR), do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e de publicações técnico-científicas. A distribuição espacial dos epicentros dos sismos ocorridos na região indica a presença de três zonas sísmicas ativas no estado: *i*) Zona Sísmica Médio Coreaú, na porção noroeste do estado; *ii*) Zona Sísmica Cascavel-Beberibe, na região costeira próximo à Zona Metropolitana de Fortaleza e *iii*) Zona Sísmica Quixeramobim, na porção central do Ceará. A análise das direções preferenciais das estruturas geológicas observadas no embasamento de cada uma dessas zonas sísmicas indicou que os padrões de deformação dúctil, obtido pela análise de atitudes de foliação, e rúptil, adquiridos pelo estudo das medidas de fraturas, mostraram-se correlatos aos padrões de lineamentos magnéticos interpretados dos mapas aerogeofísicos. Nas porções onde haviam mecanismos focais publicados, foi possível fazer uma comparação entre a cinemática de falha dos mecanismos focais e o padrão estrutural inferido pela associação entre dados geológicos (atitudes medidas de feições dúcteis e rúpteis) e aerogeofísicos (azimutes dos lineamentos magnéticos interpretados). Embora cada zona sísmica identificada neste trabalho esteja em uma posição diferente da crosta continental e possua rochas com características reológicas variadas, além de um arranjo estrutural próprio, existem alguns aspectos geológicos regionais que conectam essas áreas, como a espessura crustal e a presença do enxame de diques Rio Ceará-Mirim. A indicação de zonas sísmicas ativas, as principais estruturas, a cinemática e a relação com eventos tectônicos regionais e locais, de uma forma integrada, é o escopo da hipótese aqui apresentada para explicar a presença de sismicidade, a inflexão da máxima compressão horizontal (SHmax) para NW acompanhando o *trend* do enxame de diques Rio Ceará-Mirim, e o nível diferenciado de sismo intraplaca na Província Borborema Setentrional. Em virtude da relação espacial entre o *rift* da Bacia Potiguar, a disposição dos diques Rio Ceará-Mirim e o padrão de distribuição de SHmax, sugerimos que o processo de rifteamento dessa bacia ainda está ativo, dada a atividade sísmica localizada, e é o responsável pela rotação de SHmax observada nos dados de mecanismos focais. Os resultados obtidos respaldam a análise conjunta como ferramenta no estudo de mecanismos de falhas sísmicas ativas em regiões continentais e na compreensão do arcabouço estrutural.

Palavras-chave: Sismicidade intraplaca, Zonas sísmicas, Província Borborema

ABSTRACT

This work presents a review of central aspects of the intraplate seismicity that occurs in the state of Ceará, NE Brazil, and its association with the main geological structures. It is based on the correlation of geological, seismological, and geophysical data compiled from the databases of the Seismographic Network of Brazil (RSBR), the Geological Survey of Brazil (SGB/CPRM) and technical-scientific reports. The spatial distribution of the earthquake epicenters that occurred in the Ceará state indicates the presence of three active seismic zones: i) Médio Coreaú Seismic Zone, in the Northwest area of Ceará state; ii) Cascavel-Beberibe Seismic Zone, on the coast, close to the metropolitan area of the Fortaleza city and iii) Quixeramobim Seismic Zone, located in the central portion of the state. The preferential directions of the geological structures observed in the basement rocks of each one of these seismic zones indicated that the ductile deformation patterns, obtained by the analysis of measured foliations and brittle structures (fractures) presented a strong correlation with magnetic lineament patterns interpreted from aerogeophysical maps. In the portions where focal mechanisms were published in technical-scientific reports, it was possible to make a comparison between the kinematics of the focal mechanisms and the structural pattern inferred by the association of geological data (measured of ductile and brittle structures) and aerogeophysical data (azimuths of interpreted magnetic lineaments). Although each seismic zone identified in this work is in a different position of the continental crust (relative to the shoreline) and has rocks with distinct rheological characteristics, some regional geological aspects connect all these areas, such as the crustal thickness and the presence of the Rio Ceará-Mirim basaltic dike swarm. The correlation of active seismic zones with their main structures and its kinematics, and also the relationship with regional and local tectonic events, are the main points of the hypothesis presented here to explain the intraplate seismicity, the inflection of the maximum horizontal compression (SHmax) to the NW, following the trend of the Rio Ceará-Mirim dike swarm, and the differentiated level of intraplate earthquakes in the Northern Borborema Province. Due to the spatial relationship between the Potiguar Basin rift, the emplacement of the Rio Ceará Mirim dike swarm and the SHmax distribution pattern, it is suggestive that the rifting process of this basin is still active, with seismic activity, and possible responsible for the SHmax rotation observed in the focal mechanisms.

Keywords: *Intraplate seismicity, Seismic zones, Borborema Province*

SUMÁRIO

SUMÁRIO	6
1. INTRODUÇÃO	7
1.1. Zonas sísmicas ativas	7
1.1.1. Zona Sísmica do Médio Coreaú	9
1.1.2. Zona Sísmica Cascavel-Beberibe	11
1.1.3. Zona Sísmica Quixeramobim	12
1.2. Fatores que podem induzir a ocorrência de sismos intraplaca na América do Sul	12
1.2.1. Arquitetura crustal	12
1.2.2. Espessura crustal	13
1.2.3. Arcabouço estrutural	17
1.2.4. O campo de stress intraplaca	20
2. MÉTODOS	22
2.1. Análise do padrão estrutural	22
2.2. Aerogeofísica	22
3. RESULTADOS	24
3.1. Zona Sísmica do Médio Coreaú	24
3.1.1. Aerogeofísica	24
3.1.2. Estrutural	24
3.2. Zonas Sísmicas Cascavel-Beberibe e Quixeramobim	28
3.2.1. Aerogeofísica	28
3.2.2. Estrutural	28
3.3. Estimativas de Profundidade	31
4. DISCUSSÃO	37
4.1. Lineamentos magnéticos, o arcabouço estrutural, os sismos e o campo de <i>stress</i> . .	37
4.2. Eventos deformacionais formadores do arcabouço estrutural cearense.....	38
5. CONCLUSÕES	43
REFERÊNCIAS	44

1. INTRODUÇÃO

Com frequência cada vez maior, a população cearense tem tomado conhecimento de notícias sobre tremores de terra ocorrendo eventualmente em certas regiões do seu estado e, dessa maneira, livrando-se do mito de que terremotos não ocorrem no Brasil. De fato, zonas sísmicas ativas em regiões continentais estáveis são pouco comuns em comparação com as situadas em limites de placas tectônicas ou em áreas de alto strain próximas (BEZERRA *et al.*, 2011). Anualmente, centenas de pequenos abalos sísmicos são detectados pelos equipamentos da Rede Sismográfica Brasileira (RSBR) (BIANCHI *et al.*, 2018), o que indica a presença de diversas falhas ativas na região continental brasileira. No caso da margem continental brasileira, não há borda de placa tectônica: a placa tectônica da América do Sul abrange parte de crosta oceânica que estende-se até a dorsal meso-oceânica do Atlântico Sul, onde ocorre a divergência entre as placas tectônicas Sul-Americana e Africana. No entanto, mesmo o Brasil estando localizado no centro da placa, em uma região dita tectonicamente “estável”, isso não implica na ausência absoluta de tremores de terra em seu território.

Mesmo sendo relativamente menores em termos de quantidade e magnitude na escala Richter, quando comparados aos terremotos em regiões de limites de placa, a ocorrência e a distribuição espacial desses abalos sísmicos em território brasileiro são bastante relevantes e dizem muito sobre a geologia da porção brasileira da placa tectônica Sul-Americana. De fato, abalos sísmicos na plataforma continental e na região costeira são responsáveis por um terço de toda a sismicidade em áreas de crosta continental “estável” (JOHNSTON, 1989). No entanto, o caso da placa Sul-Americana tem características/especificidades que alertam os sismólogos que pesquisam o tema. De acordo com Ramos *et al.* (2021), a margem continental do Brasil apresenta uma taxa de sismicidade 70% superior à média das regiões continentais estáveis. Contudo, nota-se um padrão distinto entre as atividades sísmicas nas porções S-SW e N-NE do país. Nas margens norte e nordeste do país, os terremotos tendem a ocorrer no continente com menor atividade na região oceânica. No sul, a atividade tende a se concentrar na plataforma continental, com menores níveis no continente (ASSUMPCÃO, 1998).

Dentre os estados do Nordeste brasileiro, a base de dados da RSBR aponta que o Ceará ocupa uma das regiões de maior atividade sísmica continental. A grande maioria foram abalos sísmicos de baixíssima magnitude, com cerca de 80% do total variando entre 0,1 e 2,5

na escala Richter. Entretanto, alguns eventos foram relativamente expressivos: em 20 de novembro de 1980, foi registrado em Pacajus, Região Metropolitana de Fortaleza, um terremoto de 5,2 m_b , o maior registrado no estado; no município de Irauçuba, em 1991, foi registrado um tremor de 4,9 m_b ; em 1968, foi registrado um sismo de 4,6 m_b na no município de Pereiro; em 26 de março de 1989, no município de Palhano, o sismo registrado foi de 4,5 m_b ; em 25 de dezembro de 2015, em Irauçuba, aconteceu o tremor de 3,8 m_b ; recentemente, em 2019, diversos tremores foram sentidos próximos ao município de Quixeramobim, com magnitudes de 3,4 mb (18 de abril), 3,2 m_b (25 de julho), 2,9 mb (dias 20 e 30 de março). Ainda em 2019, foram registrados abalos sísmicos no distrito de Boa Água – município de Morada Nova (3,3 m_b), e nos municípios de Chorozinho (3,2 m_b) e em Morrinhos (3,1 m_b). Em alguns casos, esses abalos foram sentidos pela população local e provocaram algum tipo de dano às edificações, tais como: trincas e rachaduras em paredes. Embora em menor número, houve também algumas ocorrências de abalos sísmicos na região oceânica. A Rede Sismográfica Brasileira (RSBR) registrou, em 06 de setembro de 2020, um tremor de 6,6 mb na dorsal meso-oceânica. O epicentro ocorreu a 1.277 km ao norte de Fortaleza, com réplicas de 4,6 m_b (06 de setembro) e 5,0 m_b (07 de setembro). Eventos nessa porção de crosta oceânica são bem menos frequentes e dificilmente oferecem um risco de propagar sua energia para a região costeira dada a grande distância entre as áreas povoadas e os epicentros.

Percebe-se que sismos de magnitude mais elevada em região intraplaca são um fenômeno geológico relativamente recorrente no estado do Ceará. Apresentamos neste informe técnico uma compilação de alguns dos principais dados sobre a atividade sísmica do estado, contextualizados e interpretados a luz de dados geofísicos e geológicos, como forma de compreender como e o porquê desses tremores de terra, tão frequentes, ocorrerem em especial nessa porção do território brasileiro.

1.1. Zonas sísmicas ativas

A Figura 1 mostra a distribuição espacial dos epicentros dos principais sismos registrados pela RSBR no período de 1807 a 2022 (de 1807 a 1940, são registros históricos; a partir de 1950, são registros da RSBR). O mapa indica maior concentração dos epicentros na parte leste, próxima à costa, em comparação com a porção mais

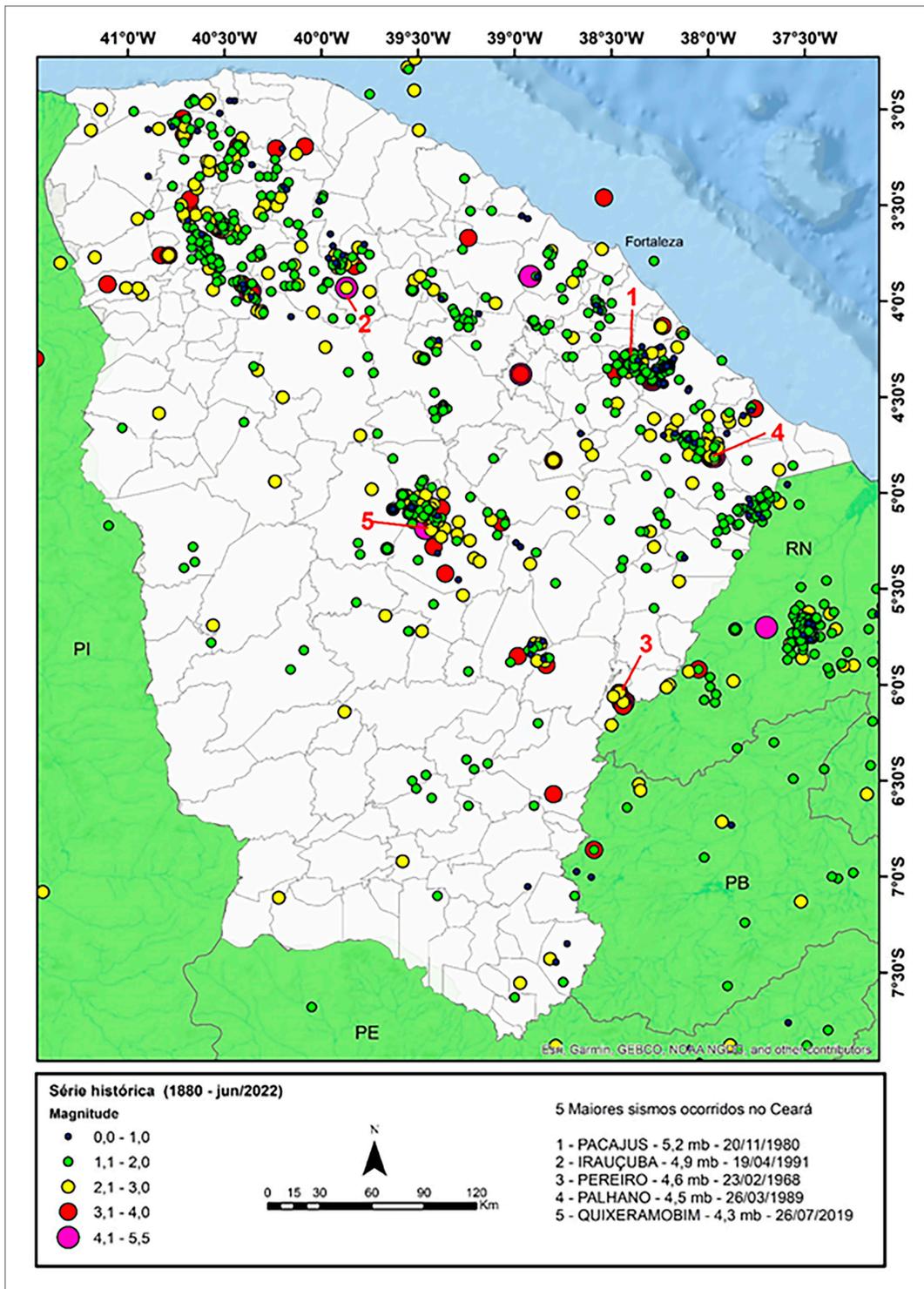


Figura 1 – Mapa da distribuição espacial dos epicentros dos principais abalos sísmicos no Ceará, com destaque para os cinco principais eventos ocorridos. Elaborado a partir dos dados de sismos da série histórica da RSB. Sigla dos estados: PE = Pernambuco; PB = Paraíba; RN = Rio Grande do Norte; PI = Piauí. Fonte: elaborado pelo autor.

continental/interior do Ceará. Também é possível observar que, mesmo para aqueles eventos registrados na costa leste do Ceará, a distribuição espacial é heterogênea, com concentrações de eventos em porções específicas do estado. A Figura 2 representa um mapa de densidade de pontos

em função da magnitude dos eventos. Foi elaborado com base no total de pontos da série histórica de sismos e enfatiza três principais zonas sísmicas ativas no Ceará, regiões-chave para debatermos sobre a o campo de *stress*, seus mecanismos de alívio de tensão e possíveis interpretações

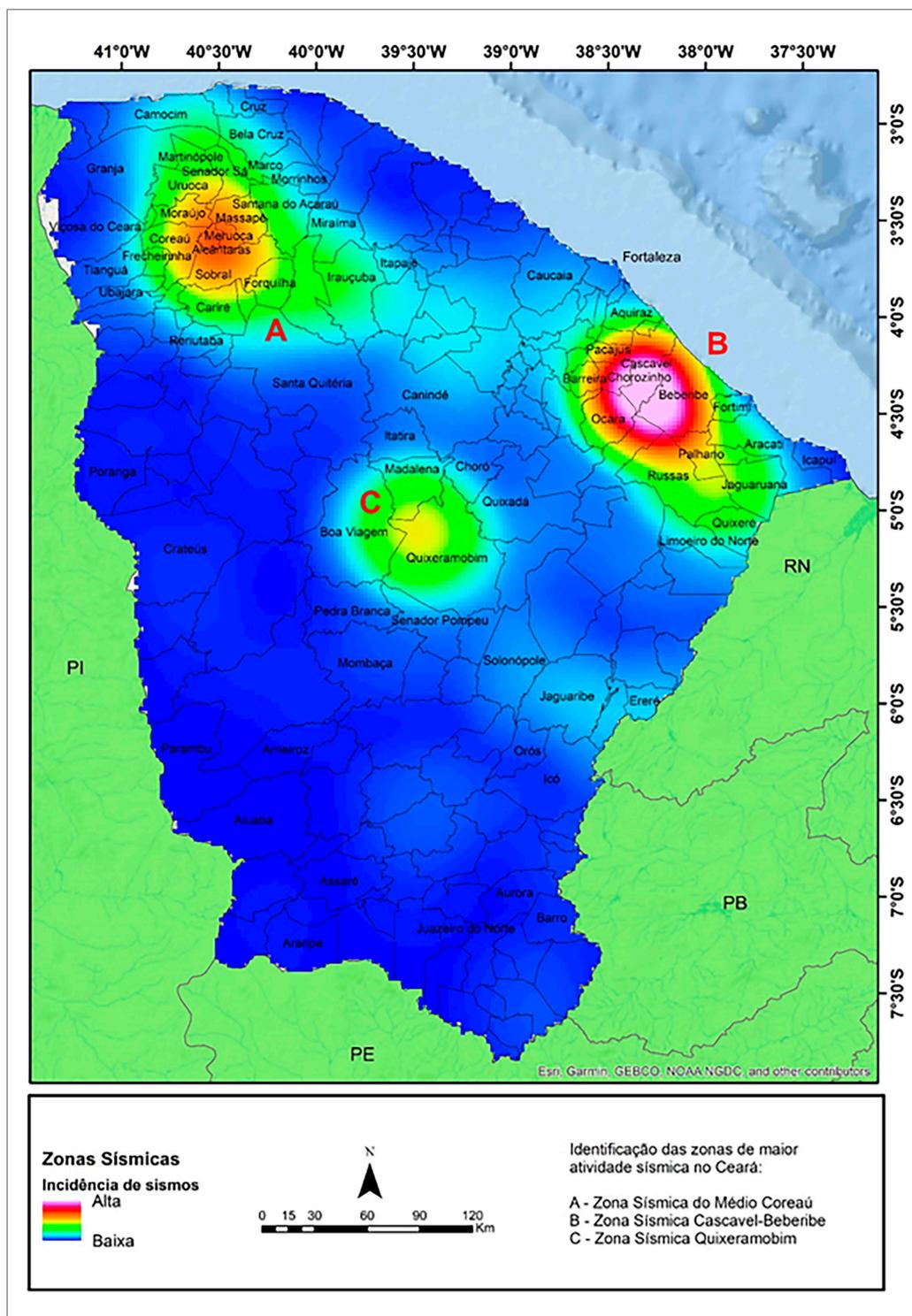


Figura 2 - Mapa de densidade de pontos para os epicentros dos sismos em função da magnitude dos eventos da série histórica (RSBR), enfatizando a presença de três zonas sísmicas ativas no território cearense: A) Zona Sísmica Médio Coreau – porção noroeste do Ceará; B) Zona Sísmica Cascavel-Beberibe, na porção leste do estado, próxima à Zona Metropolitana de Fortaleza; C) Zona Sísmica Quixeramobim, na porção central do estado do Ceará. Sigla dos estados: PE = Pernambuco; PB = Paraíba; RN = Rio Grande do Norte; PI = Piauí. Fonte: elaborado pelo autor.

para a relativa alta ocorrência de sismos nessas porções específicas do continente, quando em comparação com as demais regiões cearenses. A seguir, serão apresentadas as zonas sísmicas cearenses:

1.1.1. Zona Sísmica do Médio Coreau

Denominamos aqui a primeira área como Zona Sísmica do Médio Coreau, que se localiza na porção noroeste

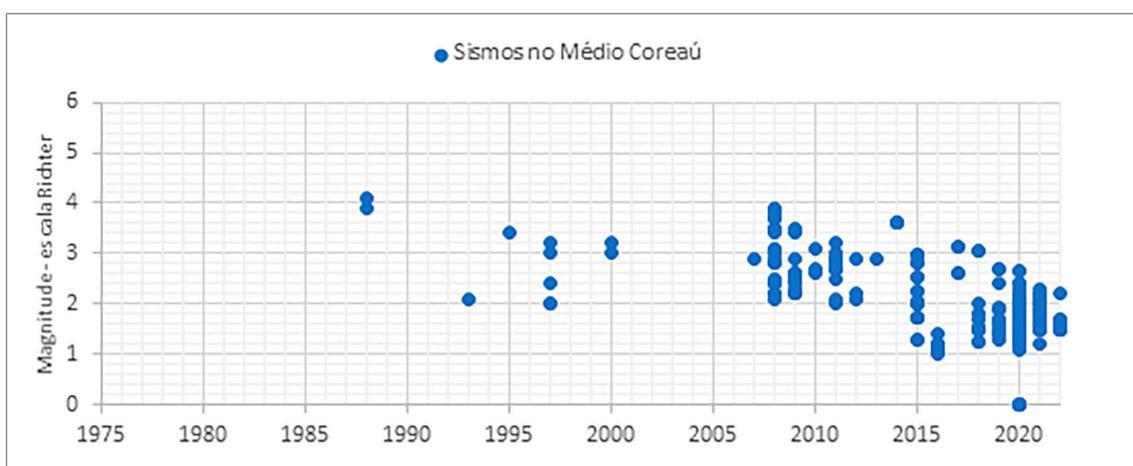


Figura 3 - Seleção de sismos na região sísmica do Médio Coreaú, na porção noroeste do estado do Ceará, mostrando a distribuição temporal dos eventos nessa região. Fonte: elaborado pelo autor.

do estado do Ceará, região que também engloba a denominada Zona Sísmica Acaraú, por Oliveira *et al.* (2015). A Figura 3 apresenta uma série temporal de sismos dessa região. Muito embora a maioria dos abalos sísmicos registrados nessa zona sísmica tenha ocorrido com baixa magnitude na escala Richter (até 2 m_b), alguns dos eventos foram relativamente expressivos, como uma série de abalos sísmicos na Serra da Meruoca entre fevereiro e maio de 2008, variando entre 3,7 e 3,9 m_b ; o abalo sísmico de 3,6 m_b , em 27 de novembro de 2014, no município de Coreaú; e o de 3,3 m_b em 20 de julho de 2015, no município de Granja. Essa região é marcada pelo contato de dois blocos crustais, os domínios geotectônicos Ceará Central e Médio Coreaú, separados pela zona de cisalhamento de movimentação dextral Sobral-Pedro II, estrutura que consiste na extensão NE do Lineamento Transbrasiliiano na Província Borborema. O Domínio Médio Coreaú tem contexto geológico complexo de eventos tectônicos policíclicos impressos em seu arcabouço estrutural. No domínio, o *trend* principal NE-SW da zona de cisalhamento Sobral-Pedro II é o mais marcante, e afeta rochas das mais variadas idades. O embasamento é constituído por rochas paleoproterozóicas (2,36 – 2,29 Ga) de alto grau metamórfico (FETTER *et al.*, 2000) do Complexo Granja (ortognaisses tonalito-trondhjemitó-granodioritos (TTG), paragnaisses, gnaisses granulíticos) e sequências metavulcanossedimentares orosirianas de idade 1.785 Ma (SANTOS, 1999; BENEDETTI, 2012) da Unidade Saquinho. Segundo Pinéo *et al.* (2020), as rochas supracrustais neoproterozóicas presentes no Médio Coreaú constituem o Grupo Martinópolis (PRADO *et al.*, 1981), formado por xistos, filitos, mármore, quartzitos e metavulcânicas com idade de 777 Ma (FETTER, 1999) e o Grupo Ubajara (NASCIMENTO *et al.*, 1981) composto por metassiltitos, metarenitos, ardósias e mármore. A região da Zona Sísmica Médio Coreaú apresenta rochas

graníticas brasileiras, de idade em torno de 600 Ma (corpos Chaval e Tucunduba), e pós-brasilianas, com idade de 532 Ma (corpos Meruoca e Mucambo) - (FETTER, 1999; SANTOS, 1999; ARCHANJO *et al.*, 2009), que são registros do episódio magmático pós-tectônico relacionado à tectônica extensional do final do Neoproterozoico que, juntamente com uma dezena de outros batólitos, stocks e enxames de diques, marcou a atividade magmática do Cambriano na Província Borborema, entre 545-520 Ma (ARCHANJO *et al.*, 2009). Há também bacias sedimentares cambro-ordovicianas constituídas por conglomerados, arenitos, siltitos e rochas vulcânicas de idade 536 Ma, que formam o Grupo Jaibaras e o Grupo Riacho Sairi (GARCIA *et al.*, 2018), encaixadas ao longo da zona de cisalhamento Sobral-Pedro II.

As extensas zonas de cisalhamento, além de dobramentos diversos (antiformes e sinformes invertidas), estão associadas a um ou mais eventos dúcteis regionais. Também são identificadas bacias molássicas, granitos instalados em estruturas tipo *pull-apart* e enxames de diques associadas a um ou mais processos deformacionais rúpteis posteriores (PINÉO *et al.*, 2019).

A maior ocorrência de sismos concentra-se na região da Serra da Meruoca (municípios de Coreaú, Sobral, Alcântara e Meruoca), em área próxima à Bacia do Jaibaras e limítrofe à Falha Café-Ípueira, na terminação SW da zona de cisalhamento Sobral-Pedro II. Após uma série de abalos sísmicos registrados por uma rede sismográfica montada nessa região em 2008, com o maior deles registrando 4,2 m_b , Oliveira *et al.* (2010) obtiveram os parâmetros de falha e de mecanismos focais tipo *strike-slip*, com movimentação dextral, para um conjunto de falhas na porção SW da Serra da Meruoca. Oliveira *et al.* (2010) dividiram os dados de hipocentro dos vários eventos captados em três segmentos de tamanhos iguais para analisar a geometria da falha, concluindo que a estrutura principal é uma falha

transcorrente dextral com cerca de 6km de comprimento, a Falha Riacho Fundo. Ao observarem que essa falha sismogênica não estaria alinhada ao *trend* principal da zona de cisalhamento Sobral Pedro II, Bezerra et al. (2011) compararam dados de foliações e falhas ao conjunto de dados de Oliveira et al. (2010) e ponderaram que a Falha Riacho Fundo não teria correlação com as grandes estruturas, tais como zonas de cisalhamento, o que indicaria, ainda segundo esses autores, que essa falha poderia cortar as estruturas dúcteis e as falhas preexistentes, ou ao menos cortar a foliação e coincidir com as falhas do embasamento. Moura et al. (2014) realizaram um trabalho de mapeamento geológico de detalhe na área epicentral, analisando a mineralogia de rochas de falha e comparando a falha sismicamente definida com dados geológicos de campo, concluindo que a falha sísmica coincide com as de *strike* aproximadamente E-W, observadas em escala de afloramento, e um enxame de diques de basalto mesozoicos a noroeste do Batólito Meruoca (dique Riacho Aroeiras), e que a sismicidade teria provocado uma reativação de estruturas rúpteis pré-cambrianas existentes. Ramos et al. (2021) promoveram uma análise cuidadosa de dados aeromagnéticos, distribuição de hipocentros e estruturas preexistentes na região da Serra da Meruoca, como foliações metamórficas, diques, veios e falhas, mostrando que essa metodologia pode ser eficiente para indicar locais propensos a falhas sismogênicas. Ramos et al. (2021) também defendem que, no caso da Serra da Meruoca, a falha sísmica é uma reativação de estruturas previamente presentes no arcabouço estrutural da área.

Em outras duas localidades da Zona Sísmica do Médio Coreaú, município de Santana do Acaraú, com epicentros registrados ao longo da Bacia do Jaibaras, e município de Senador Sá, com epicentros distribuídos predominantemente em estruturas do embasamento do Complexo Granja, outros estudos conduzidos para a obtenção de parâmetros de falha e mecanismos focais indicaram uma cinemática semelhante para as falhas ativas (FRANÇA; FERREIRA; TAKEYA, 2004; OLIVEIRA et al., 2010), ou seja, mecanismos focais do tipo *strike-slip*. No entanto, estudos de maior nível de detalhe, semelhantes às metodologias integradas aplicadas na região da Serra da Meruoca, ainda não foram publicados para essas regiões.

1.1.2. Zona Sísmica Cascavel-Beberibe

A segunda área de atividade sísmica do Ceará é a Zona Sísmica Cascavel-Beberibe (FONSECA et al., 2021) que, muito embora tenha sido apontada por alguns autores como região de borda da Bacia Potiguar (talvez por uma questão de escala dos mapas/área de estudos), na verdade, localiza-se na porção leste do Domínio Ceará Central, relativamente próxima à Região Metropolitana de Fortaleza. É uma área seccionada pela zona de cisalhamento Senador

Pompeu, estrutura de *trend* NE-SW e de movimentação dextral que afetou a maioria das estruturas presentes em seu embasamento. É formado, predominantemente, por rochas paleoproterozoicas com idades entre 2,1 e 2,2 Ga, representadas por gnaisses, orto e paraderivados, e migmatitos do Complexo Canindé do Ceará (TORRES et al., 2007; FETTER, 1999; PINÉO et al., 2020). Eventualmente, ocorrem alguns diques do enxame Rio Ceará Mirim, que são corpos tabulares de basaltos/diabásios representantes do magmatismo toleítico continental que surgiu a partir do expressivo rifteamento, no Cretáceo Inferior, envolvendo os continentes sul-americano e africano. Nessa porção do estado, os diques encontram-se orientados, preferencialmente, segundo a direção NW-SE. Recobrimo o embasamento nessa área, bem como toda a região litorrânea do Ceará, estão as coberturas do Grupo Barreiras, de idade cenozoica. Essas coberturas são as responsáveis pelas belas formas de relevo de tabuleiros costeiros e falésias ao logo do litoral cearense, e são constituídas, em geral, por conglomerados e arenitos (BIGARELLA; ANDRADE, 1964; MABESSONE; CAMPOS E SILVA; BUERLEN, 1972). Há, ainda, as coberturas sedimentares inconsolidadas, que são representadas pela Formação Moura e pelos depósitos colúvio-eluvionais, depósitos de talus recente, depósitos aluvionares e pelos depósitos eólicos litorâneos, que são compostos por cascalhos, areias e argilas.

A Figura 4 mostra a série temporal para os sismos ocorridos nessa região. Muito embora a maioria dos sismos registrados nessa porção do estado tenham sido pequenos, foi justamente na Zona Sísmica Cascavel-Beberibe onde aconteceram alguns dos abalos sísmicos de maior magnitude em todo o Ceará. Merece destaque o terremoto de 5,2 m_b , ocorrido no dia 20 de novembro de 1980, em Pacajus, um dos maiores sismos até então catalogados em todo o Nordeste brasileiro. Também merecem destaque outros terremotos expressivos, como uma série de abalos sísmicos variando de 4,5 a 4,1 m_b , entre outubro de 1988 e maio de 1989, em Palhano, e o abalo sísmico de 4,1 m_b , em 4 de julho de 2000, no município de Cascavel.

Alguns estudos conduzidos para a obtenção de parâmetros de falha e mecanismos focais em diferentes porções da Zona Sísmica Cascavel-Beberibe indicaram uma cinemática predominantemente do tipo *strike-slip* com movimentação dextral (município de Pacajus – ASSUMPÇÃO; SUAREZ; VELOSO, 1985; municípios de Cascavel e Palhano - FERREIRA et al., 1998), e um mecanismo focal sugerindo, também, a presença de uma falha ativa com movimentação oblíqua (FERREIRA et al., 1998) nessa porção do arcabouço estrutural cearense.

Bezerra et al. (2011) descrevem esse conjunto de estruturas como “falhas sismicamente definidas que cortam estruturas preexistentes”, uma vez que a falha definida pelo mecanismo focal corta a orientação das

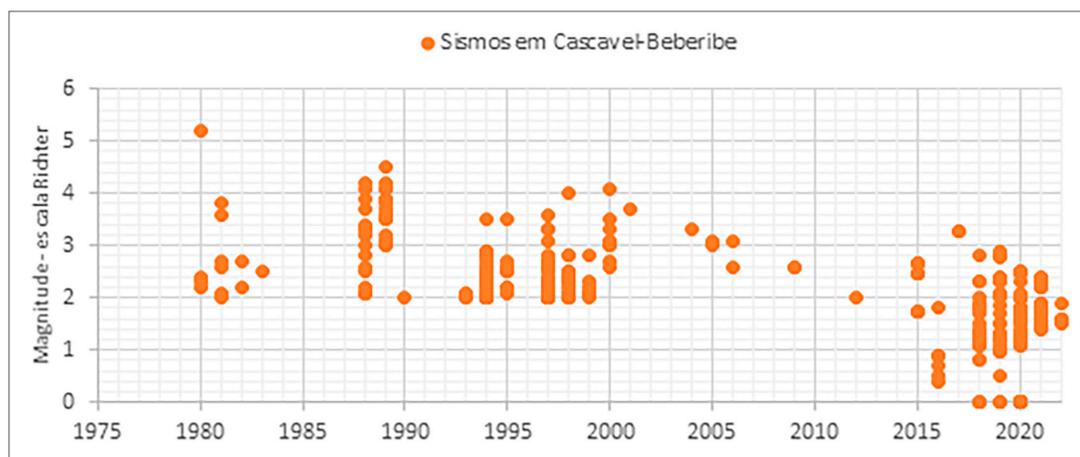


Figura 4 - Seleção de sismos na região sísmica de Cascavel-Beberibe, evidenciando uma maior distribuição dos sismos ao longo do tempo. O gráfico ajuda a observar a alta incidência de sismos nessa região. Fonte: elaborado pelo autor.

estruturas identificadas em superfície, como a foliação pré-cambriana e a maioria das falhas em escala de afloramento mapeadas na área.

1.1.3. Zona Sísmica Quixeramobim

A terceira região é a Zona Sísmica Quixeramobim, localizada na porção central do estado do Ceará. Também afetada por grande estrutura geológica, a zona de cisalhamento Senador Pompeu, de movimentação dextral e *trend* NE-SW, condiciona a maioria das estruturas presentes em seu embasamento, que contém um núcleo arqueano parcialmente preservado, o Complexo Cruzeta, (idades entre 2,7 e 2,8 Ga), constituído predominantemente por ortognaisses de composição TTG, seguido por paragnaisses, quartzitos e rochas calcissilicáticas (OLIVEIRA; CAVALCANTE, 1993; FETTER, 1999; GANADE *et al.*, 2017). As unidades que formam o Complexo Cruzeta são bordejadas, nos seus extremos norte e oeste, por rochas paleoproterozoicas com idades entre 2,1 e 2,2 Ga, representadas, em geral, por rochas orto e paraderivadas, migmatitos, rochas metamáficas e metaultramáficas agrupadas no Complexo Tróia (COSTA *et al.*, 2015; ALMEIDA, 2014), no Complexo Algodões (ARTHAUD; LANDIN, 1995; MARTINS, 2000; CASTRO, 2004) e no Complexo Boa Viagem (COSTA *et al.*, 2015; ALMEIDA, 2014; CASTRO, 2004). Conjuntos litológicos paleoproterozoicos estritamente ortoderivados (ortognaisses graníticos, granodioríticos, tonalíticos e dioríticos) estão individualizados na Suíte Madalena (ARTHAUD *et al.*, 2008; MARTINS, 2000), na Unidade Ortognaisse Bananeira, com idade de 2,09 Ga (OLIVEIRA; CAVALCANTE, 1993; COSTA *et al.*, 2015), na Unidade Ortognaisse Cipó, com idade de 2.180 Ma (MARTINS, 2000; COSTA *et al.*, 2015) e no Corpo Ortognaisse Serra da Palha, com idade de 2,14 Ga (COSTA; PALHETA, 2017). Nessa região, também, ocorrem rochas supracrustais neoproterozoicas, representadas

em geral por xistos, quartzitos, mármore e rochas metavulcânicas da Formação Independência (Grupo Ceará), com idade aproximada de 770 Ma (FETTER, 1999; ARTHAUD, 2007), diatexitos e migmatitos da Unidade Juatama e rochas graníticas do Plúton Rio Quixeramobim, ambos brasileiros (PINÉO *et al.*, 2020).

A atividade sísmica registrada nessa porção do território cearense é significativa e relativamente recente. A série histórica, apresentada na Figura 5, tem cerca de 145 registros de abalos sísmicos na região da Zona Sísmica Quixeramobim, contabilizados a partir de 2001, sendo que maior parte desses sismos ocorreu entre os anos de 2018 e 2022 (130 eventos). Entre março e agosto do ano de 2019, aconteceram 85 eventos em determinadas localidades próximas ao município de Quixeramobim, 17 deles com magnitude superior a 2,5 na escala Richter. Nessa sequência, destacam-se os terremotos de 3,0 m_b em 30 de março, 3,4 m_b em 19 de abril e 4,4 m_b em 26 de julho. Até o momento da edição deste texto, não foram encontrados mecanismos focais publicados para essa porção do estado na literatura técnico-científica, no entanto sabe-se que pesquisadores ligados à Rede Sismográfica Brasileira (RSBR) têm conduzido estudos recentes nessa região.

1.2. Fatores que podem induzir a ocorrência de sismos intraplaca na América do Sul

1.2.1. Arquitetura crustal

Em estudo sobre a sismicidade intraplaca na porção central da América do Sul, Agurto-Detzel *et al.* (2017) sugeriram que existe uma clara dependência entre a sismicidade e a arquitetura crustal ao observar que faixas de dobramentos neoproterozoicas apresentam maior atividade tectônica do que bacias fanerozoicas e áreas

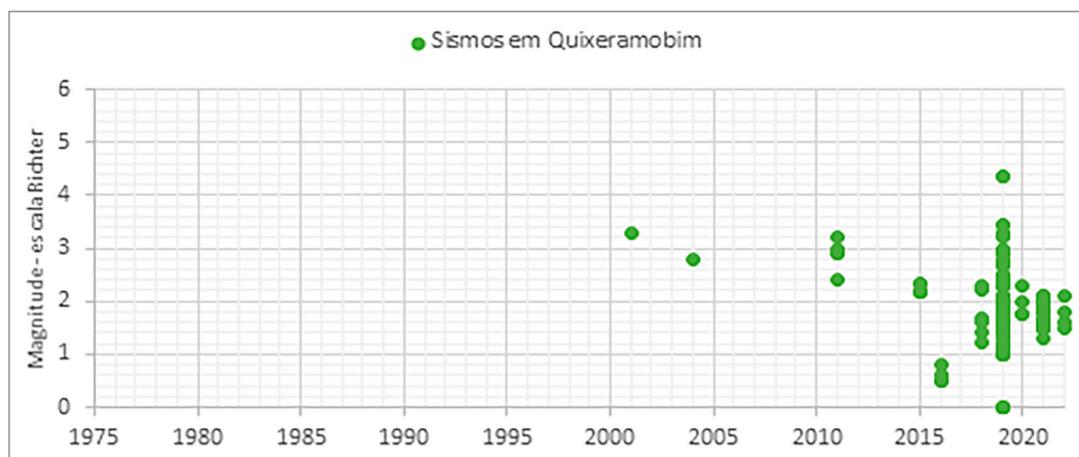


Figura 5 - Seleção de sismos na região próxima ao município de Quixeramobim mostra uma recente e intensa atividade sísmica, com pico de 85 eventos registrados nessa série no ano de 2019. Fonte: elaborado pelo autor.

cratônicas. As taxas de sismicidade mais altas nas faixas de dobramento neoproterozoicas são estatisticamente significativas e podem ser explicadas pelo fato da litosfera de áreas cratônicas estáveis ser mais espessa, tendendo a ser forte o suficiente para inibir a atividade neotectônica, enquanto que os cinturões de dobramentos são mais propensos a ter zonas de fraqueza onde os terremotos ocorrem em estruturas herdadas (AGURTO-DETZEL *et al.*, 2017).

De maneira geral, esses terrenos representam províncias geológicas formadas/consolidadas durante o ciclo orogênico Brasileiro, como é o caso da Província Borborema, região interpretada como o resultado de uma complexa colagem de diversos domínios tectônicos. Esses domínios estão geralmente associados às orogêneses meso e neoproterozoicas, e que formam boa parte da estruturação do Nordeste brasileiro. Segundo alguns autores (VAN SCHMUS *et al.*, 1995; BRITO NEVES; VAN SCHMUS; FETTER, 2001; GUIMARAES; BRITO-NEVES, 2004; ALMEIDA *et al.*, 2009), durante o período entre 2,26 Ga - 2,0 Ga houve extensiva produção de crosta continental e colagem de blocos arqueanos em orógenos paleoproterozoicos. Durante o Neoproterozoico, um ciclo geodinâmico foi desenvolvido de forma diacrônica na Plataforma Sul-Americana, processo que começou com regime extensional com formação de riftes (950 Ma ~ 800 Ma) e teve seu término com o colapso dos orógenos e transição para um novo regime extensional (510 Ma ~ 490 Ma) (SCHOBENHAUS, 2001). O clímax orogênico (670 Ma e 550 Ma), relacionado ao metamorfismo de alto grau, intenso tectonismo e expressiva granitogênese, foi responsável pela colagem e retrabalhamento dos terrenos ali previamente existentes, consolidando o supercontinente Gondwana. O Evento Brasileiro é de suma importância devido a sua amplitude regional, a qual engloba toda a Província Borborema, e devido a sua evolução em relação às mudanças geotectônicas globais, envolvendo colagens de continentes, fechamento

de oceanos, assim como uma sucessão de pulsos magmáticos que se estenderam durante todo o evento (NASCIMENTO, 2012). Alguns milhares de anos depois, o Cretáceo (140 Ma) marcou o início da quebra do Gondwana, com o surgimento do Oceano Atlântico e a separação continental entre América do Sul e África, ao desencadear um processo extensional que, muito provavelmente, reativou diversas estruturas geológicas do embasamento, moldou o relevo e a paisagem, resultando na configuração atual desses continentes. A Figura 6 mostra o encarte geotectônico da Província Borborema, com a localização do Ceará, destacando os principais domínios que seccionam o estado. A Figura 7 apresenta o mapa geológico do estado do Ceará, enfatizando as suas principais estruturas e unidades litoestratigráficas (PINÉO *et al.*, 2020), e, também, evidenciando a posição das três zonas sísmicas ativas.

1.2.2. Espessura crustal

Embora cada zona sísmica esteja em uma posição diferente do estado, possua rochas variadas e arranjo estrutural próprio, existem alguns aspectos geológicos regionais que conectam as três áreas. Um dos fatores regionais que podem influenciar a sismicidade intraplaca é a geometria crustal. Dentre todas as províncias tectônicas brasileiras, é justamente a Província Borborema aquela que possui a maior extensão de crosta fina (ASSUMPÇÃO *et al.*, 2013; RIVADENEYRA-VERA *et al.*, 2019). Correlações entre dados de sismos e parâmetros geofísicos litosféricos indicam que taxas de sismicidade acima da média foram observadas para regiões com crosta mais fina, entre 20 e 35 km de espessura (AGURTO-DETZEL *et al.*, 2017). A Figura 8 apresenta a distribuição das curvas de nível extraídas do mapa de espessura crustal atualizado da América do Sul, com base nas medições da função do receptor (RIVADENEYRA-VERA *et al.*, 2019) para o estado do Ceará,

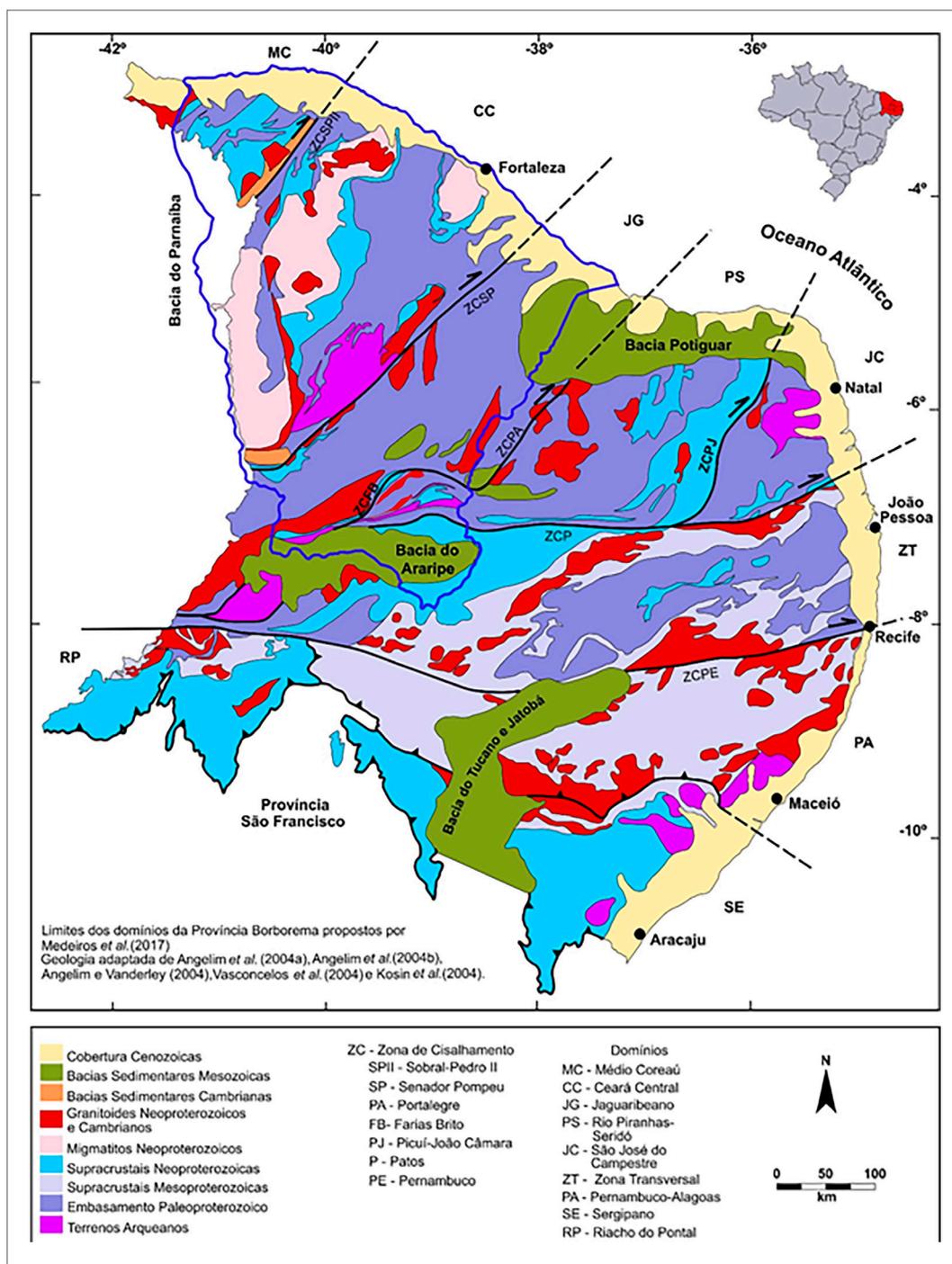


Figura 6 – Mapa geológico da Província Borborema mostrando seus domínios tectônicos, as principais zonas de cisalhamento desenvolvidas durante o Ciclo Brasileiro, com destaque para o estado do Ceará (adaptado de Medeiros et al., 2017).

bem como a posição das estações permanentes da RSBR em território cearense e seus respectivos valores de espessura crustal, calculados via função do receptor (ASSUMPÇÃO et al., 2013). O mapa mostra que a espessura crustal na região varia gradativamente de NE para SW, desde 22 km na porção oceânica, imediatamente antes da quebra da plataforma continental, até atingir cerca de 40 km de espessura na porção sul do estado, próximo à Bacia

do Araripe, na Zona Transversal da Província Borborema. Também é mostrada a distribuição espacial dos epicentros nessa região, enfatizando a relação entre a maior incidência de sismos na porção leste/costeira do estado, onde a espessura da crosta continental sul-americana é mais fina, entre 29 e 35 km e, portanto, mais susceptível aos esforços/tensões crustais. As porções sul e oeste do estado, onde a crosta é mais espessa, são justamente as regiões onde

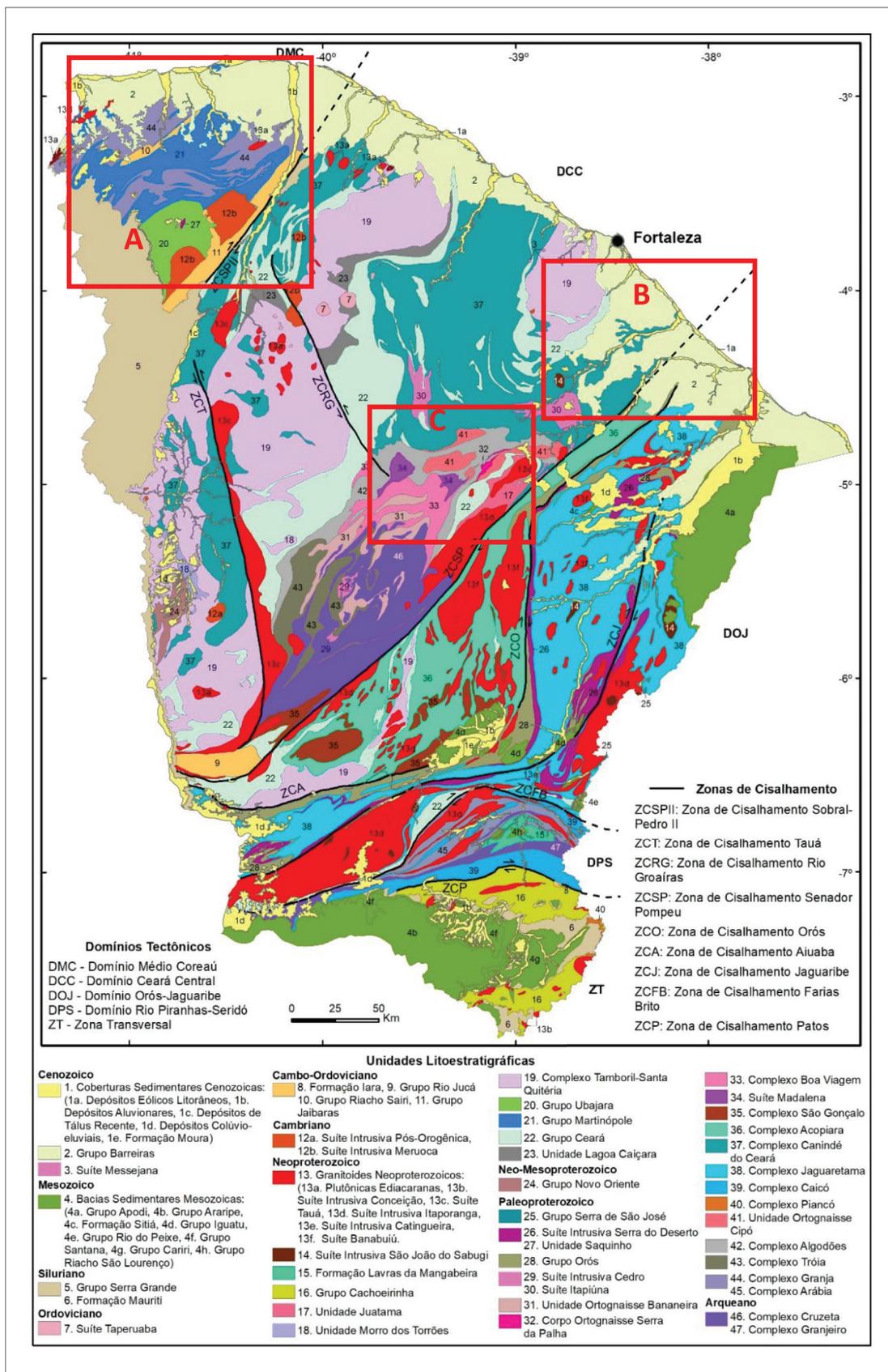


Figura 7 - Mapa geológico do Ceará obtido a partir da base de dados do SGB/CPRM (PINÉO *et al.* 2020), enfatizando a posição das três zonas sísmicas ativas do estado. Em detalhe, apresentação das unidades litoestratigráficas presentes no estado do Ceará.

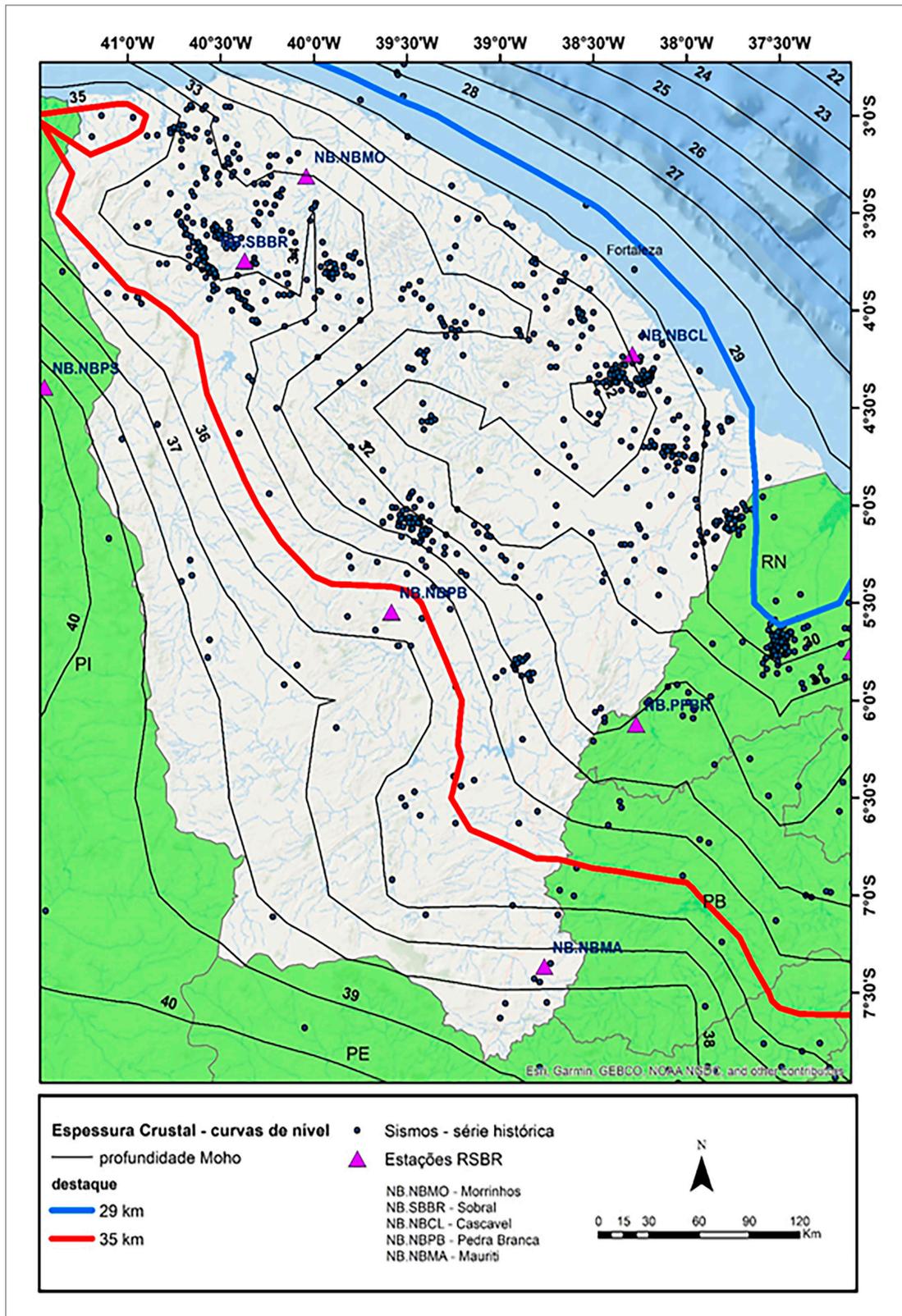


Figura 8 – Curvas de nível de espessura crustal na porção onde localiza-se o Ceará (descontinuidade de Mohorovi i , geralmente chamada de descontinuidade de Moho, é a fronteira entre a crosta terrestre e o manto). O intervalo de espessura crustal de 29 a 35 km é destacado nas linhas azul e vermelha, respectivamente. Percebe-se que a maior parte dos sismos que ocorreram no estado estão dentro desse intervalo, e que a medida que a crosta continental atinge maiores espessuras, os sismos passam a ser menos recorrentes. Dados de sismos obtidos da base da RSBR. Curvas de nível extraídas do mapa de espessura crusta de Rivadeneyra-Vera et al. (2019) Fonte: elaborado pelo autor.

há uma baixa incidência de abalos sísmicos registrados. Em sua ampla maioria, esses sismos ocorreram em pequena profundidade, na crosta superior (hipocentros localizados até 5 km de profundidade).

1.2.3. Arcabouço estrutural

O conceito de zonas sísmicas implica na existência de uma ou mais falhas geológicas ativas em uma determinada área. O conjunto de feições que definem o arcabouço estrutural do embasamento cristalino do Ceará, comumente definido por fraturas, foliação metamórfica, intrusões tabulares, planos de estratificação dobrados, clivagem etc. representa anisotropia mecânica e fraqueza estrutural, as quais são exploradas por eventos de *stress* tectônico subsequentes, reativando essas estruturas e, ocasionalmente, gerando abalos sísmicos (FERREIRA *et al.* 1998; BEZERRA *et al.*, 2011; MOURA *et al.*, 2014; RAMOS *et al.*, 2021).

Um mecanismo focal (também chamado de *beach ball*) é a representação gráfica da forma que ocorre o sismo, possibilitando a determinação dos planos nodais, a direção do eixo P e T, e a direção do movimento caso conhecido o plano de falha. Por meio da análise do conjunto de mecanismos focais compilados, é possível percebermos algumas características quanto à cinemática da movimentação das estruturas sismogênicas do arcabouço estrutural. Segundo Assumpção (1998), a sismicidade e o *stress* ao longo da margem continental brasileira apresentam um padrão distinto na porção nordeste brasileira, especialmente na zona costeira cearense, onde os sismos tendem a ocorrer dentro do continente em regime de transcorrência com máxima compressão horizontal (SHmax) subparalela à linha da costa. A Tabela 1 traz uma compilação dos mecanismos focais publicados no estado e a Figura 9 mostra a distribuição espacial ao longo do território cearense (FRANÇA; FERREIRA; TAKEYA, 2004; OLIVEIRA *et al.*, 2010; ASSUMPÇÃO; SUAREZ; VELOSO, 1985; FERREIRA *et al.*, 1998; NUNES *et al.*, 2012). Esses eventos foram compilados e classificados de acordo com o diagrama de Frohlich (1992): mecanismos do tipo *strike-slip* correspondem a cerca de 60 %; falhas inversas a 25%; falhas normais a 8% e um dos mecanismos não teve classificação definida, sendo interpretado como falha oblíqua (*strike-slip* com grande componente normal ou inversa). Também, é indicado na Figura 9 as direções de máxima compressão horizontal (SHmax) para cada um dos mecanismos focais (ASSUMPÇÃO *et al.*, 2016).

O conceito de zona de fraqueza implica que falhas ativas podem ser reconhecidas e mapeadas (BEZERRA *et al.*, 2011). Nesse sentido, enfatizamos o extensivo trabalho de cartografia geológica e de pesquisa mineral realizados pelo

SGB-CPRM e pelas universidades federais do Ceará (UFC) e do Pará (UFPA), por convênio (CAVALCANTE *et al.*, 2003; COSTA *et al.*, 2015; TORRES *et al.*, 2007; PINÉO *et al.*, 2019; PALHETA, 2014; CALADO, 2014; PINÉO; ZWIRTES; CALADO, 2017; COSTA, 2014; ALMEIDA; PARENTE; ARTHAUD, 2008; GORAYEB *et al.*, 2014), que resultaram na atualização do Mapa Geológico do Ceará pelo SGB-CPRM (PINÉO *et al.*, 2020) e consolidação de uma base de dados consistente de medidas de fraturas, foliação e de lineação.

Contudo, a associação entre sismicidade, tensões tectônicas e cenário geológico é difícil de determinar porque as zonas sísmicas nem sempre têm uma relação clara e única com as características geológicas da superfície (RAMOS *et al.*, 2021). O processo erosivo avançado e a ausência de afloramentos em muitas porções dificultam a identificação de estruturas sismogênicas em campo. Muitas delas podem, ainda, estar mascaradas por coberturas sedimentares, como é o caso do embasamento na porção litorânea do estado cearense, coberto parcialmente pelos tabuleiros costeiros da Formação Barreiras, por exemplo.

Para esses casos, uma ferramenta geofísica, que vem e mostrando bastante eficiente para desvendar as estruturas geológicas em profundidade, é a magnetometria. Dados de campo magnético são fundamentais para abordagens geofísicas de mapeamento geológico.

Segundo Sousa (2021), muitas estruturas geológicas são reconhecíveis como descontinuidades dentro de levantamentos geofísicos magnetométricos, tipicamente caracterizadas como feições lineares nos mapas de anomalia magnética e seus derivados. Mapas aerogeofísicos de magnetometria vêm sendo amplamente empregados em trabalhos de mapeamento geológico do Serviço Geológico do Brasil de Fortaleza ao longo dos últimos anos (e.g. TORRES *et al.*, 2007; PINÉO *et al.*, 2019; PALHETA *et al.*, 2019). Seus resultados vêm reafirmando uma relação bastante clara entre o arcabouço estrutural do Ceará e o padrão de lineamentos magnéticos apresentados nos mapas geofísicos. Nesse sentido, destacamos alguns trabalhos que aplicaram a aerogeofísica para identificar estruturas associadas a sismos, como Bezerra *et al.* (2014) e Ramos *et al.* (2021).

Quanto ao processamento de dados, métodos qualitativos e quantitativos são usados para extrair informações litológicas e estruturais na dimensão horizontal, enquanto os métodos quantitativos fornecem detalhes na terceira dimensão (profundidade) (PILKINGTON; KEATING, 2010). Recentemente, alguns estudos no Brasil têm proposto uma integração maior entre dados aerogeofísicos, sismológicos e geológicos para investigar a relação entre o arcabouço estrutural e a ocorrência de sismicidade intraplaca, onde destacamos os trabalhos de Bezerra *et al.* (2014) que fizeram uma correlação entre dados aeromagnéticos, de poço e de campo estrutural para resolver os problemas relacionados à reativação de falhas e à evolução

Tabela 1 – Compilação dos mecanismos focais publicados para o estado do Ceará. As cores das *beach balls* representam o tipo de movimentação da falha (verde = *strike-slip*; vermelho = falha normal; azul = falha inversa; cinza = mecanismo indefinido).

MECANISMO FOCAL	LOCAL/DATA	LAT/LONG	MAG	PROF	STRIKE	DIP	RAKE	SH _{MAX}	REFERÊNCIA
	Senador Sá 1997 - 1998	-3,19 -40,43	2,2	4,8	60	65	-174	106	FRANÇA <i>et al.</i> , 2004
	Santana do Acaraú 2010	-3,38 -40,21	3	4	118	85	-15	75	OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2014
	Palhano 1989	-4,81 -37,98	4,5	4	275	74	178	141	FERREIRA <i>et al.</i> , 1998
	Pacajus 1980	-4,30 -38,40	5,2	5	244	88	-178	109	ASSUMPÇÃO <i>et al.</i> , 1985
	Serra da Meruoca 2008	-3,62 -40,51	3,8	5	81	85	161	125	OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2010
	Irauçuba 1991	-3,93 -39,87	4,8	10	298	53	-68	104	FERREIRA <i>et al.</i> , 1998
	Groaíras 1988	-3,96 -40,33	2,3	8	173	78	-33	135	FERREIRA <i>et al.</i> , 1998
	Cascavel 1993-1994	-4,42 -38,29	2	4	154	76	-6	109	FERREIRA <i>et al.</i> , 1998
	Hidrolândia 1991	-4,36 -40,33	1	1	353	43	37	118	FERREIRA <i>et al.</i> , 1998
	Irauçuba 1991	-3,91 -39,87	2,2	8	335	45	40	98	FERREIRA <i>et al.</i> , 1998
	Castanhão 2010	-5,67 -38,49	0	1,5	217	70	45	158	NUNES <i>et al.</i> , 2012
	Brito 1989-1994	-4,33 -38,36	2	3	274	34	155	-	FERREIRA <i>et al.</i> , 1998

da deposição de sedimentos na margem costeira, em região que abrange a Bacia Potiguar e embasamento adjacente; e Ramos *et al.* (2021) que realizaram processamento

de dados aeromagnéticos e deconvolução de Euler, além de correlacionar seus resultados com dados de campo e de mecanismos focais na região da Serra da Meruoca.

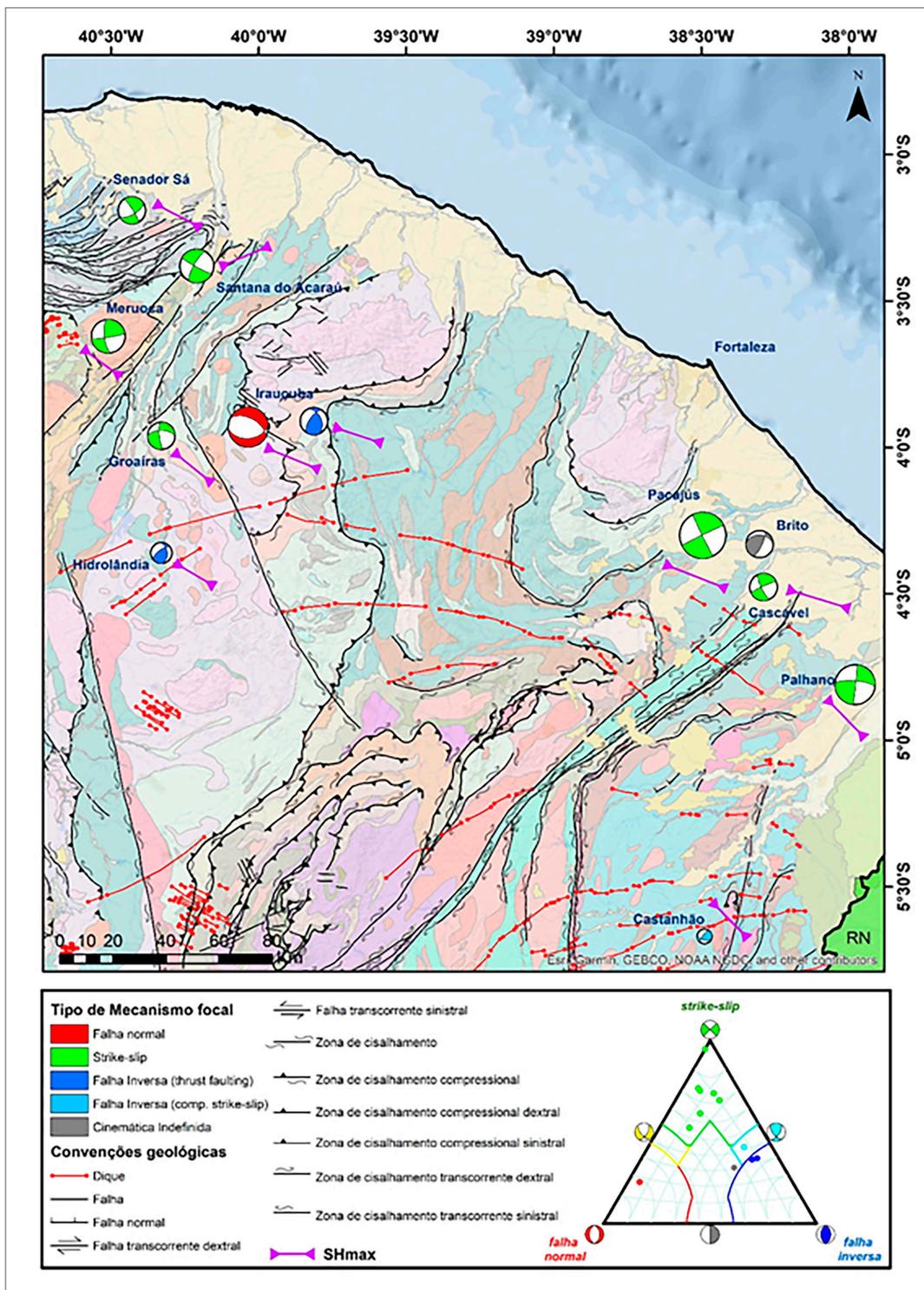


Figura 9 - Distribuição espacial dos mecanismos focais catalogados no estado do Ceará (FRANÇA; FERREIRA; TAKEYA, 2004; FERREIRA *et al.*, 1998; OLIVEIRA *et al.*, 2010; ASSUMPTÃO; SUAREZ; VELOSO, 1985; NUNES *et al.*, 2012). Em detalhe, diagrama ternário para classificação dos tipos de mecanismos focais, conforme proposto por Frohlich (1992). Pontos em azul representam mecanismos de falhas inversas, em verde os de tipo *strike-slip* e em vermelho os mecanismos de falhas normais. Pontos entre esses eixos indicam movimentação oblíqua. Tamanho dos símbolos proporcional à magnitude do evento sísmico relacionado. Fonte: elaborado pelo autor.

A magnetometria possui boa capacidade para obter imagens das estruturas em subsuperfície, e mesmo em regiões de espessa cobertura sedimentar é possível ter

bons resultados com essa metodologia de processamento de dados aéreos (por exemplo, a Bacia do Araripe – CAMACHO; SOUSA, 2017).

É importante ponderar que a atividade sísmica ao longo das zonas de fraqueza parece ocorrer em resposta ao regime de *stress* atual. Esse regime não é necessariamente o mesmo que estava ativo durante a evolução das principais estruturas geológicas presentes no embasamento.

1.2.4. O campo de *stress* intraplaca

De uma maneira geral, um campo de *stress* representa a forma como ocorre a distribuição de forças internas em uma porção crustal, em resposta a um dado conjunto de forças externas atuantes. Esse conjunto de forças aplicadas a uma rocha, por unidade de área, pode causar deformações dúcteis e/ou rúpteis nas rochas em região de maior *strain*. Os três principais tipos de regime de *stress* são típicos dos três tipos de limites de placas: compressão nos limites convergentes, tração nos limites divergentes e cisalhamento nos limites transformantes. O acúmulo de tensões nas partes frágeis da crosta terrestre acaba por liberar as forças tectônicas que levam a deformações em grande escala. Esses ajustes de tensões crustais iniciam-se nas falhas geológicas de primeira ordem, grandes estruturas que marcam os limites das placas tectônicas, como é o caso do *rift* da dorsal meso-oceânica. Com mais de 50.000 km de extensão, a dorsal meso-oceânica do Atlântico é uma estrutura de escala global, resultado de rifteamento, magmatismo e falhamentos associados ao crescimento do assoalho marinho impulsionado pela movimentação das placas tectônicas. Nessa porção da crosta oceânica, uma parte muito maior da energia de deformação é liberada do que na crosta continental, basta vermos a frequência e a magnitude dos sismos registrados ao longo dessa estrutura. Contudo, uma parte dessa tensão é transmitida para o continente por meio das conexões entre as zonas de fratura oceânicas e as zonas de cisalhamento pré-cambrianas (TAVARES, 2022), sendo adicionada ao campo de *stress* presente na porção continental da placa sul-americana. No extremo oeste, a placa tectônica de Nazca aplica uma força em sentido oposto na placa da América do Sul. Desse balanço de forças regionais forma-se o campo de *stress* intraplaca. A energia vai sendo transmitida até a crosta continental, se acumulando e sendo, eventualmente, liberada e resultando movimentação de falhas e fraturas presentes no arcabouço estrutural de alguma porção da crosta continental, em alguns casos com repercussão de abalos sísmicos associados a essa liberação de energia.

Se a grande força motriz tem uma direção claramente definida, isto é, dos limites de placas para a crosta continental, seria razoável esperarmos um campo de *stress* majoritariamente E-W. A partir da comparação entre modelos numéricos do campo de *stress* (COBLENTZ; RICHARDSON, 1996; ASSUMPÇÃO *et al.*,

2016) e estimativas de máximo *stress* horizontal (SHmax) para toda a América do Sul, obtidas a partir dos dados de mecanismos focais compilados, Assumpção *et al.* (2016) chamaram atenção para o fato de que, muito embora o padrão geral de *stress* compressional possa ser observado com SHmax orientado aproximadamente E-W em média (e.g. platô dos Andes e região sudeste do Brasil), rotações de SHmax podem ser observadas localmente, da costa nordeste do Brasil até o delta do Amazonas, aproximadamente (Figura 10). Os eixos SHmax e SHmin (compressão horizontal máxima e mínima) coincidem aproximadamente com as tensões tectônicas regionais máxima (σ_1) e mínima (σ_3), respectivamente (BEZERRA *et al.*, 2011). Análises de rompimento de poços (*borehole breakouts*) conduzidos nas margens equatorial e continental leste, ao norte de 15° S, também apontaram SHmax notavelmente paralelo à linha de costa, seguindo uma curva de 90° da costa no Nordeste do Brasil (LIMA; NASCIMENTO; ASSUMPÇÃO, 1997; REIS *et al.*, 2013). Esse conjunto de observações é realmente intrigante e abre margem para algumas interpretações. Alguns pesquisadores acreditam que o *stress* produzido pelos movimentos das placas tectônicas não explicaria sozinho o campo de *stress* local que gera os terremotos intraplaca em regiões específicas do país, com o é o caso do Nordeste brasileiro e, conseqüentemente, do Ceará. Isso significa dizer que precisamos considerar a possibilidade de fenômenos locais incrementarem o campo de *stress* total dessas regiões.

Devido à observação do SHmax rotacionado para noroeste, posicionando-se quase que paralelo à costa, e o fato de que a maior parte das ocorrências de sismos parece mais concentrada na porção leste, próxima à costa e com grande extensão de crosta fina (ASSUMPÇÃO *et al.*, 2013; RIVADENEYRA-VERA *et al.*, 2019), tem sido cada vez mais defendida a tese de que a combinação de tensões regionais, efeitos flexurais locais de cargas sedimentares espessas e uma crosta presumivelmente mais fraca devido a um afinamento crustal no mesozoico explicariam os principais padrões de sismicidade na margem nordeste brasileira (ASSUMPÇÃO, 1998; ASSUMPÇÃO *et al.*, 2016; FONSECA *et al.*, 2021). Segundo essa linha de interpretação, as tensões transcorrentes na crosta superior resultariam da combinação de compressão aproximadamente E-W com tensões extensionais perpendiculares à costa (tensões flexurais e de contraste lateral de densidade) (LIMA; NASCIMENTO; ASSUMPÇÃO, 1997). Assumpção (1998) alegou que a geometria da costa nordeste controlaria o campo de tensão total resultante: menores magnitudes da tensão diferencial são esperadas em áreas de menor taxa de sismicidade.

Outras situações podem, ainda, ser adicionadas a essa discussão, como os possíveis efeitos na distribuição de tensões na crosta devido a algum contraste de espessura

litosférica, caso que também poderia contribuir para o arranjo de tensões na crosta superior. Estudos utilizando tomografia sísmica de onda P no Brasil central forneceram evidências de que a sismicidade intraplaca poderia estar relacionada à litosfera mais fina no limite entre os crátos Amazônico e São Francisco (ROCHA *et al.*, 2016). Segundo Rocha *et al.* (2016), a transição entre esses dois paleocontinentes é marcada por anomalias de baixa velocidade sísmica, espacialmente bem correlacionados com a região de alta incidência de sismos. Essas anomalias de baixa velocidade da onda P provavelmente indicam afinamento litosférico e, conseqüentemente, espessamento

da astenosfera. A distribuição em profundidade do *stress* regional numa litosfera mais fina seria diferente se comparada com a litosfera mais espessa. Na litosfera mais espessa a maior parte do *stress* concentrar-se-ia no manto litosférico, enquanto nas regiões de afinamento litosférico o *stress* concentrar-se-ia, principalmente, na crosta, permitindo condições para a ocorrência dos eventos sísmicos.

Deste apanhado geral, percebe-se uma combinação de fatores geológicos diversos, em escalas variadas, formando um intrínseco quebra-cabeça que é a questão de como o campo de *stress* na crosta continental é formado e de que formas ele pode influenciar na ocorrência de sismos.

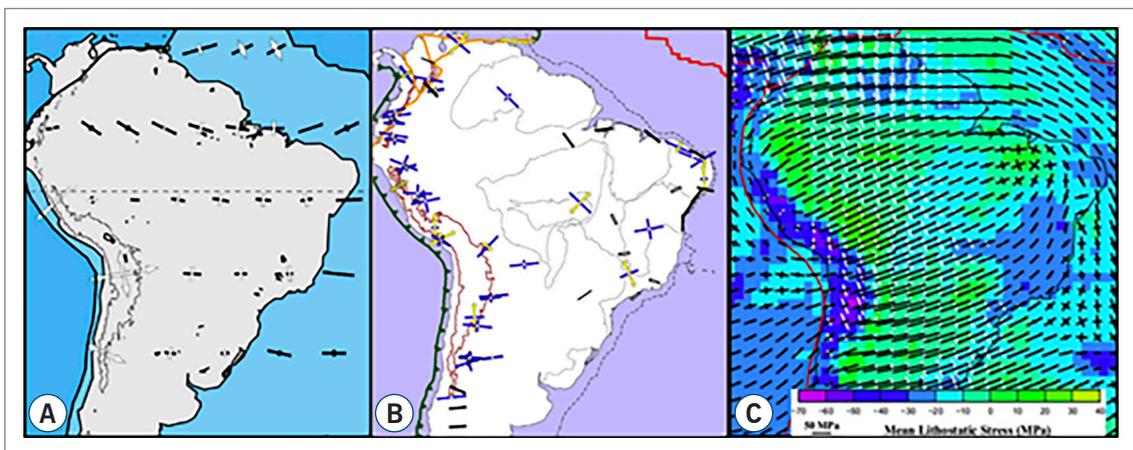


Figura 10 – Modelos de *stress* intraplaca na América do Sul, indicando a distribuição regional dos tensores de máxima compressão horizontal: A) Modelo de distribuição de *stress* regional elaborado por Coblenz e Richardson (1996); B) Modelo de *stress* obtido a partir das soluções observadas de mecanismos focais de sismos, compilados por Assumpção *et al.* (2016); C) Tensões principais devido à energia potencial gravitacional (GPE), ou seja, “tensões de propagação” de variações laterais de densidade, com base no modelo CRUST1.0, decorrente de uma combinação de convecção do manto por densidade e movimento de placas dentro de um modelo de circulação global (ASSUMPÇÃO *et al.*, 2016). Em todos os modelos percebe-se que os tensores na porção norte da América do Sul produzem uma rotação para NW, que se inicia na porção nordeste do Brasil.

2. MÉTODOS

Para compreender melhor o papel do arcabouço estrutural e a dinâmica de alívio de tensão nas três zonas sísmicas localizadas no estado do Ceará, os dados de epicentros de sismos que ocorreram até 2022 (RSBR, 2022) e mecanismos focais compilados (ASSUMPÇÃO, SUÁREZ, VELOSO, 1985; FERREIRA *et al.*, 1998; FRANÇA, FERREIRA, TAKEYA, 2004; OLIVEIRA *et al.*, 2010; ASSUMPÇÃO *et al.*, 2016) foram comparados à base dados geológicos de feições dúcteis e rúpteis, bem como os azimutes dos lineamentos magnéticos interpretados e estimativas de profundidade de topo das anomalias magnéticas obtidas a partir do processamento de dados aerogeofísicos de magnetometria.

2.1. Análise do padrão estrutural

O GeoSGB é o sistema informações geológicas de todo o território brasileiro, gerenciado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), e disponível a todo o público via web. A partir dessa base, foram utilizados: o Mapa Geológico do Estado do Ceará (PINÉO *et al.*, 2020) e a coletânea de dados estruturais (fraturas, foliação e lineação) das folhas 1:100000 Bonhu (CALADO, 2014), Quixadá (COSTA, 2014), Baturité (PINÉO; ZWIRTES; CALADO, 2017), Itapiúna (PALHETA, 2014), Irauçuba (NALETO; ARAÚJO, 2014), Sobral (GORAYEB *et al.*, 2014), Banabuiú (PINÉO, 2014), Quixeramobim (ALMEIDA; PARENTE; ARTHAUD, 2008), e Projeto ARIM Noroeste do Ceará 1:250000 (PINÉO *et al.*, 2019). A distribuição espacial dessas medidas ao longo das zonas sísmicas do Ceará, próximas aos principais mecanismos focais, foi utilizada como critério de separação em grupos, os quais foram, em seguida, organizados em projeções estereográficas. As atitudes de fraturas, foliação e lineação foram plotadas em estereogramas em rede de *Schimit-Lambert* com projeção no hemisfério inferior, utilizando o programa *Openstero* (GROHMANN; CAMPANHA, 2010).

2.2. Aerogeofísica

A elaboração dos mapas geofísicos contou com a integração de nove diferentes projetos aerogeofísicos da base de dados do SGB-CPRM, os quais foram devidamente unidos em uma única malha regular com resolução espacial de 125m, e, em seguida, recortado conforme os limites do estado do Ceará. São eles: Projeto 4010 - Plataforma Continental do Nordeste (1970); Projeto 1022 - Rio Acaraú

(1975); Projeto 4045 - Bacia Potiguar (1986); Projeto 4048 - Bloco Leste da Bacia do Maranhão (1988); Projeto 1074 - Novo Oriente (2005); Projeto 1067 - Pernambuco-Piauí (2006); Projeto 1086 - Norte do Ceará (2009); Projeto 1101 - Sudoeste do Ceará (2010); Projeto 1091 - Paraíba-Rio Grande do Norte-Pernambuco-Piauí (2010).

Para a aquisição dos dados geofísicos, sensores magnéticos foram acoplados a bordo da aeronave e os voos planejados foram espaçados de 0,5 km, entre as linhas de voo N-S, e 10 km, entre as linhas de controle E-W, respectivamente. Foi utilizada a altura média de voo de 100 metros sobre o solo. O magnetômetro utilizado contém um sensor de vapor de césio tipo *sting*, ligado à cauda da aeronave. O campo total na área de estudo tem intensidade aproximada de 25.000 nT e inclinação e declinação magnética estimada em -22,3° e -25,5°, respectivamente. Para monitorar o nível de ruído e a variação diurna do campo geomagnético, foi utilizado um magnetômetro de precessão de prótons *Overhauser* (GHE Systems, modelo GSM-19, com resolução de 0,01 nT).

Os dados foram processados com o uso do *software Oasis Montaj Geosoft* versão 9.10. Foi aplicada a remoção do *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF) aos dados, resultando em um canal no banco de dados referente às anomalias magnéticas crustais. O método de interpolação bidirecional foi utilizado nesses dados, com célula de um quarto do espaçamento entre as linhas de voo (125 × 125 m), resultando no mapa de anomalias magnéticas (AM, ou campo magnético anômalo - CMA). Em seguida, foi feita a redução ao polo magnético (AM-RTP). Regiões contendo lineamentos magnéticos mais expressivos são facilmente reconhecíveis em ambos os mapas e sua utilização conjunta é uma boa forma de iniciar a comparação visual. A fim de otimizar a análise dos lineamentos magnéticos, foram aplicadas técnicas de realce ao grid AM-RTP. O mapa da primeira derivada da AM nas direções x, y, z enfatizam a taxa de variação, ou gradiente, do campo magnético anômalo nas respectivas direções. As derivadas de uma função potencial realçam as altas frequências, podendo indicar a presença de fontes magnéticas rasas. Além disso, delimitam os limites ou contatos entre corpos com diferentes suscetibilidades magnéticas. Esse mapa é comumente utilizado para enfatizar contatos litológicos por meio de variações no "relevo magnético", na identificação de fontes magnéticas anômalas em subsuperfície e para interpretar lineamentos magnéticos, nesse caso podendo estar

correlacionados às falhas, zonas de cisalhamento ou diques de uma dada região (SOUSA, 2021).

Os *grids* das derivadas foram também utilizados para produzir os mapas de gradiente horizontal total (GHT) (CORDELL; GRAUCH, 1985) e gradiente total (GT, ou amplitude do sinal analítico ASA) (NABIGHIAN, 1972, 1974; ROEST *et al.*, 1992), os quais tem como atributo principal enfatizar as regiões de contraste lateral do campo magnético, em especial as bordas de corpos geológicos que têm contraste magnético com as encaixantes e estruturas geológicas, como falhas e grandes zonas de cisalhamento. Também foram gerados os *grids* ISA (MILLER; SINGH, 1994; VERDUZCO *et al.*, 2014) e IGHT (COOPER; COWAN, 2006), que têm como um de seus principais atributos a equalização das amplitudes do sinal magnético das diferentes fontes, do que decorre sua independência da profundidade das fontes, e posicioná-las diretamente sobre seus centros, auxiliando verificar relações de corte entre estruturas, por exemplo. Esse conjunto de dados foi utilizado para facilitar no traço/interpretação dos lineamentos magnéticos associados ao arcabouço estrutural do estado do Ceará. Os azimutes desses lineamentos foram calculados e organizados em rosetas para uma melhor comparação com o *trend* das estruturas geológicas estudadas e direção dos mecanismos focais compilados.

Para se obter uma estimativa da profundidade dessas estruturas e compará-las à informação disponível sobre hipocentro dos mecanismos focais nas zonas sísmicas estudadas, foi utilizada a deconvolução de Euler 3D (THOMPSON, 1982; REID *et al.*, 1990). A profundidade estimada até o topo de uma dada fonte magnética é derivada a partir do campo magnético e de seus gradientes, e o grau de homogeneidade da equação de Euler é expresso como um “índice estrutural”, um fator exponencial que corresponde à taxa de decaimento da anomalia magnética

com a distância entre a fonte e o ponto de medida, e também relacionado à forma geométrica da fonte anômala (REID *et al.*, 1990; BARBOSA; SILVA, 2005). Utilizou-se $SI = 0,5$.

Uma janela de busca normalmente é especificada, a qual é utilizada na inversão para localização de cada solução da equação de Euler. O algoritmo movimenta essa janela de tamanho fixo sobre todo o *grid* e calcula a solução para cada nova posição. A solução é gravada no banco de dados se a incerteza da profundidade obtida é menor ou igual a um dado limite de tolerância especificado, neste caso ajustado em 15%. A deconvolução de Euler padrão é comumente empregada na interpretação de dados potenciais porque ela requer pouco conhecimento *a priori* sobre a geometria da fonte e não necessita de informação a respeito do vetor magnetização na área de estudos (PORTELA FILHO; FERREIRA, 2003). Essa formulação clássica da deconvolução de Euler tem como deficiência a presença de uma indesejável nuvem de soluções (BARBOSA; SILVA, 2005).

A alternativa escolhida neste trabalho foi o uso da deconvolução de Euler localizada sobre os picos do mapa de gradiente total (GT ou ASA) (THURSTON; SMITH, 1997). Nesse caso, uma rotina de pesquisa de picos do GT é o primeiro passo do algoritmo, o qual localiza as altas amplitudes e estima o tamanho da janela usando os locais de pontos de inflexão adjacentes. Esses locais e tamanhos de janelas são usados para definir as janelas de solução da deconvolução de Euler, e o resultado normalmente produz muito menos soluções do que a deconvolução padrão, pois apenas um pequeno subconjunto das células do *grid* será o centro dos “picos” nos dados. O principal benefício desse algoritmo é a redução da nuvem de soluções possíveis indesejáveis, o que facilita o processo de análise e interpretação dos dados (THURSTON; SMITH, 1997; KEATING; PILKINGTON, 2004).

3. RESULTADOS

3.1. Zona Sísmica do Médio Coreaú

3.1.1. Aerogeofísica

As anomalias magnéticas lineares foram realçadas nos mapas temáticos (Figuras 11 A, B, C, D e E), com interpretação de três tipos principais de lineamentos magnéticos (Figura 12): (i) lineamentos de primeira ordem, alguns retilíneos e outros com padrão mais sinuoso, geralmente de grande extensão, com orientação preferencial NE-SW e elevada amplitude magnética nos mapas AM-RTP, GT, GHT e derivadas nas direções x , y e z ; (ii) lineamentos de segunda ordem – de menor extensão e amplitude magnética, e que, em geral, estão orientados paralelamente aos lineamentos de primeira ordem. São interpretados como estruturas relacionadas à trama dúctil, paralelas às foliações tectonometamórficas, podendo corresponder a contatos entre rochas/unidades distintas da litestratigrafia do Domínio Médio Coreaú; (iii) diques – dois conjuntos de lineamentos com trend E-W e NW-SE, estabelecendo relação de corte ortogonal às demais unidades litológicas. O primeiro, de trend E-W, está relacionado aos condutos de diques da Unidade Riacho Aroeiras, restritos à porção oeste ao Batólito Granítico Meruoca. O segundo grupo de alinhamentos magnéticos ocorre na porção NW do Médio Coreaú, com trend NW-SE, e corta as diferentes unidades do embasamento cristalino.

A comparação entre as feições lineares dos mapas aerogeofísicos e os epicentros dos sismos permite a identificação de um conjunto de lineamentos magnéticos que podem ser relacionados diretamente às falhas geológicas ativas sismicamente (Figuras 11E e 12).

A Figura 12, no canto inferior esquerdo, apresenta a roseta do conjunto total dos lineamentos magnéticos, indicando as principais direções do Domínio Médio Coreaú. A análise das direções dos lineamentos magnéticos sugere que as estruturas dúcteis mapeadas apresentam traçado sinuoso e oscilação de direções preferenciais, com maior representatividade das direções NE-SW e em torno E-W, condizentes com o padrão da zona de cisalhamento Sobral-Pedro II.

Foi feita também uma análise dos dados de lineamentos magnéticos por setores próximos aos mecanismos focais compilados, indicados na Figura 12. Na área do Complexo Granja, próximo ao mecanismo C, há maior consistência

da direção NE-SW de alinhamentos magnéticos, o que sugere que esse padrão de deformação dúctil estaria associado à movimentação da zona de cisalhamento Sobral Pedro II, em diversos eventos de reativação dessa estrutura no Neoproterozoico. Na área da Formação Covão, próximo ao mecanismo B, ainda há predomínio de lineamentos magnéticos de direção NE-SW, no entanto, ocorre significativa presença de rupturas magnéticas na direção NW-SE, sugestivo de estruturas rúpteis (falhas) nesta área. Ressalta-se também, a quebra na direção NW-SE dos lineamentos magnéticos desta região, coincidente com a direção das estruturas rúpteis que balizam a margem SW e NE do Granito Meruoca e a borda da Bacia do Parnaíba nas adjacências. Na região da serra da Meruoca os sismos aparentam delinear uma direção NW-SE, compatíveis com os lineamentos rúpteis interpretados aqui, e coincidem com a direção do mecanismo focal (WNW-ESSE) da área. Esses traços NW-SE (rupturas magnéticas) são interpretados como estruturas rúpteis do embasamento, possivelmente associadas à fase deformacional D3 descrita por Pinéo *et al.* (2019), contemporânea a colocação do Granito Meruoca. Portanto, é sugerida a interpretação de que essas falhas possivelmente foram aquelas reativadas em episódios sísmicos recentes, conforme mostra a orientação NW-SE dos sismos na região (Figura 12).

3.1.2. Estrutural

Foi realizada uma análise dos dados de foliações, lineações e fraturas da base de dados do SGB-CPRM para a área de estudos. Na Figura 13 estão indicados os estereogramas de foliação das porções mais próximas aos mecanismos focais compilados para a Zona Sísmica do Médio Coreaú.

Na região referente ao mecanismo focal C, a foliação apresenta planos de direção NE-SW, com mergulho médio para NW (polo em 120/40). Nas proximidades do mecanismo focal B, duas diferentes atitudes são indicadas no estereograma. A foliação é bem marcada pela direção NE-SW (polo máximo em 310/57), indicando mergulho médio de 33° para SE. Já a leste da região próxima à Bacia do Jaibaras, a análise das foliações feita no estereograma mostra a direção NE-SW, em alto ângulo de mergulho 83° para SE (polo máximo em 300/07). Dados de foliação obtidos em rochas pertencentes ao Grupo Ubajara, próximo ao mecanismo focal A, indicam que os planos de direção ENE-WSW, mergulham em média 44° para o quadrante SE (polo máximo em 345/46).

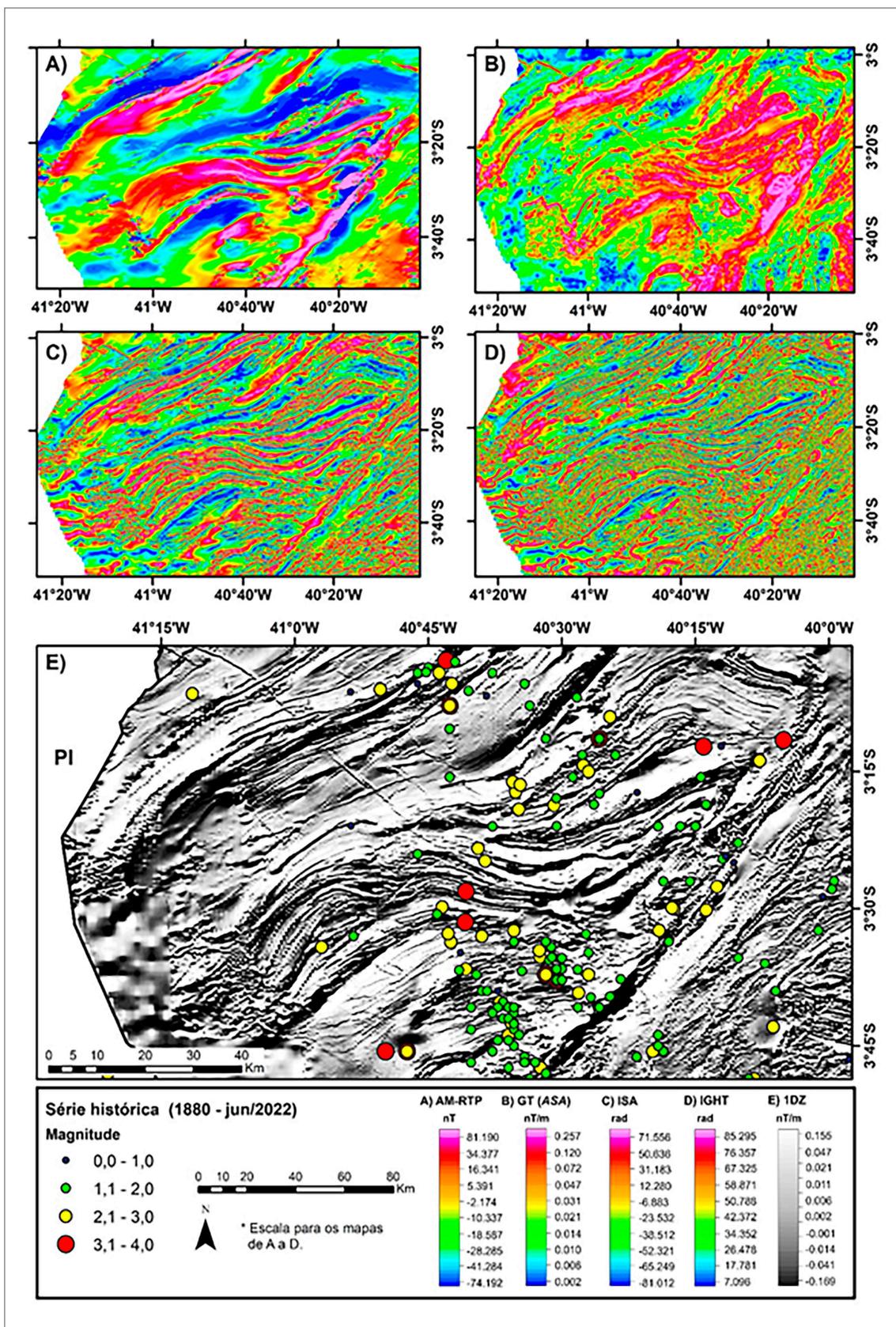


Figura 11 – Mapas aerogeofísicos processados para a Zona Sísmica Médico Coreaú: A) Mapa de anomalia magnética; B) Gradiente total (GT ou amplitude do sinal analítico – ASA) (NABIGHIAN, 1972, 1974; ROEST *et al.*, 1992); C) Mapa de inclinação do sinal analítico (ISA) (MILLER; SINGH, 1994); D) Inclinação do gradiente total horizontal (IGH) (COOPER; COWAN, 2006); E) Mapa da primeira derivada vertical (1DZ), mostrando correlação com os epicentros dos sismos da série histórica RSBR. Fonte: elaborado pelo autor.

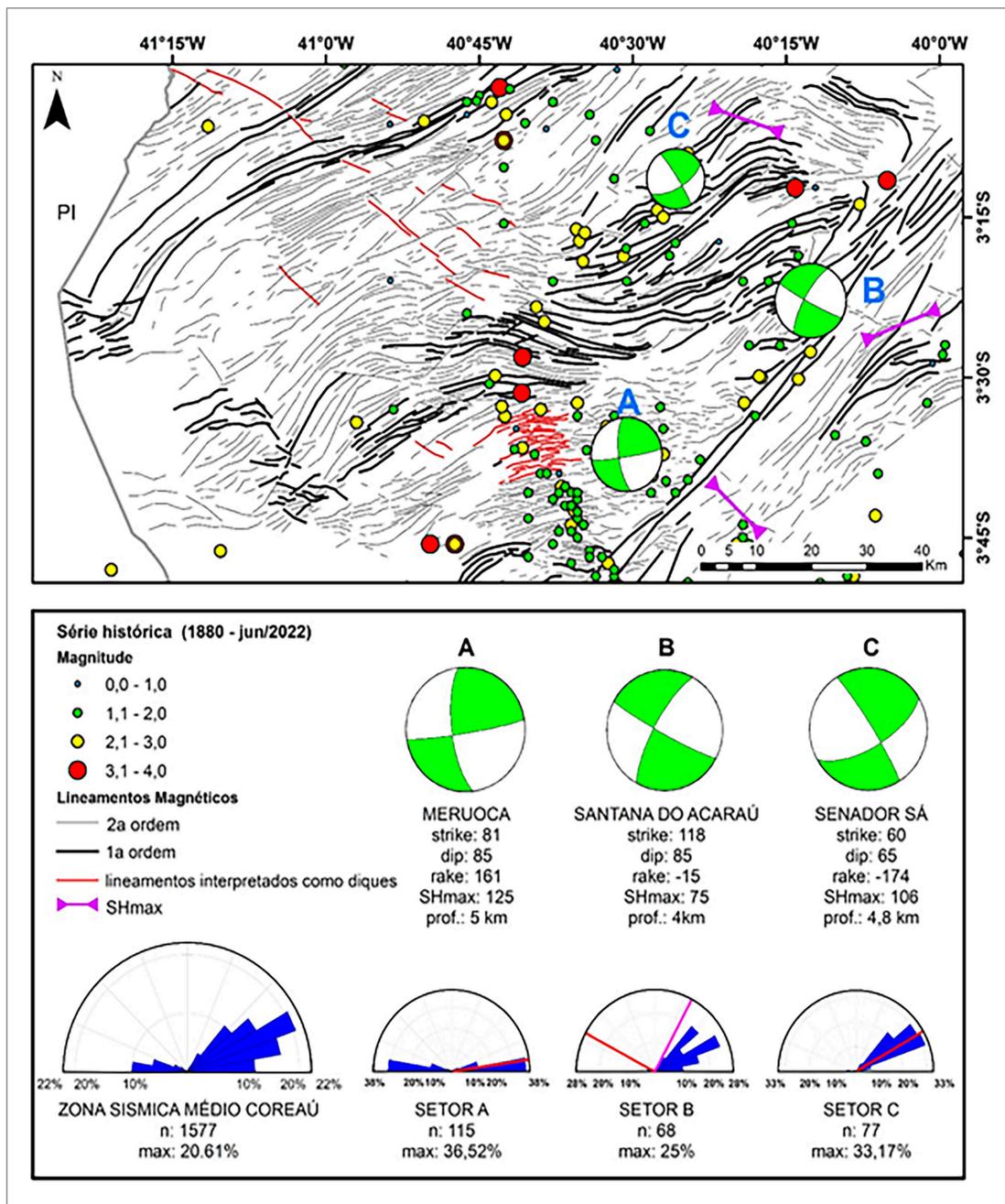


Figura 12 – Mapa de lineamentos magnéticos interpretados, mostrando correlação com os epicentros dos sismos da série histórica RSBR e mecanismos focais compilados. No detalhe, as rosetas dos lineamentos magnéticos indicando as principais direções preferenciais do Domínio Médio Coreaú e dos setores próximos aos mecanismos focais: A) predomínio de lineamentos com direção E-W, similar ao *strike* do mecanismo focal A; B) predomínio de lineamentos com *trend* NE-SW, com significativa variação dentro do mesmo quadrante. Nota-se que a região corresponde à área de intenso dobramento; C) agrupamento de lineamentos magnéticos em área do Complexo Granja. Observa-se maior consistência da direção NE-SW, coerente com o mecanismo focal C e seguindo a direção da zona de cisalhamento Sobral-Pedro II. Linhas em vermelho e magenta nas rosetas indicam os *strikes* das soluções principal e complementar dos mecanismos focais referentes. Fonte: elaborado pelo autor.

Os dados de fraturas compilados para esta zona sísmica são mais localizados e referem-se apenas à região próxima à falha sísmica Riacho Fundo, na Serra da Meruoca. Esses dados indicam pelo menos duas direções preferenciais de fraturamento do corpo Meruoca. As mais representativas são aquelas fraturas de direção WNW-ESSE e E-W,

com mergulhos altos a subverticais, em média com 75° para NNW e N. Polos secundários indicam mergulho para SSW. Para este conjunto de planos de fraturas/falhas, Ramos *et al.* (2021) indicam σ_1 de direção WNW-ESSE, o que sugere que a sismicidade de Riacho Fundo está alinhada com o *trend* E-W das falhas que cortam o Granito

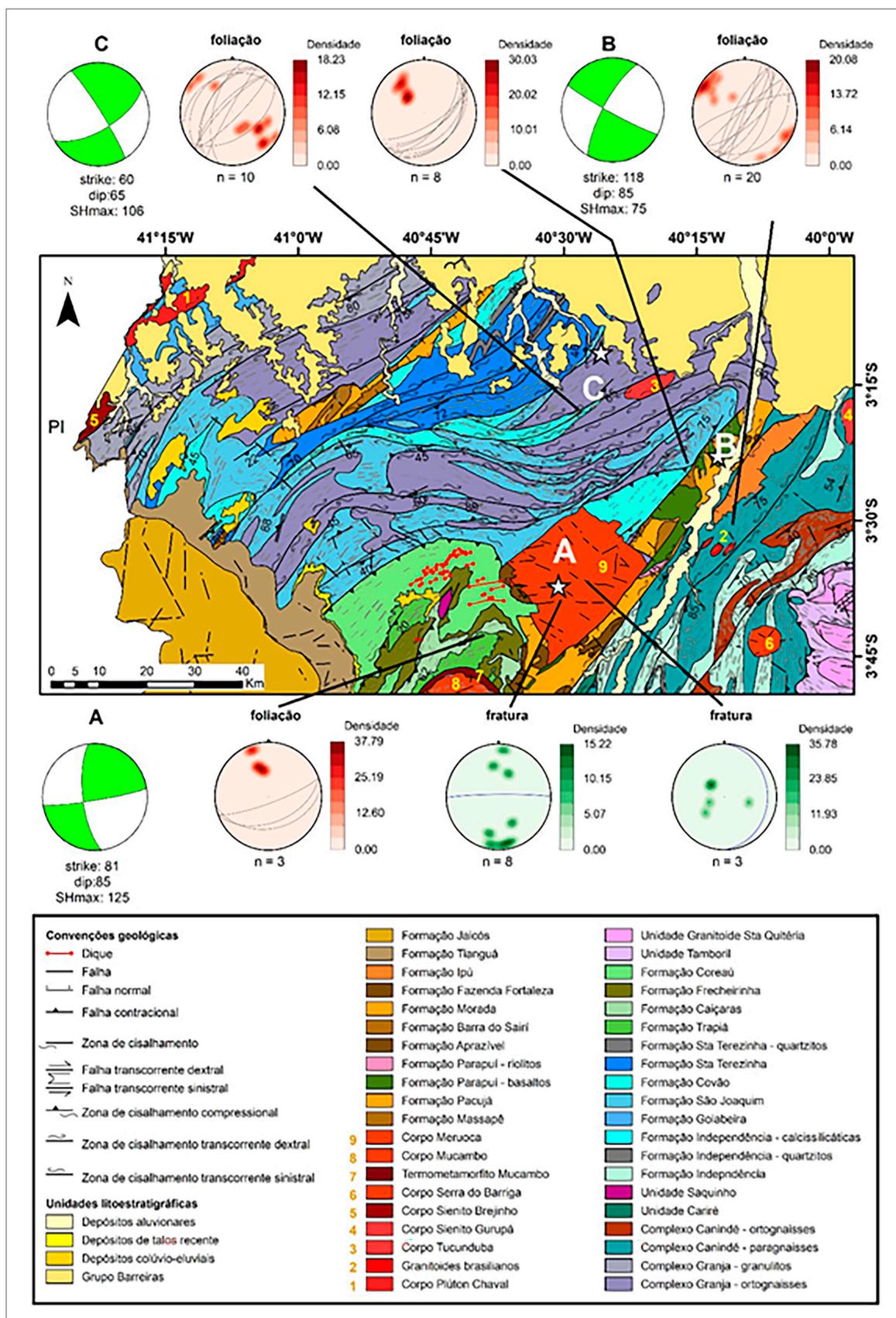


Figura 13 – Mapa geológico da região da Zona Sísmica do Médio Coreáú e, em detalhe, os estereogramas de foliação (vermelho) e fraturas (verde) das estruturas contidas nas porções mais próximas aos mecanismos focais compilados, indicados com as letras A, B e C. Fonte: elaborado pelo autor.

Meruoca, as quais são parcialmente preenchidas por diques basálticos. Almeida e Andrade Filho (1999), sobre a Suíte Magmática Aroeiras, afirmam que os diques estão associados às zonas de cisalhamento e que exibem geometrias compatíveis com fraturas extensionais que formam ângulos de aproximadamente 135° (horário), ou 45° (anti-horário) com o plano principal de cisalhamento e que não apresentam movimento. São diques andersonianos, posicionados ao longo de σ_1 e perpendiculares a σ_3 , associados à transcorrência da zona de cisalhamento Sobral-Pedro II.

3.2. Zonas Sísmicas Cascavel-Beberibe e Quixeramobim

3.2.1. Aerogeofísica

As assinaturas magnéticas dessas duas zonas sísmicas foram realçadas nos mapas temáticos (Figuras 14 A, B, C, D e E), e foram interpretados três tipos principais de lineamentos magnéticos (Figura 15): (i) lineamentos de primeira ordem, retilíneos e geralmente de grande extensão, com orientação preferencial NE-SW e elevada amplitude magnética nos mapas ASA, GHT e derivadas nas direções x , y e z , referentes ao *trend* principal NE-SW da zona de cisalhamento Senador Pompeu. Na região referente à Zona Sísmica Cascavel-Beberibe, apesar da ampla cobertura sedimentar da Formação Barreiras, foi possível observar uma inflexão para N dos lineamentos magnéticos referentes à zona de cisalhamento Senador Pompeu, sugerindo uma geometria com terminação em rabo de cavalo. Isso indica que essa zona sísmica está posicionada exatamente sobre essa terminação e sugere que o campo de tensões encontra ali uma região de alívio de *stress*, reativando as estruturas do embasamento; (ii) lineamentos de segunda ordem – de moderada amplitude magnética que no Ceará Central, principalmente no Complexo Canindé do Ceará, aparentam seccionar com *trend* NE-SW toda a sequência, seguindo a mesma orientação dos lineamentos de primeira ordem. Aqui interpretados como estruturas associadas a uma fase de deformação rúptil posterior. Entretanto, na porção mais próxima à Zona Sísmica Quixeramobim, os lineamentos magnéticos, também classificados como de segunda ordem devido a sua amplitude, apresentam um traçado sinuoso associados a um padrão de deformação dúctil. São lineamentos interpretados como as frentes de cavalgamento que envolvem os complexos Cruzeta e Boa Viagem, e os ortognaisses da Unidade Bananeiras, formados durante as fases de reativação da zona de cisalhamento Senador Pompeu no decorrer do Ciclo Brasileiro, em regime transpressional. A existência de uma sismicidade concentrada nessas regiões de frentes de cavalgamento pode ser observada pela correlação entre os dados dos

epicentros dos sismos e a posição desses lineamentos magnéticos; (iii) diques – conjunto de lineamentos com *trend* SE-NW, estabelecendo relação de corte indiscriminado às demais unidades litológicas, e que podem estar relacionados aos condutos dos diques da Unidade Rio Ceará-Mirim. Esses lineamentos, apesar de cortarem ortogonalmente as demais unidades indiscriminadamente, parecem não ter afetado o núcleo arqueano-paleoproterozoico do Complexo Tróia. Nessa porção, é possível perceber que os lineamentos magnéticos associados ao enxame de diques Rio Ceará Mirim inflexionam, alojando-se paralelos à foliação e às zonas de cisalhamento de segunda ordem.

As análises apresentadas nas rosetas na parte inferior da Figura 15 consistem em detalhamentos dos lineamentos magnéticos extraídos na Zona Sísmica de Cascavel-Beberibe, em regiões próximas aos mecanismos focais, na terminação em rabo de cavalo. A roseta à esquerda na Figura 15 indica a direção NE-SW como dominante nessa zona sísmica, sugerindo o controle estrutural da zona de cisalhamento Senador Pompeu. Nas proximidades dos mecanismos focais, foi feito um detalhamento dos lineamentos magnéticos via separação por regiões, visando um melhor entendimento pela correlação com as soluções dos planos de falha dos mecanismos focais compilados. Com esse detalhamento por zonas (letras A, B, C e D indicadas na Figura 15), mesmo com o predomínio da estruturação imposta pela zona de cisalhamento Senador Pompeu, a roseta de detalhe C indica a direção WNW-ESSE. Essa direção discordante do *trend* NE-SW predominante pode ser representativa tanto dos diques Ceará-Mirim, bem como ser atribuída à inflexão dos alinhamentos nas frentes de cavalgamentos cartografadas na região próxima à Ibaretama (SE de Itapiúna). Trabalhos futuros de cartografia de detalhe poderiam complementar dados e esclarecer esse questionamento.

O diagrama de rosetas representativo dos lineamentos magnéticos extraídos das imagens aerogeofísicas da região da Zona Sísmica Quixeramobim (Figura 16) indica preponderância da direção E-W. Secundariamente, ocorrem lineamentos de direção NE-SW, o que pode ser interpretado como a inflexão dos lineamentos pela cinemática transcorrente de movimentação dextral da zona de cisalhamento Senador Pompeu.

3.2.2. Estrutural

Foi realizada uma análise, por setores, dos dados de foliações e lineações contidas na base de dados do SGB-CPRM para essas duas zonas sísmicas, conforme indicado na Figura 17.

Dados de foliação da área centro norte da Folha Itapiúna, expressos no diagrama vermelho do canto esquerdo

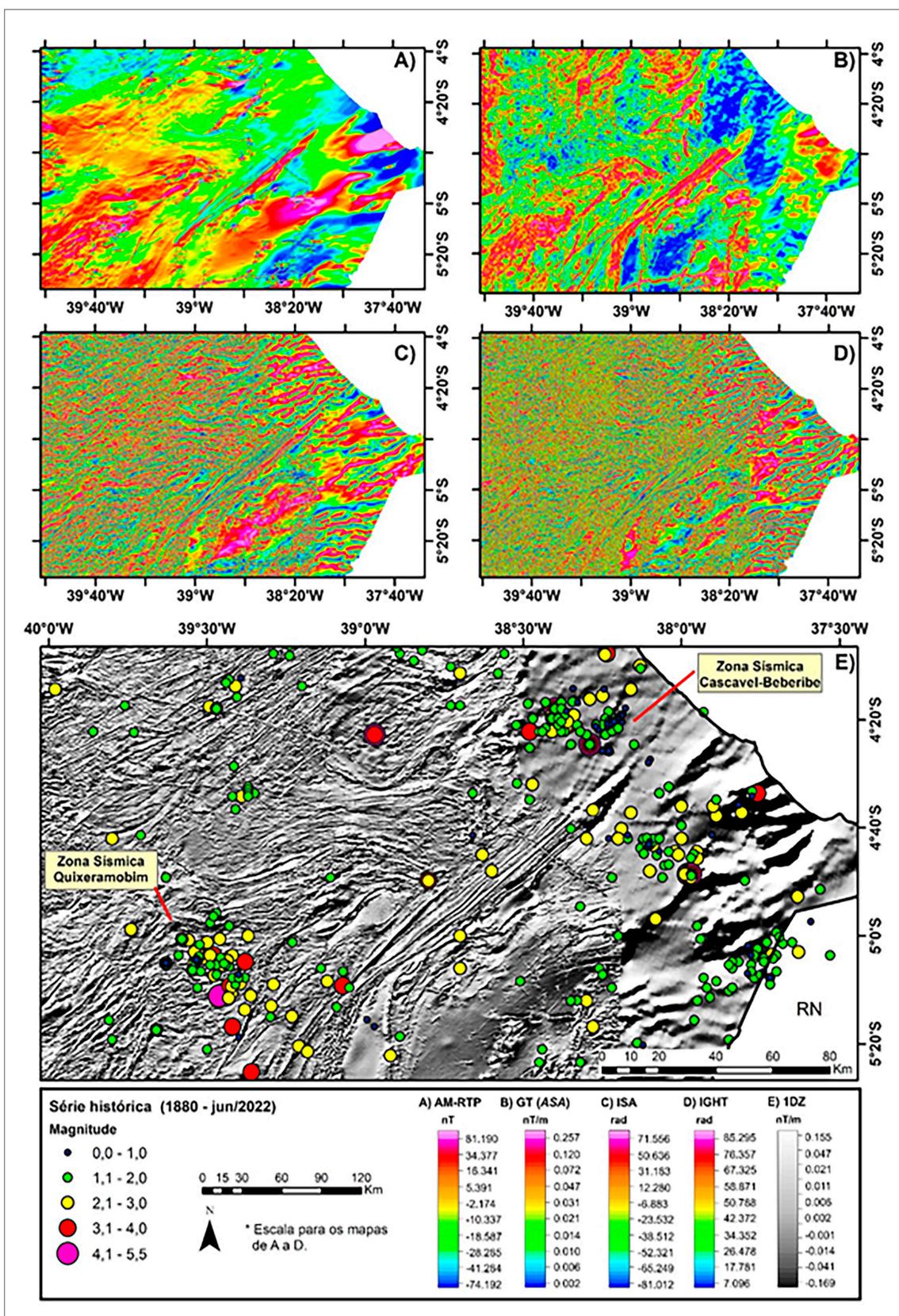


Figura 14 – Mapas aerogeofísicos processados para as zonas sísmicas Cascavel-Beberibe e Quixeramobim: A) Mapa de anomalia magnética; B) Gradiente total (GT ou amplitude do sinal analítico – ASA) (NABIGHIAN, 1972, 1974; ROEST *et al.*, 1992); C) Mapa de inclinação do sinal analítico (ISA) (MILLER; SINGH, 1994); D) Inclinação do gradiente total horizontal (IGH) (COOPER; COWAN, 2006); E) Mapa da primeira derivada vertical (1DZ), mostrando correlação com os epicentros dos sismos da série histórica RSBR. Fonte: elaborado pelo autor.

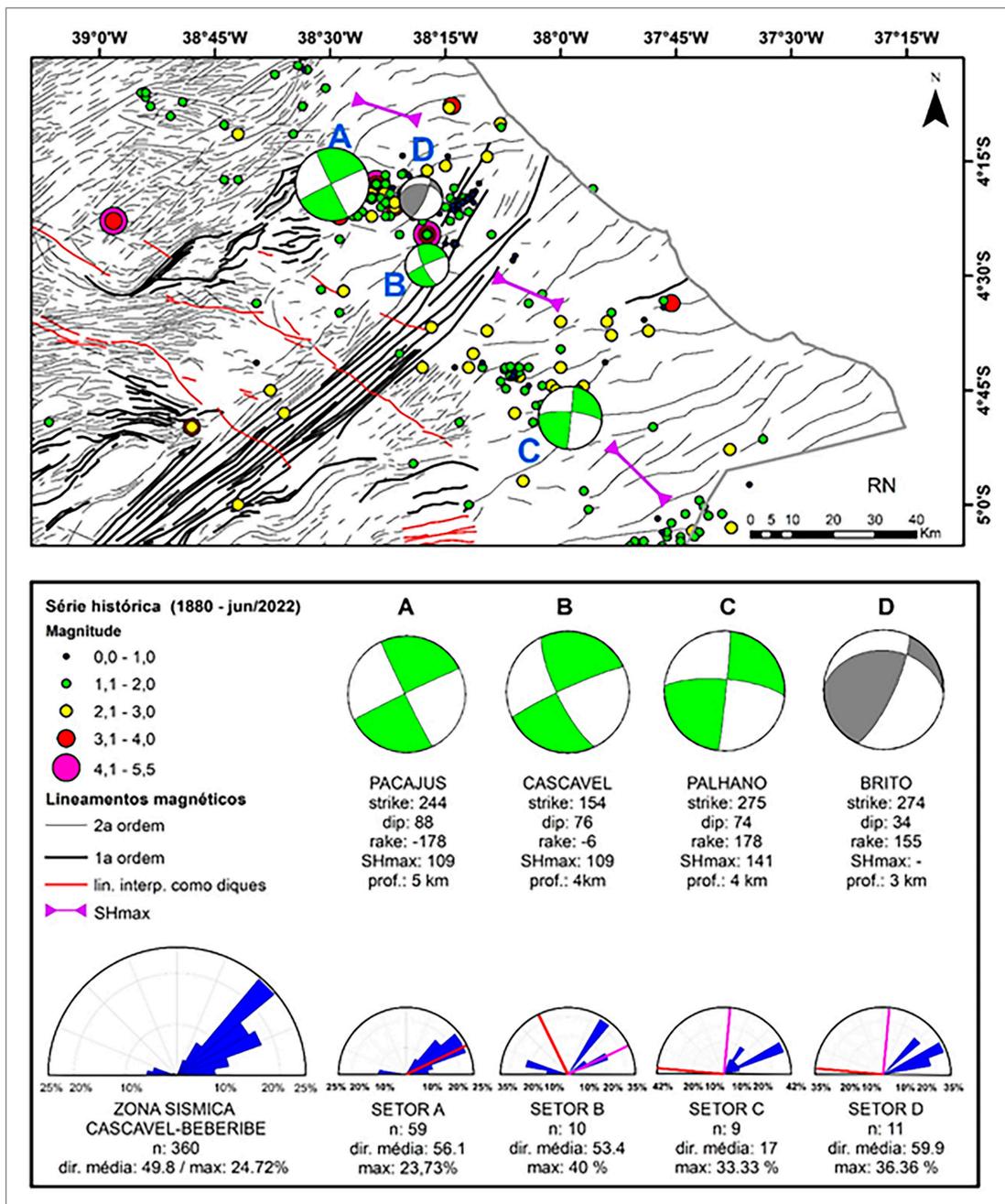


Figura 15 – Mapa de lineamentos magnéticos interpretados da região de influência da zona de cisalhamento Senador Pompeu, mostrando correlação com os epicentros dos sismos da série histórica RSBR e mecanismos focais compilados. Os lineamentos magnéticos revelam uma inflexão da zona de cisalhamento para N, sugerindo uma terminação em rabo de cavalo, justamente onde ocorrem a maior parte dos sismos da Zona Sísmica Cascavel-Beberibe. No detalhe, as rosetas dos lineamentos magnéticos, separadas por setores próximos aos mecanismos focais. A roseta maior indica o *trend* principal para o conjunto total dos lineamentos magnéticos. As linhas em vermelho e magenta nas rosetas indicam as direções das soluções principal e complementar dos mecanismos focais. Fonte: elaborado pelo autor.

inferior da Figura 17, apresentam polo de concentração máximo em 315/45, indicando planos de direção ENE-WSW, em médio ângulo de mergulho (45°) para SE. A esse conjunto é associada lineação oblíqua com caimento de 14° para ESSE (em azul, no canto inferior esquerdo da Figura 17).

O corredor formado pelo paralelismo entre as zonas de cisalhamento Senador Pompeu e Orós, feição dúctil mais

marcante apresentada no mapa, é caracterizada por foliação de direção NE-SW com mergulhos em alto ângulo, variando entre 70° e 80°, preferencialmente para o quadrante SE (estereograma vermelho na porção superior da Figura 17). A lineação associada é direcional, de caimento sub-horizantal para SE (polo máximo em 223/7) (estereograma azul na porção superior da Figura 17). O diagrama de isolinhas

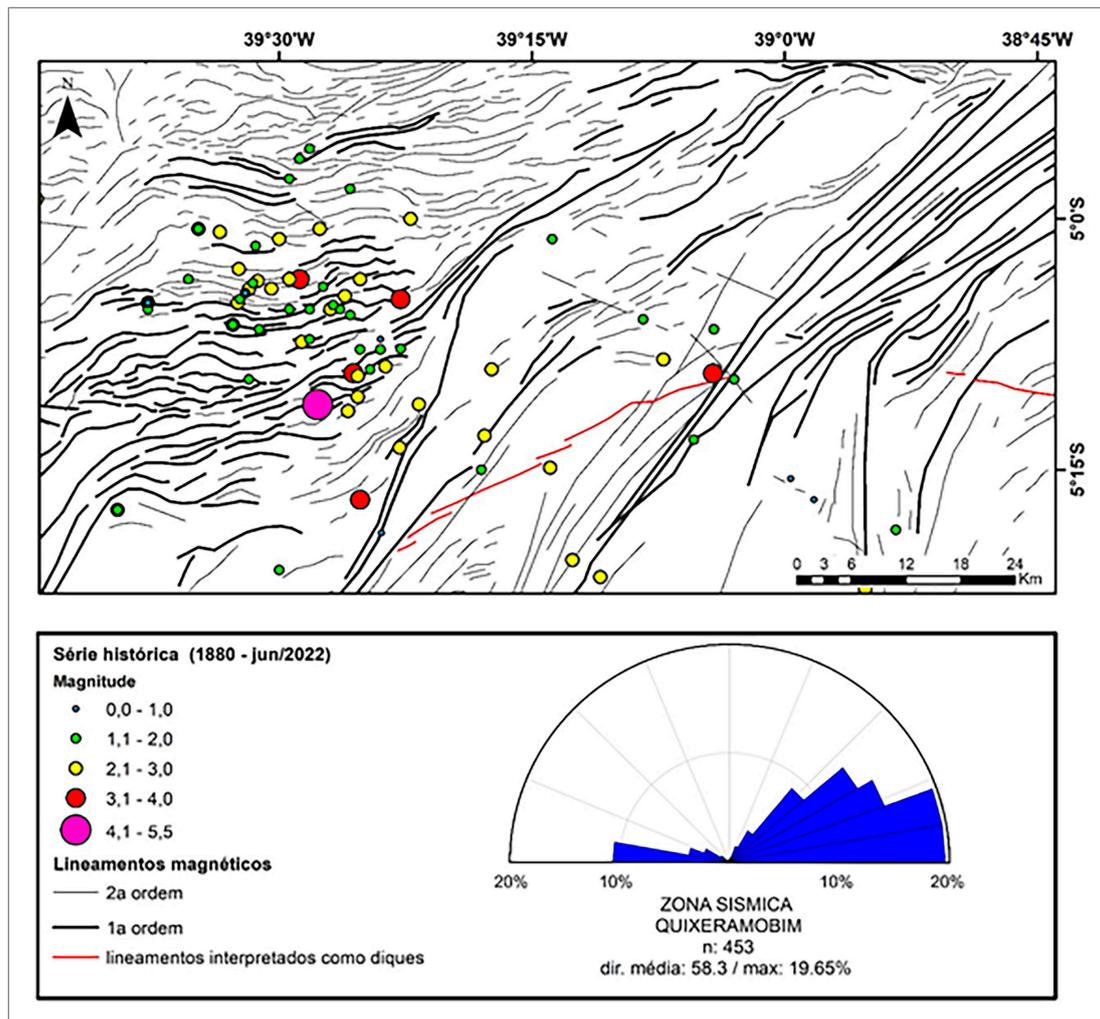


Figura 16 – Mapa de lineamentos magnéticos interpretados para a região da Zona Sísmica Quixeramobim, mostrando correlação com os epicentros dos sismos da série histórica RSBR. A roseta dos lineamentos magnéticos indica que a estruturação do embasamento sofreu forte influência da zona de cisalhamento Senador Pompeu (NE-SW). Os lineamentos com *trend* E-W são correlacionados com as frentes de cavalgamento desenvolvidas ao longo dos estágios de reativação dessa estrutura principal. Fonte: elaborado pelo autor.

de foliação da região, a leste do corredor de cisalhamento, setor representado pela letra C da Figura 17, apresenta dois polos máximos de concentração. O principal indica foliação com mergulho de 45° para SE (polo máximo em 315/45) e o secundário indica mergulho médio de 60° para NW (polo máximo em 114/34). O arranjo é indicativo de uma foliação de direção NE-SW. A lineação associada é direcional à oblíqua, de baixo ângulo de mergulho para NE e SW (em azul, no canto direito inferior da Figura 17). Costa e Palheta (2017) associam a foliação que mergulha para o quadrante SE ao evento compressivo D1, com indicação de transporte para NW.

Com relação às feições rúpteis, a análise do conjunto de atitudes de fraturas da região de Bonhu indicou planos de alto ângulo de mergulho para os quatro quadrantes. São mais frequentes planos de direções NW-SE com alto mergulho 83°, preferencialmente para NE (polo máximo em 249/07). O diagrama de roseta das fraturas indica

predomínio da direção NW-SE pela pétala maior (Figura 18.A). O segundo diagrama (Figura 18.B) forma polo máximo em 137/07, indicando planos de direção NE-SW, em alto ângulo de mergulho (83°) para NW, predomínio também expresso pela pétala mais desenvolvida no diagrama de roseta. No geral, as duas famílias de fraturas principais são de alto ângulo de mergulho e ortogonais entre si. Nota-se ainda que a direção NE-SW é uma direção rúptil, paralela à direção da foliação milonítica (magnética), enquanto que a direção de fraturas NW-SE é ortogonal a estruturação dúctil (magnética). Esta última pode ser observada na imagem magnetométrica com rupturas, ou atenuação do sinal magnético.

3.3. Estimativas de Profundidade

O método da deconvolução de Euler 3D, localizada com índice estrutural 0,5 (Figuras 19, 20 e 21) proporcionou resultados confiáveis quanto à estimativa de profundidade

do topo das principais fontes magnéticas presentes na porção central de cada uma das três zonas sísmicas em estudo A Figura 19 apresenta a distribuição das soluções

da deconvolução de Euler obtidas para as anomalias magnéticas presentes na porção central da Zona Sísmica do Médio Coreaú, região que engloba a Suíte Meruoca

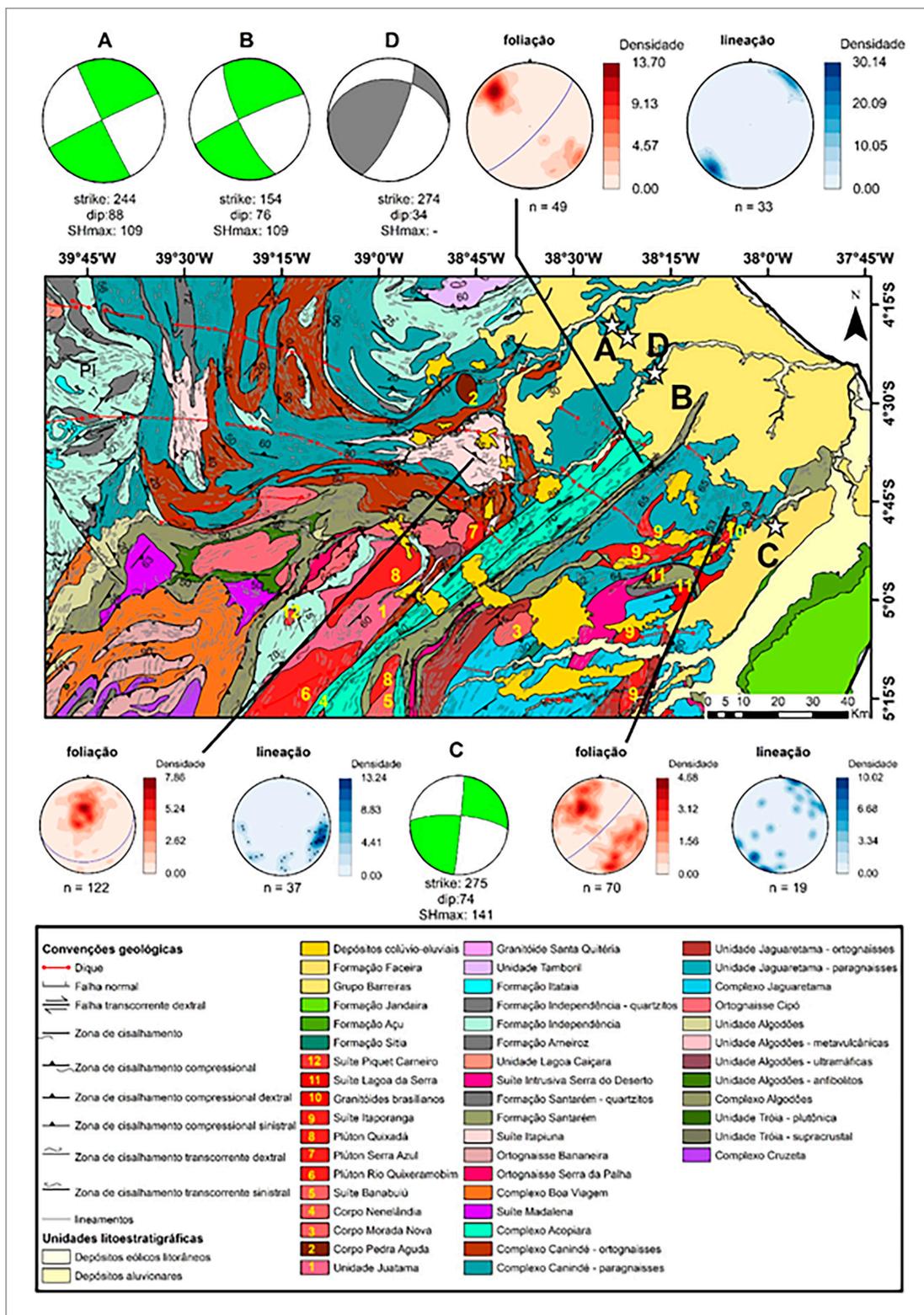


Figura 17 – Mapa geológico da região de influência da zona de cisalhamento Senador Pompeu, que engloba as zonas sísmicas Cascavel-Beberibe e Quixeramobim. Em detalhe, estereogramas de foliação (vermelho) e lineação (azul) das porções mais próximas aos mecanismos focais compilados e, também na Zona Sísmica de Quixeramobim. Fonte: elaborado pelo autor.

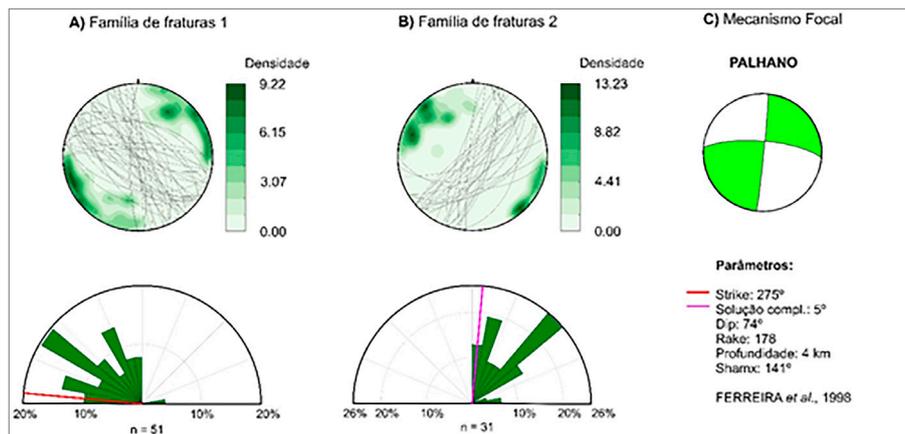


Figura 18 – Estereogramas e rosetas representando as atitudes das estruturas rúpteis medidas próximas ao mecanismo focal C (Figura 20), separadas por quadrantes. Observou-se duas famílias principais de fraturas: A) são mais frequentes planos de direções NW-SE com alto mergulho 83°, preferencialmente para NE (polo máximo em (249/07), com presença de polos secundários; B) o polo máximo em (137/07) indica planos de direção NE-SW, em alto mergulho (83°) para NW, predomínio também expresso pela pétala mais desenvolvida no diagrama de roseta. Observa-se ainda uma segunda direção preferencial, em torno NNE-SSW, para SE. Essa direção de fraturamento é paralela à foliação dúctil principal na área e foi associada ao mecanismo focalem C. Fonte: elaborado pelo autor.

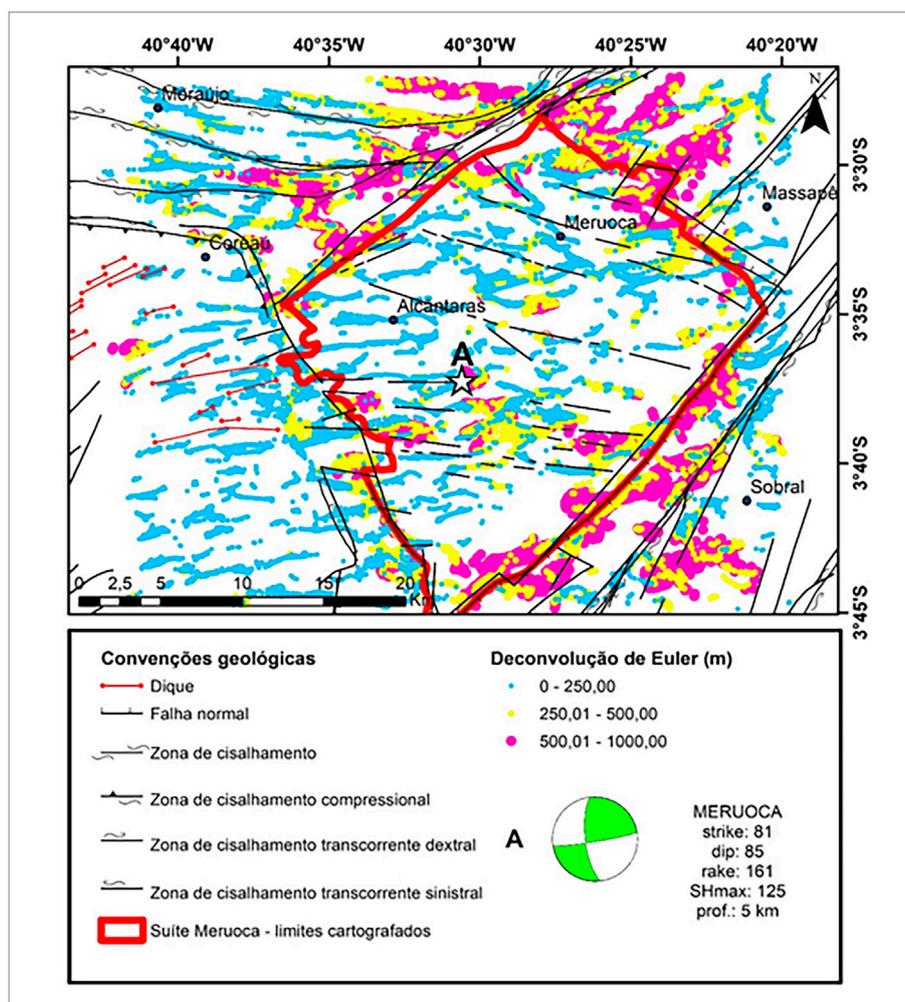


Figura 19 – Mapa de distribuição das soluções da deconvolução de Euler para a porção central da Zona sísmica do Médio Coreaú, na região da Serra da Meruoca (em vermelho). Um conjunto de soluções linearizadas, com *trend* similar ao mecanismo focal A, indicam que as soluções da deconvolução convergiram bem, mapeando a geometria das falhas, conforme comparação direta com os traçados de estruturas cartografadas (em preto). O *trend* magnético adentra o granito, indicando uma trama herdada do embasamento. Fonte: elaborado pelo autor.

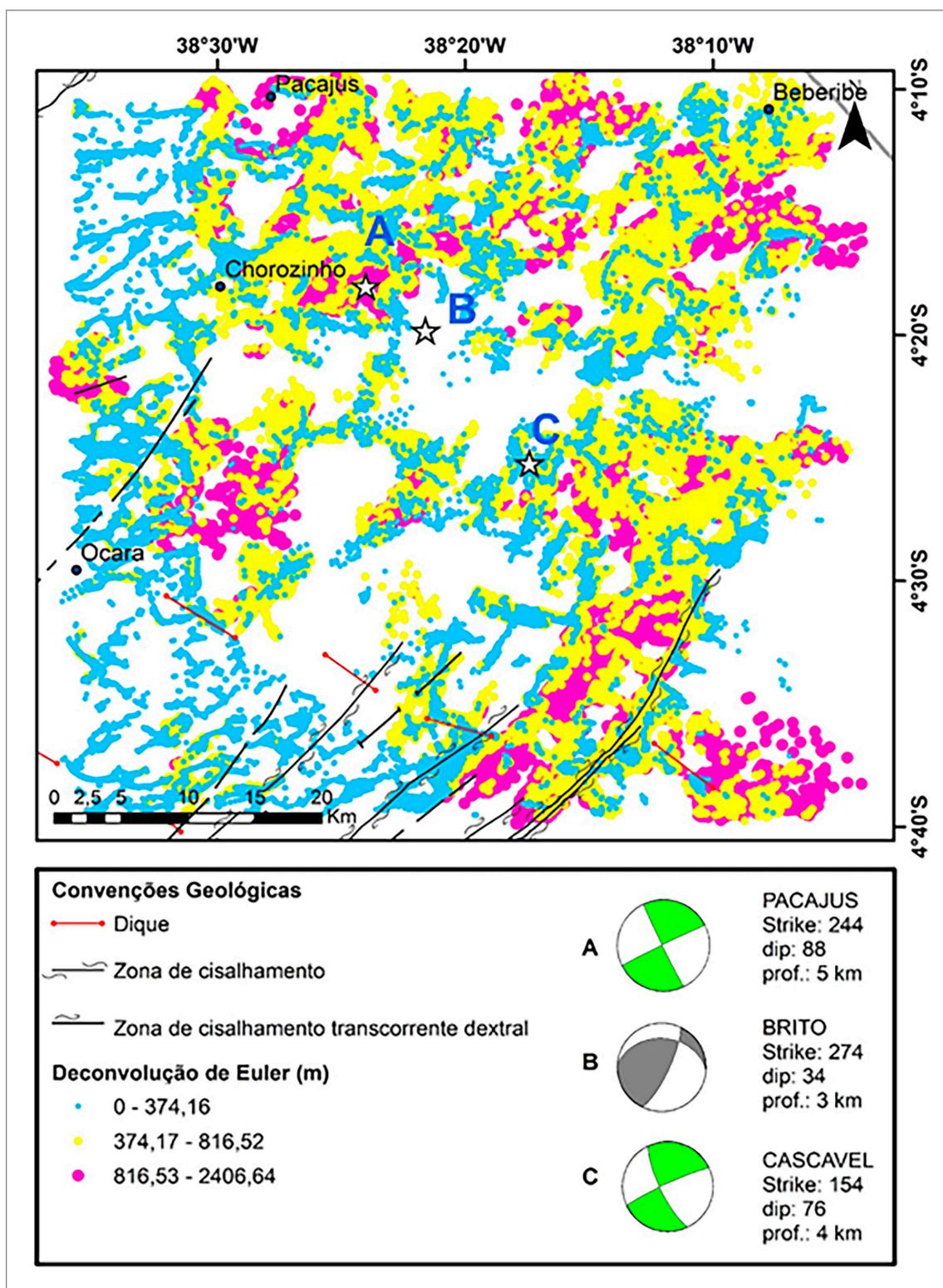


Figura 20 – Mapa de distribuição das soluções da deconvolução de Euler para a porção central da Zona Sísmica Cascavel Beberibe. Nesse caso, para se compor a imagem aerogeofísica foi feita uma combinação de aerolevantamentos com resolução espacial distintas. Além disso, existe ampla cobertura sedimentar da Formação Barreiras nessa porção. Por esses motivos, a porção leste apresenta uma menor convergência quando comparada ao setor oeste da imagem. Uma interpretação possível é que haja um abatimento de bloco na região que favorece a deposição de sedimentos quaternários cada vez maior em direção NE. Ainda assim, é possível observar um conjunto de soluções linearizadas com *trend* similar aos mecanismos focais A e C. Essa zona localiza-se na terminação da zona de cisalhamento Senador Pompeu, de movimentação dextral. Essa mesma cinemática, provavelmente, é a envolvida na movimentação das falhas sísmicas estudadas. Isso tudo reforça a percepção de que devem ser adotadas as soluções complementares para esses dois mecanismos focais. Fonte: elaborado pelo autor.

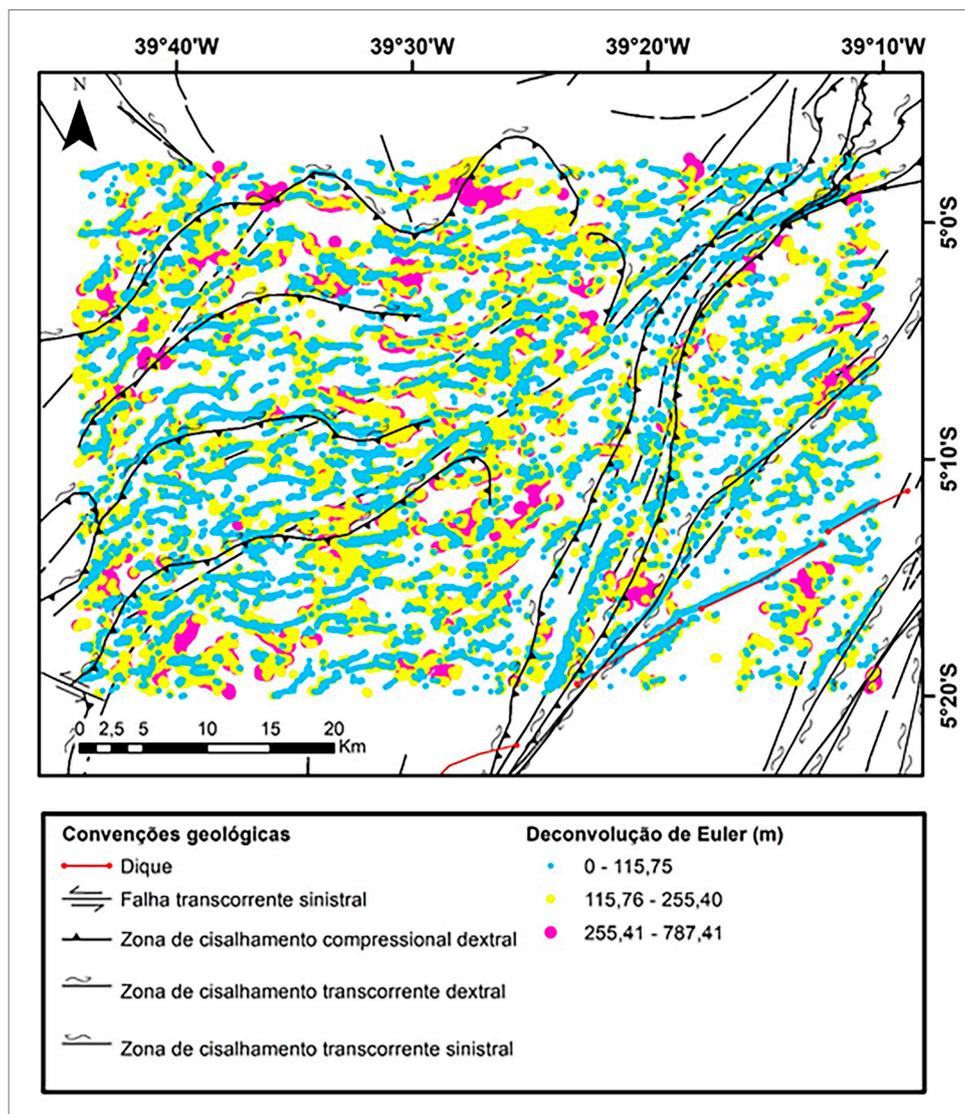


Figura 21 – Mapa de distribuição das soluções da deconvolução de Euler para a porção central da Zona Sísmica Quixeramobim, na porção central do Ceará, onde desenvolveram-se frentes de cavalgamento bastante expressivas regionalmente. Estruturas rasas e profundas se sobrepõem nessa região. Fonte: elaborado pelo autor.

(em vermelho na Figura 19). O resultado desse processamento apresentou um conjunto de soluções linearizadas com *trend* similar ao mecanismo focal A, em geral rasas. As porções que apresentaram maior distância até o topo das anomalias referem-se as porções a norte do granito Meruoca e na zona de cisalhamento Sobral-Pedro II. Isso sugere que as bordas sejam estruturas mais penetrativas na crosta.

A Figura 20 apresenta a distribuição das soluções da deconvolução de Euler para a porção central da Zona Sísmica Cascavel-Beberibe, na porção sobre a zona de cisalhamento Senador Pompeu. As soluções da deconvolução na porção leste apresentam uma menor convergência quando comparadas ao setor oeste da imagem. É importante salientar a presença de coberturas presentes nessa área de estudo, referentes à Formação Barreiras, além de depósitos colúvio-eluviais, aluvionares

e eólicos litorâneos, os quais provocam uma atenuação significativa do sinal magnético. Além disso, para compor as imagens aerogeofísicas dessa porção do estado, foi feita uma combinação de aerolevantamentos com resolução espacial distintas (o aerolevantamento referente ao litoral leste do Ceará, Projeto Aerogeofísico Bacia Potiguar, realizado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural Biocombustíveis (ANP), com espaçamento e altura de linhas de voo distintos dos aerolevantamentos mais recentes e de maior resolução espacial adotados pelo SGB-CPRM). Ainda assim, é possível observar um conjunto de soluções linearizadas com *trend* bastante similar àqueles das soluções complementares dos mecanismos focais A e C.

A Figura 21 apresenta o mapa de distribuição das soluções da deconvolução de Euler para a parte central da Zona Sísmica Quixeramobim, na porção central

do Ceará, onde se desenvolveram frentes de cavalgamento bastante expressivas regionalmente. Estruturas rasas e profundas sobrepõem-se nessa região, mas há um predomínio de fontes rasas. Nessa porção, há extensa exposição de rochas e pouquíssimo desenvolvimento de solos, o que ajuda a explicar esse padrão de soluções da deconvolução de Euler.

De maneira geral, houve boa convergência da nuvem de soluções de profundidades obtidas com a deconvolução de Euler nas três áreas. É importante pontuar que as soluções obtidas ficaram muito próximas do que os dados de mecanismos focais apontam, ou seja, uma sismicidade intraplaca ativando estruturas rasas presentes na porção superior da crosta continental.

4. DISCUSSÃO

4.1. Lineamentos magnéticos, o arcabouço estrutural, os sismos e o campo de *stress*.

Os dados aerogeofísicos ressaltaram uma boa parte das estruturas geológicas do embasamento, relacionadas aos grandes eventos deformacionais tectonotermiais. Interpreta-se que, com o desenrolar dos eventos geotectônicos de formação das principais zonas de cisalhamento da Província Borborema Setentrional, essas grandes estruturas possam ter atingido temperaturas da ordem de centenas de graus Celsius, inclusive superiores a 570 °C (VIEGAS; ARCHANJO; VAUCHEZ, 2013), situação que poderia provocar efeitos de magnetização termoremanente nos minerais ferrimagnéticos e paramagnéticos presentes nos minerais próximos aos planos de cisalhamento (ISLES; RANKIN, 2013; SOUSA, 2021). Os domínios magnéticos distribuídos nos grãos dos minerais ferrimagnéticos e paramagnéticos na zona de cisalhamento poderiam ter sofrido uma magnetização induzida, ou seja, alinhando o vetor de magnetização individual de cada domínio magnético à direção do campo geomagnético da época. Isso poderia tornar a feição linear relacionada ao *strike* desses planos ressaltados nas imagens aerogeofísicas de magnetometria.

No caso dos lineamentos magnéticos interpretados como diques, outro efeito físico explica a sua magnetização. É o conteúdo de minerais ferrimagnéticos na composição do magma que determina a susceptibilidade magnética desse tipo de rocha. No momento de sua cristalização, os domínios magnéticos dos minerais ferrimagnéticos presentes nos diques das unidades Riacho Aroeiras e Rio Ceará-Mirim alinham-se ao campo geomagnético da época, resultando nas feições lineares de alta amplitude observadas nos mapas aerogeofísicos. A disposição dos diques em campo indica as direções de compressão máxima (σ_1) durante seu respectivo evento tectônico, sendo a extensão máxima (σ_3) perpendicular a esse σ_1 . Portanto, a variação nas direções dos lineamentos magnéticos associados a esses eventos rúpteis são também uma indicação indireta da evolução do *stress* crustal ao longo do tempo.

Ambas situações estão diretamente relacionadas aos eventos deformacionais atuantes nessa porção da crosta continental e, por isso, a correlação entre dados de magnetometria e dados de foliação, lineação e fraturas ocorre de maneira tão positiva. A sobreposição de epicentros e mecanismos focais dos sismos, compilados sobre as feições lineares dos mapas aerogeofísicos, mostrou-se uma ferramenta extremamente útil inclusive

para se decidir sobre qual solução de plano falha dos mecanismos focais guarda maior conformidade com o padrão estrutural local. Nos casos dos mecanismos focais dos sismos de Santana do Acaraú e Cascavel, foi observado que as direções dos lineamentos magnéticos associados a esses eventos, bem como o padrão regional de cinemática dextral das estruturas, sugerem a adoção de suas soluções complementares (i.e., a 90° dos planos principais publicados).

Embora haja pelo menos 3 grandes episódios de intrusão de diques no embasamento cearense, suas atitudes e extensão os diferenciam. Os diques Riacho Aroeiras e Guaribas apresentam σ_1 condizente com a direção de transcorrência das zonas de cisalhamento Sobral-Pedro II e Senador Pompeu, respectivamente. Porém, tanto os dados aerogeofísicos quanto os trabalhos de cartografia geológica, em geral, indicam que a direção de abertura do enxame de diques Rio Ceará-Mirim variou bastante no estado do Ceará, situação diferente do que se observa no estado do Rio Grande do Norte, onde esses diques são predominantemente E-W. Foi observado que essas inflexões nas direções de intrusão dos diques têm uma clara diferenciação para sul e para norte do paralelo de longitude de 5 graus para sul, posição que se alinha ao eixo central do *rift* da Bacia Potiguar. Esses diques, relacionados ao evento tectônico de abertura do Atlântico e rifteamento da Bacia Potiguar, têm em sua direção de alojamento o registro de σ_1 que coincide com a direção de máxima compressão horizontal atual, registrada nos diversos mecanismos focais compilados. Essa constatação traz um importante significado tectônico, pois sugere que a direção NW-SE do vetor de máxima compressão horizontal pode ser explicada pelo processo de surgimento do *rift* da Bacia Potiguar. Essa interpretação contrasta com a observação de Bezerra et al. (2011) sobre a falta de conexão entre as zonas sísmicas, e diferencia-se da tese de que o alinhamento de SHmax à costa litorânea ocorre em virtude de uma suposta flexura crustal, devido à carga de sedimentos na plataforma continental (ASSUMPCÃO, 1998; BEZERRA et al. 2011; OLIVEIRA et al., 2015; ASSUMPCÃO et al., 2016; FONSECA et al., 2021). Ao contrário, aqui respeitosamente sugere-se uma nova interpretação, a de que o SHmax não se alinha necessariamente à linha de costa litorânea cearense, mas sim ao enxame de diques Rio Ceará-Mirim, na costa e em qualquer outra parte da Província Borborema Setentrional. Muito embora seja possível que o pacote de sedimentos da plataforma continental possa exercer alguma pequena

contribuição ao campo de *stress* da crosta continental, dificilmente seria capaz de sozinho rotacionar tensores de forma diferencial na costa nordeste. Embora sejam reconhecidos os resultados e implicações da modelagem 2D de campo de stress crustal apresentada por Assumpção e Sacek (2013), também observam-se que outras porções litorâneas têm camadas mais espessas de sedimentos e não apresentam sismicidade ou rotação de SHmax comparável ao que se nota no Nordeste do Brasil. Dados de seções sísmicas da ANP na costa cearense (perfil sísmico L265), que trazem uma descontinuidade a $\sim 9,0$ s (*two way time* – TWT), possivelmente a Moho, não indicaram variação no traçado dessas reflexões que pudesse indicar alguma flexura (TAVARES *et al.*, 2020). Em contrapartida, um evento tectônico rúptil extensional, com registros de abertura de diversas bacias sedimentares intracratônicas e intrusão de feixes de diques basálticos de centenas de quilômetros de extensão, atuando localmente nessa porção da Província Borborema de crosta mais fina, e com σ_1 coincidente com SHmax dos mecanismos focais recentes, tanto a norte quanto a sul da Bacia Potiguar, indicam uma fonte local dotada de energia considerável e capaz de provocar o efeito de rotação do vetor de máxima compressão horizontal de E-W para NW-SE.

Por conta da distribuição de tensões e diferenças reológicas crustais, durante a abertura da Bacia Potiguar, os tensores a norte da bacia alinharam-se em *trend* NW-SE, enquanto a sul da bacia a ruptura dos diques (e, conseqüentemente, σ_1) tenderam a um alinhamento E-W. O traçado dos diques, a norte do paralelo de 5 graus, inflete nas proximidades do núcleo arqueano-paleoproterozoico Tróia-Pedra Branca, sugerindo que uma diferença de competência entre rochas, além de uma variação da espessura crustal nessa porção central do estado cearense, provocaram uma mudança no padrão de intrusão dos diques, fazendo com que se alinhassem às zonas de cisalhamento e foliação na porção do Domínio Jaguaribeano. A parte que intrude perpendicular à zona de cisalhamento Senador Pompeu, cortando as rochas do Complexo Canindé do Ceará, mantém o *trend* NW-SE.

O traçado dos diques evidencia o padrão de abertura da Bacia Potiguar e a correlação entre as direções de SHmax dos sismos atuais; a distribuição dos epicentros e as direções desse enxame de diques sugerem, também, que o processo de rifteamento foi o responsável pela rotação de SHmax nessa porção da placa sul-americana, bem como indica que esse processo de rifteamento ainda está em curso, dada a recorrência de sismos. Percebe-se, ainda, que as diversas zonas sísmicas intraplaca da porção setentrional da Província Borborema estariam interconectadas através dos segmentos desse enxame de diques, e que as inflexões na direção dos diques coincidem também

com os pontos de inflexão na direção de SHmax. É justamente nesses pontos, onde as zonas sísmicas estão posicionadas, o que sugere pontos de acumulação de *strain*, eventualmente liberados na forma de sismos por meio da movimentação de estruturas previamente presentes no arcabouço estrutural (Figura 22).

A Figura 23 apresenta uma possível interpretação do processo de rifteamento, baseado no caso da junção tripla de Afar. A Figura 23.A apresenta o mapa da África Oriental mostrando alguns dos vulcões historicamente ativos e o triângulo de Afar – a chamada junção tripla onde três placas estão se afastando umas das outras: a placa Árabe e as duas placas Africanas (Núbia e Somália) que se dividem ao longo da zona de rift da África Oriental. A Figura 23.C exemplifica o processo de evolução, desde o rifteamento, até o surgimento dos limites de movimentação divergente. A Figura 23.C ilustra o que poderia a ser um processo de rifteamento que se desenvolveu na porção setentrional da Província Borborema.

Portanto, a sismicidade intraplaca na porção setentrional da Província Borborema estaria relacionada com a influência que o regime tectônico extensional rúptil de abertura de oceano Atlântico e evolução do *rift* da Bacia Potiguar ainda produzem no campo de *stress*.

4.2. Eventos deformacionais formadores do arcabouço estrutural cearense

O arranjo estrutural da porção central do estado do Ceará, na qual ocorre vasto registro de atividade sísmica, é marcado por megaestruturas transcorrentes, predominantemente dextrais, delimitadoras de subdomínios tectônicos. Muito embora seja observada uma forte correlação entre feições rúpteis relacionadas ao último evento tectônico, esse rifteamento da dorsal meso-oceânica entre as placas africana e sul-americana, e posterior abertura do *rift* da Bacia Potiguar, não foram os responsáveis pela formação das falhas sísmicas. A formação do arcabouço estrutural dessa porção setentrional da Província Borborema é devido a diversos eventos deformacionais ao longo do tempo geológico, e o tensor SHmax atua de forma a reativar algumas dessas estruturas.

A Figura 24 apresenta uma síntese da compreensão quanto aos eventos tectônicos que construíram o arcabouço estrutural do estado do Ceará. São reconhecidos registros de:

- O evento D1 é reconhecido na porção a oeste das zonas cisalhantes Senador Pompeu e Orós - área correspondente à Folha Bonhu (1:100.000). O evento D1 corresponde ao registro da tectônica compressional, com vergência de dobras para NW, caracterizado por foliação de direção NE-SW, com mergulho médio

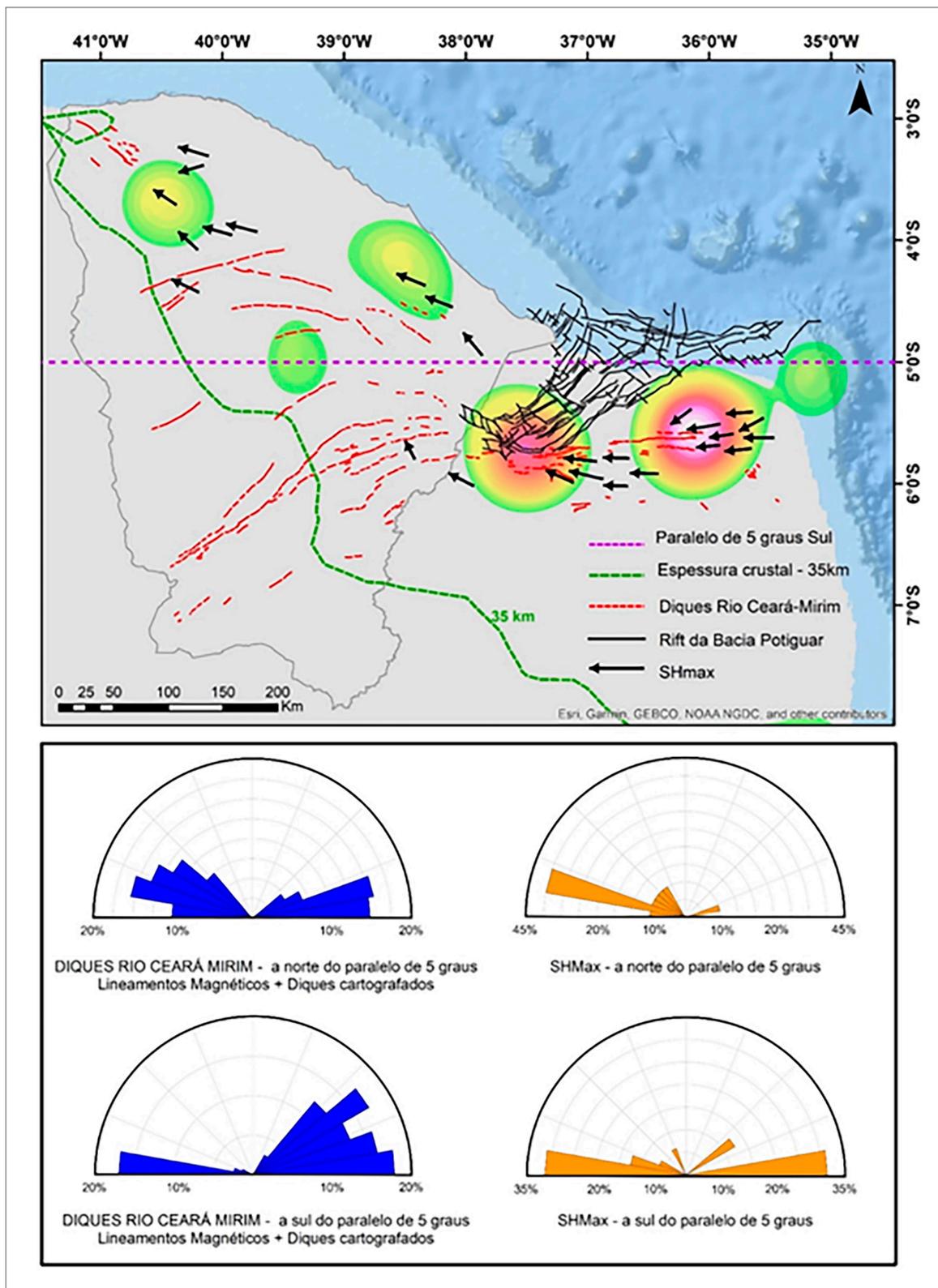


Figura 22 – Distribuição de zonas sísmicas na porção setentrional da Província Borborema, obtidos a partir da distribuição de epicentros de sismos (RSBR) e enfatizando a presença de três zonas sísmicas ativas no Ceará e mais três no Rio Grande do Norte, imediatamente a sul do *rift* da Bacia Potiguar. Em vermelho, o enxame de diques Rio Ceará-Mirim, que apresenta mudança de atitude a partir do paralelo de 5 graus. As setas em preto indicam as direções de SHmax compiladas por Assumpção *et al.* (2016). Percebe-se que a SHmax se alinha aos diques, os quais interconectam as zonas sísmicas. Isso indica que o *stress* atual tem uma componente local devido ao *rift* da bacia, e que provavelmente esse processo ainda está em curso, dada a recorrência de sismos. A geometria do arranjo *rift* + diques lembra uma junção tripla. Fonte: elaborado pelo autor.

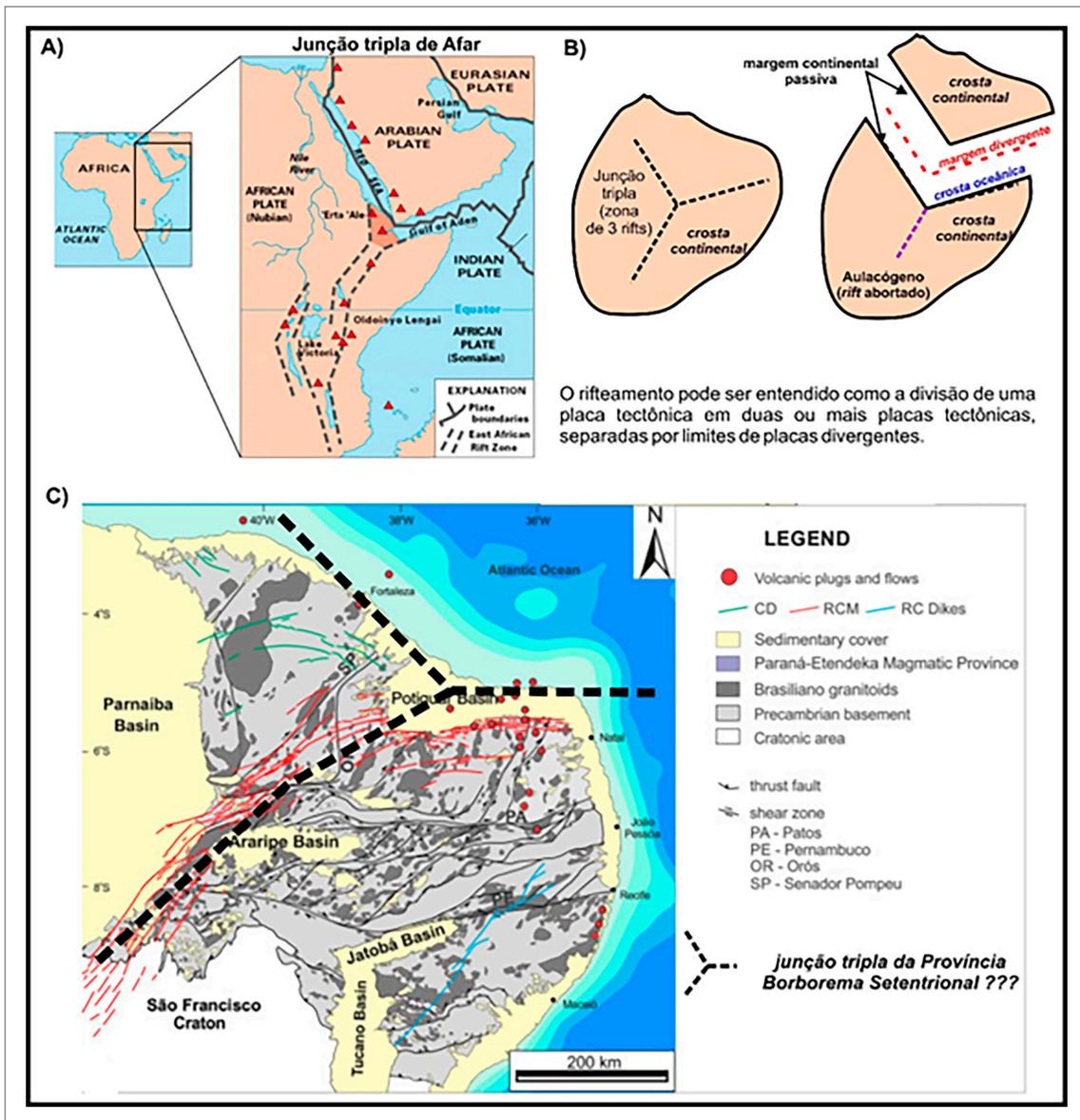


Figura 23 – Interpretação do processo de rifteamento que pode ter ocorrido no nordeste brasileiro, baseado no caso da junção tripla de Afar, no oeste da África: A) Mapa da África Oriental indicando a existência da junção tripla de Afar (KIOUS; TILLING, 1996); B) Diagrama explicativo do processo de evolução desse tipo de rifteamento; C) Localização da Província Borborema e seu enxame de diques Rio Ceará-Mirim (adaptado de MELO *et al.*, 2022) com a sugestão de que o processo de rifteamento, abertura do oceano Atlântico e surgimento do enxame de diques Rio Ceará-Mirim poderiam estar relacionados, de alguma maneira, a uma junção tripla nos mesmos moldes de Afar.

de 46° para SE. A lineação é direcional a oblíqua, com caimento sub-horizontal. D1 é correlacionável a Dn+1, de Costa *et al.* (2018), e a D1, de Costa e Palheta (2017);

- O evento D2 é o evento da implementação das transcorrências dextrais de direção NE-SW, e é correlacionável a Dn+2 de Costa *et al.* (2018);
- Para região de Quixadá-Itapiúna, Costa e Palheta (2017) afirmam que em D2 a evolução ocorreu de forma progressiva para regime transcorrente-transpressivo, de direção NE-SW

e movimentação dextral. A tectônica transpressiva impôs uma estruturação localizada de *nappes*, que afetaram tanto as rochas paleoproterozoicas quanto as neoproterozoicas. Desta forma, a porção noroeste da área registra empurrão com deslocamento de massa para SW, enquanto na região central os empurrões sucederam-se com transporte de massa para N/NE;

- Na Zona Sísmica Quixeramobim, o evento D2 que gerou foliação é de direção ENE-WSW, com mergulho médio 45° para o quadrante SE, sendo associada

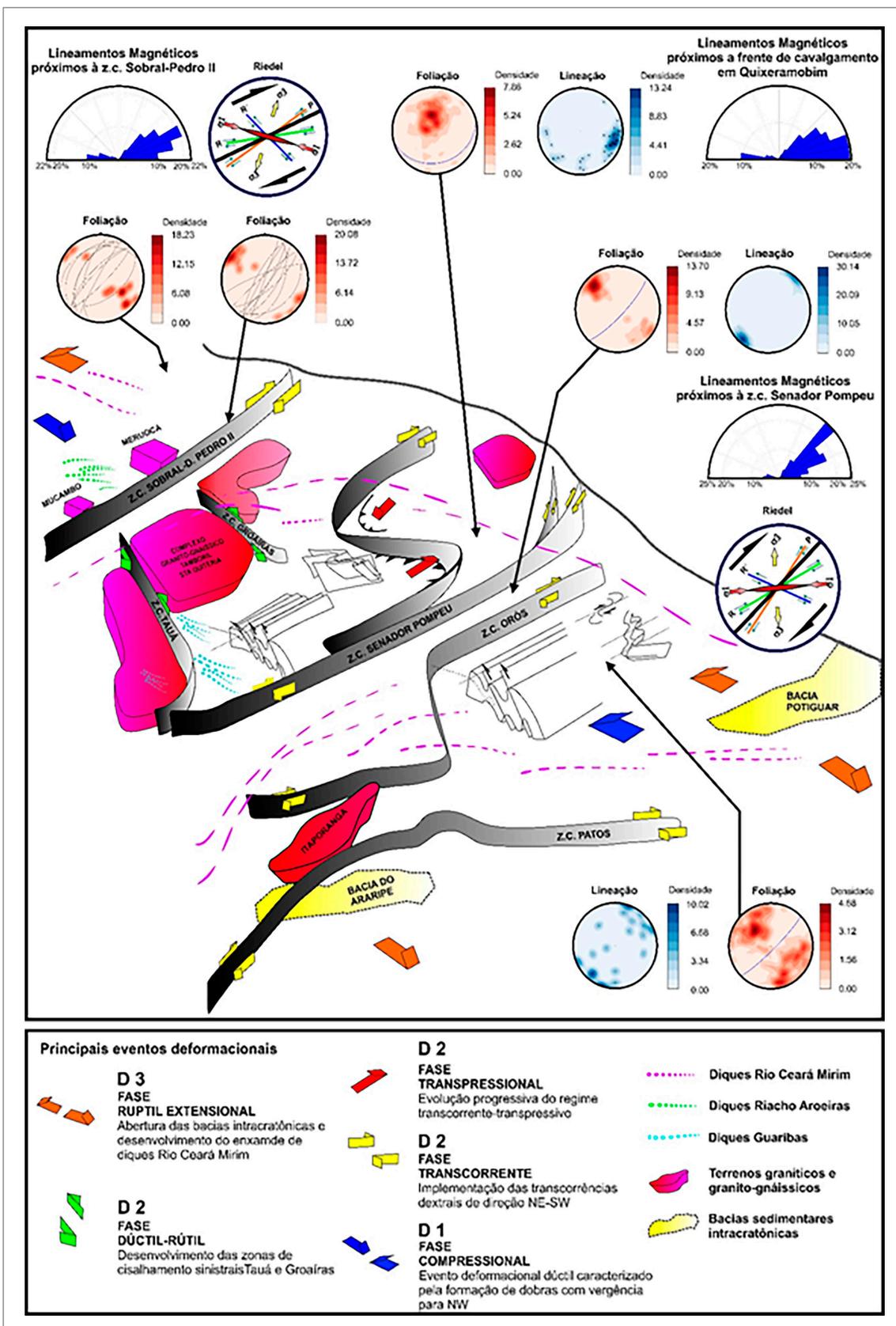


Figura 24 – Modelo estrutural simplificado para o estado do Ceará, descrevendo as principais fases relacionadas aos eventos deformacionais pré-cambrianos (D1 e D2) e cenozoicos (D3), adaptado a partir de Costa e Palheta (2017). Fonte: elaborado pelo autor.

à lineação oblíqua, com caimento de 14° para ESSE. A análise dos alinhamentos magnéticos indica preponderância da direção E-W. Lineamentos de direção NE-SW podem ser interpretados como a inflexão desses pela cinemática transcorrente de movimentação dextral da zona de cisalhamento Senador Pompeu;

- Na Zona Sísmica Cascavel-Beberibe, em área de influência das zonas cisalhantes de Senador Pompeu e Orós, o evento D2 é transcorrente e caracterizado por foliação de direção NE-SW, com mergulhos médios a altos, preferencialmente SE. A lineação é direcional, de caimento sub-horizantal, preferencialmente para SE;
- Na Zona Sísmica do Médio Coreaú, na área de influência da zona de cisalhamento Sobral-Pedro II, próximo ao mecanismo focal B (ver também na Figura 13), a foliação exibe de direção NE-SW com alto ângulo (83°) para SE na porção a leste da Bacia do Jaibas. Na Formação

Covão, a foliação é NE-SW, com mergulhos médios 33° para SE, e próximo ao mecanismo C (Figura 13), em área do Complexo Granja, exibe mergulho de 50° para NW;

- A roseta de alinhamentos magnéticos ressalta a direção NE-SW como predominante e indica a direção em torno de E-W. A essa direção são relacionadas fraturas que cortam a Suíte Meruoca, com mergulhos médios de 76° para NNW.
- O evento D3 é correlacionável a Dn+3 de Costa *et al.* (2018). Representa a fase deformacional em regime rúptil-dúctil, no qual ocorreu a implementação de estruturas de direções predominantemente NW-SE e com cinemática sinistral (zonas de cisalhamento Tauá e Rio Groaíras).
- O evento D4 rúptil extensional é relacionado à abertura das bacias cretáceas intracratônicas (ex.: bacias Potiguar, do Araripe, Rio do Peixe, etc.) e alojamento do enxame de diques Rio Ceará-Mirim.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho utilizou dados aerogeofísicos, sismológicos e geológicos para evidenciar a associação entre as falhas sísmicamente ativas e o arcabouço estrutural da crosta continental na região do estado do Ceará.

A distribuição dos epicentros dos últimos sismos ocorridos no estado do Ceará evidenciou a existência de três zonas sísmicas principais, concentradas próximas às duas grandes zonas de cisalhamento de escala regional, Sobral-Pedro II e Senador Pompeu. O conjunto de mecanismos focais compilados indicaram que as falhas sísmicas têm uma cinemática predominantemente de movimentação dextral em regime transcorrente, em associação com SHmax tendendo a se posicionar paralelo ao *trend* do enxame de diques Rio Ceará-Mirim tanto a sul quanto a norte da Bacia Potiguar. As zonas sísmicas são interpretadas como regiões que sofreram reativações de planos do arcabouço estrutural preexistentes devido ao balanço de tensões na porção superior da crosta continental. Esse balanço envolve fontes regionais (“empurrão” E-W provocado pela expansão de assoalho da dorsal meso-oceânica) e locais (*rift* da Bacia Potiguar).

Os mapas aerogeofísicos possibilitaram uma clara visão do padrão estrutural regional das estruturas dúcteis presentes nas zonas sísmicas estudadas. As estimativas de profundidade obtidas, em consonância com os hipocentros dos sismos catalogados, indicaram que as falhas sísmicas em análise são estruturas rasas contidas na crosta superior. No entanto, é a partir da correlação com o conjunto de dados de atitudes medidas em campo que ocorre o entendimento dos processos atuantes, ou seja, a comparação entre lineamentos magnéticos interpretados, e a análise estatística do conjunto de estruturas é o processo necessário para se discernir que tipo de estrutura representa os traços de lineamentos. Os resultados obtidos respaldam a análise conjunta como ferramenta no mecanismo de falhas sísmicas ativas em regiões continentais.

Com o uso dos dados aerogeofísicos, foi possível observar uma geometria diferenciada para a porção leste da zona de cisalhamento Senador Pompeu, sugerindo uma inflexão da estrutura para N, próximo à costa litorânea, com uma terminação em rabo de cavalo. Trabalhos futuros de cartografia em detalhe podem coletar mais dados de campo para corroborar esta hipótese.

A partir da correlação de dados, verificou-se que para os mecanismos focais de Santana do Acaraú e de Cascavel a solução complementar é aquela que melhor se ajusta

ao conjunto de estruturas presentes no arcabouço estrutural cearense. Sabe-se que a cinemática das zonas de cisalhamento Senador Pompeu e Sobral-Pedro II é dextral, assim como ocorre com a maioria das estruturas do arcabouço estrutural dessas porções do estado. Essa cinemática, provavelmente, é a mesma envolvida na movimentação das falhas sísmicas estudadas para esses casos. Isso tudo reforça a percepção de que devem ser adotadas as soluções complementares para esses dois mecanismos focais. Existe também a possibilidade de que algumas das falhas sísmicas reativadas sejam de direção NW-SE e movimento normal (extensão). A própria espessura da crosta continental sendo progressivamente mais fina em direção a linha de costa NW-SE sugere uma estruturação regional de abatimento de blocos em falhamento normal (margem rifteada). Trabalhos futuros de mapeamento em detalhe dessas estruturas são necessários para um melhor entendimento dessa interpretação.

Muito embora a identificação de todas as possíveis fontes que formam o campo de *stress* intraplaca seja ainda uma questão em pleno debate, este trabalho sugere que SHmax se alinha aos diques Rio Ceará-Mirim, os quais interconectam as diversas zonas sísmicas da Província Borborema setentrional. Isso indica que o *stress* atual tem uma componente local devido ao *rift* da bacia, e que, provavelmente, esse processo ainda está em curso, dada a recorrência de sismos.

Embora esse evento deformacional não tenha sido o formador da maioria das falhas sísmicas mapeadas no arcabouço estrutural do estado, pode-se dizer que é por meio da movimentação/reativação de estruturas preexistentes do arcabouço estrutural da crosta superior, as chamadas zonas de fraqueza crustais, por onde geralmente as concentrações de *strain* são liberadas na forma de ondas sísmicas. Essas concentrações de *strain* estão espacialmente correlacionadas com a presença de zonas sísmicas e inflexão na direção tanto dos diques Rio Ceará Mirim quanto dos vetores SHmax.

Este estudo forneceu uma revisão interdisciplinar e síntese do progresso científico relacionado ao estudo da sismicidade intraplaca, especificando alguns métodos e interpretações que vêm sendo utilizados para se avançar no conhecimento dos processos que desencadeiam, mantêm e controlam o campo de *stress* na porção da crosta continental sul-americana na qual está inserido o estado do Ceará.

REFERÊNCIAS

- AGURTO-DETZEL, H.; ASSUMPÇÃO, M. S.; BIANCHI, M. B.; PIRCHINER, M. Intraplate seismicity in mid-plate South America: correlations with geophysical lithospheric parameters. **Geological Society, London, Special Publications: Seismicity, Fault Rupture and Earthquake Hazards in Slowly Deforming Regions**, London, v. 432, p. 73-90, 2017.
- ALMEIDA, A. R.; ANDRADE FILHO, J. F. A Suíte magmática Aroeiras – Sobral-CE: Petrologia, Mecanismo de *emplacement* e posição estratigráfica. **Revista de Geologia**, v. 12 p. 52-68, 1999.
- ALMEIDA, A. R.; PARENTE, C. V.; ARTHAUD, M. H. **Boa Viagem - SB.24-V-D-III**: nota explicativa integrada com Quixeramobim e Itatira. Fortaleza: UFC/CPRM, 2008. 196p. 1 mapa, color. Escala 1:100.000 (Programa de Geologia do Brasil – PGB).
- ALMEIDA, C. N.; GUIMARAES, I. P.; BEURLEN, H.; TOPITSCH, W. M.; FERRER, D. M. M. Evidências de metamorfismo de alta pressão na faixa de dobramentos Pajeú – Paraíba, Província Borborema, nordeste do Brasil: petrografia e química mineral de rochas metamórficas. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 39, n. 3, p. 421-434, 2009.
- ALMEIDA, S. A. **Geologia, geoquímica e geocronologia da suíte intrusiva máfica-ultramáfica de Boa Viagem, Ceará, Brasil**. 2014. 75 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.
- ARCHANJO, C. J.; LAUNEAU, P.; HOLLANDA, M. H. B. M.; MACEDO, J. W. P. Scattering of magnetic fabrics in the Cambrian alkaline granite of Meruoca (Ceará State, northeastern Brazil). **International Journal of Earth Sciences**, New York, v. 98, p. 1793-1807, 2009.
- ARTHAUD, M. H. **Evolução neoproterozóica do grupo Ceará (domínio central, NE Brasil: da sedimentação à colisão continental brasileira)**. 2007. 132 p. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.
- 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. **Geological Society**, London, v. 294, p. 49-67, 2008. (Special Publications).
- ARTHAUD, M. H.; LANDIN, D. F. Relações da sequência metassedimentar de Quixeramobim com seu embasamento. *In*: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 16., 1995, Recife. **Anais [...]**. Recife: SBG, 1995. p. 125-128.
- ASSUMPÇÃO, M. Seismicity and Stresses in the Brazilian Passive Margin. **Bulletin of the Seismological Society of America**, Albany, v. 88, n. 1, p. 160-169, 1998.
- ASSUMPÇÃO, M.; BIANCHI, M.; JULIÀ, J.; DIAS, F. L.; FRANÇA, G. S.; NASCIMENTO, R.; DROUET, S.; PAVÃO, C. G.; ALBUQUERQUE, D. F.; LOPES, A. E. V. Crustal thickness map of Brazil: data compilation and main features. **Journal of South American Earth Sciences**, Oxford, v. 43, p. 74-85, 2013.
- ASSUMPÇÃO, M.; DIAS, F. L.; ZEVALLOS, I.; NALIBOFF, J. B. Intraplate stress field in South America from earthquake focal mechanisms. **Journal of South American Earth Science**, Oxford, v. 71, p. 278-295, 2016.
- ASSUMPÇÃO, M.; SACEK, V. Intra-plate seismicity and flexural stresses in central Brazil. **Geophysical Research Letters**, Washington, v. 40, p. 1-5, 2013.
- ASSUMPÇÃO, M.; SUÁREZ, G.; VELOSO, J. A. Fault plane solutions of intraplate earthquakes in Brazil: some constraints on the regional stress field. **Tectonophysics**, Amsterdam, v. 113, p. 283-293, 1985.
- BARBOSA, V. C. F.; SILVA J. B. C. Deconvolução de Euler: passado, presente e futuro - um tutorial. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 23, n. 3, p. 243-250, 2005.
- BENEDETTI, R. C. **Caracterização petrográfica e geoquímica das rochas metavulcânicas paleoproterozóicas da Unidade Saquinho: NW da Província Borborema**. 2012. 48 p. Relatório de Graduação - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.
- BEZERRA, F. H. R.; NASCIMENTO, A. F. do; FERREIRA, J. M.; NOGUEIRA, F. C.; FUCK, R. A.; BRITO NEVES, B. B.; SOUSA, M. O. L. Review of active faults in the Borborema Province, Intraplate South America - Integration of seismological and paleoseismological data. **Tectonophysics**, Amsterdam, v. 510, n. 3-4, p. 269-290, 2011.
- BEZERRA, F. H. R.; ROSSETTI, D. F.; OLIVEIRA, R. G.; MEDEIROS, W. E.; BRITO NEVES, B. B.; BALSAMO, F.; NOGUEIRA, F. C. C.; DANTAS, E. L.; ANDRADES FILHO, C.; GÓES, A. M. Neotectonic reactivation of shear zones and implications for faulting style and geometry in the continental margin of NE Brazil. **Tectonophysics**, Amsterdam, v. 614, p. 78-90, 2014.
- BIANCHI, M. B.; ASSUMPÇÃO, M.; ROCHA, M.; CARVALHO, J.; AZEVEDO, P.; FONTES, S.; DIAS, F.; FERREIRA, J.; NASCIMENTO, A.; FERREIRA, M.; COSTA, I. The Brazilian Seismographic Network (RSBR): improving Seismic

- Monitoring in Brazil. **Seismological Research Letters**, El Cerrito (CA), v. 89, n. 2A, p. 452-457, 2018.
- BIGARELLA, J. J.; ANDRADE, G. O. Considerações sobre a estratigrafia dos sedimentos cenozóicos em Pernambuco (Grupo Barreiras). **Arquivos do Instituto de Ciências da Terra**, Recife, n. 2, p. 2-14, 1964.
- BRITO NEVES, B. B.; VAN SCHMUS, W. R.; FETTER, A. H. Noroeste da África - Nordeste do Brasil (Província Borborema) - Ensaio comparativo e problemas de correlação. **Geologia USP - Série Científica**, São Paulo, v. 1, p. 59-78, 2001.
- CALADO, B. O. **Mapa geológico folha Bonhu SB.24-X-A-V**. Fortaleza: CPRM, 2014. 1 mapa, color. Escala 1:100.000. (Programa Geologia do Brasil – PGB).
- CAMACHO, C. R.; SOUSA, F. R. F. R. O. O arcabouço estrutural da Bacia Sedimentar do Araripe, Província Borborema, baseado em dados aeromagnetométricos. **Geologia USP - Série Científica**, São Paulo, v. 17, n. 3, p. 114-161, 2017.
- CASTRO, N. A. **Evolução geológica proterozóica da região entre Madalena e Taparuaba, domínio tectônico Ceará Central (Província Borborema)**. 2004. 221p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- CAVALCANTE, J. C. **Estratigrafia das folhas Mombaça e Catarina: uma proposta**. Fortaleza: CPRM, 1987. 15 p. (Relatório Interno).
- CAVALCANTE, J. C.; VASCONCELOS, A. M.; MEDEIROS, M de F.; PAIVA, I. G. **Mapa Geológico do Estado do Ceará**. Fortaleza: CPRM, 2003. Escala 1:500.000.
- COBLENTZ, D. D.; RICHARDSON, R. M. Analysis of the South America intraplate stress field. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, p. 8.643-8.657, 1996.
- COOPER, G. R. J.; COWAN, D. R. Enhancing potential field data using filters based on the local phase. **Computers & Geosciences**, New York, v. 32, n. 10, p. 1585-1591, 2006.
- CORDELL, L.; GRAUNCH, V. J. S. Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico. In: HINZE, W. J. (Ed.). **The Utility of Regional Gravity and Magnetic Anomalies Maps**. Oklahoma: SEG, 1985. v. 1, p. 181-197.
- COSTA, F. G. **Mapa geológico folha Quixadá SB.24-V-B-VI**. Fortaleza: CPRM, 2014. 1 mapa, color. Escala 1:100.000. (Programa Geologia do Brasil – PGB).
- COSTA, F. G.; NALETO, J. L. C.; CALADO, B. O. Áreas de relevante interesse mineral Tróia-Pedra Branca: geologia e mineralização aurífera da sequência metavulcanossedimentar da Serra das Pipocas, Maciço de Tróia, Ceará. Fortaleza: CPRM, 110p., 2018.
- COSTA, F. G.; PALHETA, E. S. M. **Geologia e recursos minerais das folhas Quixadá (SB.24-V-B-IV) e Itapiúna (SB.24-X-A-IV)**. Fortaleza: CPRM, 2017. 135 p. Escala 1:100.000.
- COSTA, F. G.; PALHETA, E. S. M.; CALADO, B. O.; NALETO, J. L. C.; PINEO, T. R. G.; LOPES, A. P.; MARTINS, M. D.; SOUSA, F. R. F. R. O. **Metalogenia das Províncias Minerais do Brasil: área Troia-Pedra Branca, Estado do Ceará**. Brasília: CPRM, 2015. 49 p.
- FERREIRA, J. M.; OLIVEIRA, R. T.; TAKEYA, M. K.; ASSUMPÇÃO, M. Superposition of local and regional stress in Northeast Brazil: evidence from focal mechanism around the Potiguar marginal basin. **Geophysical Journal International**, Oxford, v. 134, p. 341-355, 1998.
- FETTER, A. H. **U-Pb and Sm-Nd geochronological constraints on the crustal framework and geological history of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the assembly of Gondwana**. 1999. 164p. PhD Thesis - Department of Geology, Kansas University, Lawrence, 1999.
- FETTER, A. H.; VAN SCHMUS, W. R.; SANTOS, T. J. S.; NOGUEIRA NETO, J. A.; ARTHAUD, M. H. U-Pb and Sm-Nd geochronological constraints on the crustal evolution and basement architecture of Ceará state, NW Borborema province, NE Brazil: implications for the existence of the paleoproterozoic supercontinente "Atlantica". **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 30, p. 102-106, 2000.
- FONSECA, J. A. S.; FERREIRA, J. M.; NASCIMENTO, A. F. do; BEZERRA, F. H. R.; LIMA NETO, H. C.; MENEZES, A. S. de. Intraplate earthquakes in the Potiguar Basin, Brazil: evidence for superposition of local and regional stresses and implications for moderate-size earthquake occurrence. **Journal of South American Earth Sciences**, Oxford, v. 110, 2021.
- FRANÇA, G. S.; FERREIRA, J. M.; TAKEYA, M. K. Seismic activity in Senador Sá - CE, Brazil, 1997-1998. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v.22, n. 2, maio/ago. 2004.
- FROHLICH, C. Triangle diagrams: ternary graphs to display similarity and diversity of earthquake focal mechanisms. **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, Amsterdam, v. 75, p. 193-198, 1992.
- GANADE, C. E.; BASEI, M. A. S.; GRANDJEAN, F. C.; ARMSTRONG, R.; BRITO, R. S. Contrasting Archean (2.85-2.68 Ga) TTGs from the Tróia Massif (NE-Brazil) and their geodynamic implications for flat to steep subduction transition. **Precambrian Research**, Amsterdam, v. 297, p. 1-18, 2017.
- GARCIA, M. G. M.; PARENTE, C. V.; SILVA FILHO, W. F.; ALMEIDA, A. R. Age of magmatic events in the Eopaleozoic Jaibaras Basin, NE Brazil: constraints from U-Pb zircon geochronology. **Journal of South American Earth Sciences**, Oxford, v. 84, p. 113-126, 2018.

GORAYEB, P. S. S.; ABREU, F. A. M.; SANTOS, M. V.; SILVA JUNIOR, O. G. **Carta geológica folha Sobral - SA.24-Y-D-IV**. Fortaleza: CPRM, 2014. 1 mapa, color. Escala 1:100.000 (Programa Nacional de Geologia – PRONAGEO).

GROHMANN, C. H.; CAMPANHA, G. A. C. OpenStereo: open source, cross-platform software for structural geology analysis. *In*: AGU FALL MEETING, 2010. [Trabalhos apresentados] [...]. San Francisco, CA, [S.n.], 2010.

GUIMARÃES, I. P.; BRITO-NEVES, B.B. Geochemistry characterization of part of the early Neoproterozoic plutonism in the Central structural domain of the Borborema Province, NE Brazil. *In*: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 32., 2004, Florença. **Abstract** [...]. Florença: [S.n.], 2004.

ISLES, D. J.; RANKIN, L. R. **Geological interpretation of aeromagnetic data**. Perth: The Australian Society of Exploration Geophysicists, 2013. 365 p.

JOHNSTON, A. C. The Seismicity of 'Stable Continental Interiors'. *In*: Earthquakes at North-Atlantic Passive Margins: Neotectonics and Postglacial Rebound. NATO ASI Series, Springer, Dordrecht, v.266, p. 299-327, 1989.

KEATING, P.; PILKINGTON, M. Euler deconvolution of the analytic signal and its application to magnetic interpretation. **Geophysical Prospecting**, Oxford, v. 52, n. 3, p. 165-182, 2004.

KIOUS, W. J.; TILLING, R. I. **This dynamic Earth: the story of plate tectonics**. Washington, D.C.: U.S. Geological Survey, 1996. 77 p.

LIMA, C. C.; NASCIMENTO, E.; ASSUMPCÃO, M. Stress orientations in Brazilian sedimentary basins from breakout analysis: implications for force models in the South American plate. **Geophysical Journal International**, Oxford, v. 130, p. 112-124, 1997.

MABESSONE, J. M.; CAMPOS E SILVA, A.; BEURLIN, K. Estratigrafia e origem do Grupo Barreiras em Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 2, p. 173-188, 1972.

MARTINS, G. **Litogeoquímica e controles geocronológicos da Suíte Metamórfica Algodões – Choró**. 2000. 218 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

MEDEIROS, V. C.; CAVALCANTE, R.; CUNHA, A. L. C.; DANTAS, A. R.; COSTA, A. P.; BRITO, A. A.; RODRIGUES, J. B.; SILVA, M. A. O Furo estratigráfico de Riacho Fechado (Currais Novos-RN), Domínio Rio Piranhas-Seridó (Província Borborema, NE Brasil): procedimentos e resultados. **Estudos Geológicos**, Recife, v. 27, n. 3, p. 1-42, 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/estudosgeologicos/article/view/235881/28599>. Acesso em: 07 dez. 2022.

MELO, A. C. C.; CASTRO, D. L.; OLIVEIRA, D. C.; HOLLANDA, M. H. B. M. Mesozoic dike swarms in Borborema Province (NE Brazil): a structural analysis based

on airborne geophysical data and field work. **Journal of South American Earth Sciences**, Oxford, v. 113, 2022.

MILLER, H. G.; SINGH, V. Potential field tilt - a new concept for location of potential field sources. **Journal of Applied Geophysics**, Amsterdam, v. 32, n. 2/3, p. 213-217, 1994.

MOURA, A. C. A.; OLIVEIRA, P. J. S.; FERREIRA, J. M.; BEZERRA, F. H. R.; FUCK, R. A.; NASCIMENTO, A. F. do. Seismogenic faulting in the Meruoca granite, NE Brazil, consistent with a local weak fracture zone. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 85, n. 4, p. 1631-1639, 2014.

NABIGHIAN, M. N. Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section. **Geophysics**, Houston, v. 39, n. 1, p. 85-92, 1974.

NABIGHIAN, M. N. The analytic signal of two dimensional magnetic bodies with polygonal cross section: its properties and use for automated anomaly interpretation. **Geophysics**, Houston, v. 37, n. 3, p. 507-517, 1972.

NALETO, J. L. C.; ARAÚJO, C. E. G. de. **Mapa geológico folha SA.24-Y-D-V Iruçuba**. Fortaleza: CPRM, 2014. 1 mapa, color. Escala 1:100.000. (Programa Geologia do Brasil – PGB).

NASCIMENTO, D. A. do; GAVA, A.; PIRE, J. de; TEIXEIRA, W. **Geologia da folha SA.24 – Fortaleza**. Rio de Janeiro: DNPM, 1981. 488 p. (Projeto RADAMBRASIL, 21).

NASCIMENTO, Y. E. S. **Petrografia, litoquímica e geocronologia do granito do pajé: um estudo comparativo com os granitóides da suíte intrusiva meruoca, região noroeste do Ceará**. Orientador: Paulo Sergio de Sousa Gorayeb. 2012. 98 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) - Faculdade de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

NUNES, B. I. V.; NASCIMENTO, A. F.; FERREIRA, J. M.; ASSUMPCÃO, M.; MENEZES, E. A. S. Reservoir induced seismicity at Castanhão (NE Brazil). *In*: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 12., 2012, Rio de Janeiro. [Trabalhos apresentados] [...]. Rio de Janeiro: SBGf, 2012.

OLIVEIRA, J. F.; CAVALCANTE, J. C. **Mombaça - folha SB.24-V-D-V - estado do Ceará**: texto explicativo. Brasília: CPRM, 1993. 240 p. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB).

OLIVEIRA, P. H. S.; FERREIRA, J. M.; BEZERRA, F. H. R.; ASSUMPCÃO, M.; NASCIMENTO, A. F.; SOUSA, M. O. L.; MENEZES, E. A. S. Influence of the continental margin on the stress field and seismicity in the intraplate Acaraú Seismic Zone, NE Brazil. **Geophysical Journal International**, Oxford, v. 202, n.3, p. 1453-1462, 2015.

OLIVEIRA, P. H. S.; FERREIRA, J. M.; NASCIMENTO, A. F.; BEZERRA, F. H. R.; SOARES, J. S.; FUCK, R. A.

Estudo da sismicidade na Região de Sobral – CE, NE do Brasil. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA, 4., 2010, Brasília. [Trabalhos apresentados] [...]. Brasília: SBGf, 2010.

PALHETA, E. S. M. **Mapa geológico folha SB.24-X-A-IV - Itapiúna**. Fortaleza: CPRM, 2014. 1 mapa, color. Escala 1:100.000. (Programa Geologia do Brasil – PGB).

PALHETA, E. S. M.; GOMES, I. P.; BRAGA, I. F.; ROCHA, J. M. A.; BESSER, M. L.; FREIRE, D. P. C.; FILHO, D. V.; HOLANDA, J. L. R. **Mapa Geológico Granjeiro-Cococi - estado do Ceará**. Fortaleza: CPRM, 2019. Escala 1:250.000. (Projeto Granjeiro-Cococi).

PILKINGTON, M.; KEATING, P. Contact mapping from gridded magnetic data - a comparison of techniques. **Exploration Geophysics**, New York, v. 35, p. 306-311, 2004.

PILKINGTON, M.; KEATING, P. Geologic applications of magnetic data and using enhancements for contact mapping. *In*: EGM INTERNATIONAL WORKSHOP - Adding new value to Electromagnetic, Gravity and Magnetic Methods for Exploration, 2010, Capri, IT. [Trabalhos apresentados] [...]. Capri, IT: [S.n.], 2010.

PINÉO, T. R. G. Geologia e recursos minerais da folha Banabuiú – SB.24-X-C-I: estado do Ceará. Fortaleza: CPRM, 2017. 93 p. Escala 1:100.000. (Programa Geologia do Brasil – PGB).

PINÉO, T. R. G.; LIMA, A. F.; BESSA, M. D. M. R.; MARTINS, M. D.; ABREU, F. R. **Áreas de relevante interesse mineral – ARIM: integração geológica e avaliação do potencial mineral da porção noroeste do Ceará**. Fortaleza: CPRM, 2019. 116p. (Informe de Recursos Minerais).

PINÉO, T. R. G.; PALHETA, E. S. M.; COSTA, F. G.; VASCONCELOS, A. M.; GOMES, I. P.; GOMES, F. E. M.; BESSA, M. D. M. R.; LIMA, A. F.; HOLANDA, J. L. R.; FREIRE, D. P. **Projeto geologia e recursos minerais do Estado do Ceará: mapa geológico do estado do Ceará**. Fortaleza: CPRM, 2020. 1 mapa, color. Escala 1:500.000.

PINÉO, T. R. G.; ZWIRTES, S.; CALADO, B. O. **Geologia e recursos minerais da folha Baturité – SB.24-X-A-I: estado do Ceará**. Fortaleza: CPRM, 2017. 95 p. Escala 1:100.000. (Programa Geologia do Brasil – PGB).

PORTELA FILHO, C. V.; FERREIRA, F. J. F. Estimativas das taxas de extensão crustal da região central do Arco de Ponta Grossa (Bacia do Paraná) com base em modelagens aeromagnéticas. *In*: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 8., 2003, Rio de Janeiro. [Trabalhos apresentados] [...]. Rio de Janeiro: SBGf, 2003. CD-ROM.

PRADO, F. S.; MENDONÇA, J. C. G. S.; MORAIS, J. B. A.; MEDEIROS, M. F.; ASSUNÇÃO, P. R. S.; ANDRADE, V. A.; MEDEIROS, R. P. **Geologia da região noroeste do estado do Ceará: projeto Martinópole**. Brasília: DNPM, 1981. 59 p. (DNPM. Série Geologia, 23; Seção Geologia Básica, 17).

RAMOS, G. V.; CASTRO, D. L.; BEZERRA, F. H. R.; FERREIRA, J. M.; NASCIMENTO, A. F. do; OLIVEIRA, P. H. S.; NOGUEIRA, F. C. C. Seismicity in the equatorial margin of Brazil reactivates the Precambrian basement fabric. **Journal of South American Earth Sciences**, Oxford, v. 106, 2021.

REID, A. B.; ALLSOP, J. M.; GRANSER, H.; MILLETT, A. J.; SOMERTON, I. W. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. **Geophysics**, Houston, v. 55, n. 1, p. 80-91, 1990.

REIS, A. F. C.; BEZERRA, F. H. R.; FERREIRA, J. M.; NASCIMENTO, A. F. do; LIMA, C. C. Stress magnitude and orientation in the Potiguar Basin, Brazil: implications on faulting style and reactivation. **Journal of Geophysical Research. Section B. Solid Earth**, Hoboken, v. 118, p. 1-14, 2013.

RIVADENEYRA-VERA, C.; BIANCHI, M.; ASSUMPÇÃO, M.; CEDRAZ, V.; JULIÀ, J.; RODRÍGUEZ, M.; SÁNCHEZ, L.; SÁNCHEZ, G.; LOPEZ-MURUA, L.; FERNANDEZ, G.; FUGARAZZO, R. An updated crustal thickness map of central South America based on receiver function measurements in the region of the Chaco, Pantanal, and Paraná Basins, southwestern Brazil. **Journal of Geophysical Research. Section B. Solid Earth**, Hoboken, v. 124, p. 8491- 8505, 2019.

ROCHA, M. P.; DE AZEVEDO, P. A.; MAROTTA, G. S.; SCHIMMEL, M.; FUCK, R. Causes of intraplate seismicity in central Brazil from travel time seismic tomography. **Tectonophysics**, Amsterdam, v. 680, p. 1-7, 2016.

ROEST, W. R.; VERHOEF, J.; PIKINGTON, M. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. **Geophysics**, Houston, v. 57, v. 1, p. 116-125, 1992.

SANTOS, T. J. S. **Evolução tectônica e geocronológica do extremo nordeste da Província Borborema**. 1999. 186 p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 1999.

SCHOBENHAUS, C. Brasileiro. *In*: WINGE, M. (Coord.). **Glossário geológico ilustrado**. [S.l.]: CPRM, 2001. Disponível em: <http://sigep.cprm.gov.br/glossario/index.html>. Acesso em: 20 jun. 2020.

SOUSA, F. R. F. R. O. **Atlas aerogeofísico do estado do Ceará**. Fortaleza: CPRM, 2021. 95 p.

TAVARES, A. C. **Influência da reativação rúptil de zonas de cisalhamento continentais e da Zona de Fratura Romanche na evolução da Margem Equatorial do Brasil**. 2022. 132 p. Tese (Doutorado) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.

TAVARES, A. C.; CASTRO, D. L.; BEZERRA, F. H. R.; OLIVEIRA, D. C.; VANNUCCHI, P.; IACOPINI, D.; JOVANE, L.; VITAL, H. The Romanche fracture zone influences the segmentation of the equatorial margin of Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, Oxford, v. 103, 2020.

THOMPSON, D. T. EULDPH: a new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. **Geophysics**, Houston, v. 47, p. 31-37, 1982.

THURSTON, J. B.; SMITH, R. S. Automatic conversion of magnetic data to depth, dip, and susceptibility contrast using the SPI method. **Geophysics**, Houston, v. 62, p. 807-813, 1997.

TORRES, P. F. M.; CAVALCANTE, J. C.; PALHETA, E. S. M.; VASCONCELOS, A. M.; OLIVEIRA, F. V.; FORGIARINE, L. L. **Mapa geológico: folha Quixadá - SB.24.V.B.** Fortaleza: CPRM, 2007. Escala 1:250.000.

VAN SCHMUS, W. R.; BRITO-NEVES, B. B.; HACKSPACHER, P.; BABINSKY, M. U/Pb and Sm/ Nd geochronologic

studies of the eastern Borborema province, northeastern Brazil: initial conclusions. **Journal of South America Earth Sciences**, Oxford, v. 8, p. 267-288, 1995.

VERDUZCO, B.; FAIRHEAD, J. D.; GREEN, C. M.; MACKENZIE, C. New insights into magnetic derivatives for structural mapping. **The Leading Edge**, Tulsa, v. 23, n. 2, p. 116-119, 2004.

VIEGAS, L. G.; ARCHANJO, C. J.; VAUCHEZ, A. Fabrics of migmatites and the relationships between partial melting and deformation in high-grade transpressional shear zones: The Espinho Branco anatexite (Borborema Province, NE Brazil). **Journal of Structural Geology**, New York, v. 48, p. 45-56, 2013.

O SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM E OS OBJETIVOS PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - ODS

Em setembro de 2015 líderes mundiais reuniram-se na sede da ONU, em Nova York, e formularam um conjunto de objetivos e metas universais com intuito de garantir o desenvolvimento sustentável nas dimensões econômica, social e ambiental. Esta ação resultou na *Agenda 2030*, a qual contém um conjunto de *17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS*.

A Agenda 2030 é um plano de ação para as pessoas, para o planeta e para a prosperidade. Busca fortalecer a paz universal, e considera que a erradicação da pobreza em todas as suas formas e dimensões é o maior desafio global, e um requisito indispensável para o desenvolvimento sustentável.

Os 17 ODS incluem uma ambiciosa lista 169 metas para todos os países e todas as partes interessadas, atuando em parceria colaborativa, a serem cumpridas até 2030.



O **Serviço Geológico do Brasil – CPRM** atua em diversas áreas intrínsecas às Geociências, que podem ser agrupadas em quatro grandes linhas de atuação:

- Geologia
- Recursos Minerais;
- Hidrologia; e
- Gestão Territorial.

Todas as áreas de atuação do SGB-CPRM, sejam nas áreas das Geociências ou nos serviços compartilhados, ou ainda em seus programas internos, devem ter conexão com os ODS, evidenciando o comprometimento de nossa instituição com a sustentabilidade, com a humanidade e com o futuro do planeta.

A tabela a seguir relaciona as áreas de atuação do SGB-CPRM com os ODS.

Áreas de atuação do Serviço Geológico do Brasil – CPRM e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS

ÁREA DE ATUAÇÃO GEOCIÊNCIAS

LEVANTAMENTOS GEOLÓGICOS



LEVANTAMENTOS AEROGEOFÍSICOS



AVALIAÇÃO DOS RECURSOS MINERAIS DO BRASIL



LEVANTAMENTOS GEOLÓGICOS MARINHOS



LEVANTAMENTOS GEOQUÍMICOS



LEVANTAMENTOS BÁSICOS DE RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS



SISTEMAS DE ALERTA HIDROLÓGICO



AGROGEOLOGIA



LEVANTAMENTOS BÁSICOS DE RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS



RISCO GEOLÓGICO



GEODIVERSIDADE



PATRIMÔNIO GEOLÓGICO E GEOPARQUES



ZONEAMENTO ECOLÓGICO-ECONÔMICO



GEOLOGIA MÉDICA



RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO



ÁREA DE ATUAÇÃO SERVIÇOS COMPARTILHADOS

GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO



TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO



LABORATÓRIO DE ANÁLISE MINERAIS



MUSEU DE CIÊNCIAS DA TERRA



PALEONTOLOGIA



PARCERIAS NACIONAIS E INTERNACIONAIS



REDE DE BIBLIOTECAS



REDE DE LITOTECAS



GOVERNANÇA



ÁREA DE ATUAÇÃO PROGRAMAS INTERNOS

SUSTENTABILIDADE



PRÓ-EQUIDADE



COMITÊ DE ÉTICA



PROGRAMA GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL

INFORME DE GEOFÍSICA APLICADA Nº9

O conhecimento geológico do território brasileiro constitui um instrumento indispensável para o planejamento e a execução das políticas públicas voltadas para o desenvolvimento sustentável dos recursos minerais, e simultaneamente é fonte de dados imprescindível para o conhecimento e gestão do meio físico.

É com essa premissa que o Serviço Geológico do Brasil – CPRM tem a grata satisfação de disponibilizar à comunidade técnico-científica, aos empresários do setor mineral e à sociedade em geral mais este produto, o Informe de Geofísica Aplicada, vinculado ao Programa Geologia, Mineração e Transformação Mineral.

Com os expressivos investimentos realizados nos últimos anos em Geofísica, seja na aquisição de dados aerogeofísicos, seja na aquisição de equipamentos de geofísica terrestre, trabalhos de excelente qualidade de aplicação de dados geofísicos para solução de problemas geológicos vêm sendo desenvolvidos pelos pesquisadores do SGB-CPRM.

Entendendo a importância de divulgar amplamente os trabalhos e experiências em Geofísica, foi criada esta nova linha editorial, concebida no Departamento de Geologia e na Divisão de Sensoriamento Remoto e Geofísica, que permite aos pesquisadores explorar e apresentar de forma mais detalhada os trabalhos realizados em projetos técnicos, demonstrando a diversidade e potencialidade de aplicação da Geofísica.

Com mais este produto, o Serviço Geológico do Brasil – CPRM dá continuidade à política governamental de atualizar o conhecimento geológico do país, através dos levantamentos geológicos básicos, geoquímicos e geofísicos, e da avaliação integrada das informações, fundamental para o desenvolvimento regional e importante subsídio à formulação de políticas públicas e de apoio à tomada de decisão de investimentos. Este produto está disponível para download no banco de dados corporativo do Serviço geológico do Brasil – CPRM, o GeoSGB (<http://geosgb.cprm.gov.br>), e no Repositório Institucional de Geociências-RIGEO (<http://rigeo.cprm.gov.br>)

SISMICIDADE DO ESTADO DO CEARÁ



SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM

Sede Brasília

Setor Bancário Norte - SBN - Quadra 02, Asa Norte
Bloco H - Edifício Central Brasília - Brasília - DF - Brasil
CEP: 70040-904
Tel.: (61) 2108-8400

Escritório do Rio de Janeiro

Avenida Pasteur, 404 - Urca - Rio de Janeiro - RJ - Brasil
CEP: 22290-255
Tel.: (21) 2295-0032

Diretoria de Geologia e Recursos Minerais

Tel.: (21) 2546-0212 • (61) 3223-1166

Departamento de Geologia

Tels: (21) 2295-4992

Departamento de Recursos Minerais

Tel.: (21) 2295-4992

Divisão de Sensoriamento Remoto e Geofísica

Tel.: (11) 3775-5123

www.sgb.gov.br

Assessoria de Comunicação

Tels: (61) 2108-8400 • (21) 2295-4641
email: asscomdf@sgb.gov.br

Ouvidoria

Tel.: (21) 2295-4697
email: ouvidoria@sgb.gov.br

Serviço de Atendimento a Usuários – SEUS

Tel.: (21) 2295-5997
email: seus@sgb.gov.br