

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CLAUDIA ESTEFANI RODRIGUES SARAIVA

INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOFÍSICOS E DE SENSORIAMENTO REMOTO
PARA CARACTERIZAÇÃO DAS BACIAS DE CARNAUBINHA E CATOLÉ-SÃO
JULIÃO, PIAUÍ, BRASIL

CURITIBA

2022

CLAUDIA ESTEFANI RODRIGUES SARAIVA

INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOFÍSICOS E DE SENSORIAMENTO REMOTO
PARA CARACTERIZAÇÃO DAS BACIAS DE CARNAUBINHA E CATOLÉ-SÃO
JULIÃO, PIAUÍ, BRASIL

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Maximilian Fries

Coorientadora: Profa. Dra. Karen Maria Leopoldino Oliveira

CURITIBA

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Saraiva, Claudia Estefani Rodrigues

Integração de dados geofísicos e de sensoriamento remoto para caracterização das bacias de Carnaubinha e Catolé-São Julião, Piauí, Brasil / Claudia Estefani Rodrigues Saraiva. – Curitiba, 2022.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geologia.

Orientador: Maximilian Fries

Coorientador: Karen Maria Leopoldino Oliveira

1. Bacias (Geologia). 2. Bacias sedimentares. 3. Gravímetros (Instrumentos geofísicos). 4. Estações gravimétricas - Brasil . I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Geologia. III. Fries, Maximilian. IV. Oliveira, Karen Maria Leopoldino. V. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO GEOLOGIA -
40001016028P5

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação GEOLOGIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **CLAUDIA ESTEFANI RODRIGUES SARAIVA** intitulada: **INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOFÍSICOS E DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA CARACTERIZAÇÃO DAS BACIAS DE CARNAUBINHA E CATOLÉ-SÃO JULIÃO, PIAUÍ, BRASIL**, sob orientação do Prof. Dr. MAXIMILIAN FRIES, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa. A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 14 de Dezembro de 2022.

Assinatura Eletrônica

20/12/2022 18:20:11.0

MAXIMILIAN FRIES

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

09/01/2023 17:26:26.0

FRANCISCO JOSÉ FONSECA FERREIRA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

20/12/2022 10:36:34.0

YARA REGINA MARANGONI

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO)

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA-CENTRO POLITÉCNICO-UFPR - CURITIBA - Paraná - Brasil

CEP 81531-990 - Tel: (41) 3361-3365 - E-mail: posgeol@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 243147

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp> e insira o código 243147

À minha querida mãe, Anailde, e
à minha avó, Otaciana (*in memoriam*),
obrigada por todo amor e carinho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que guia meus passos diariamente, por permitir que eu alcance os meus objetivos e por não me deixar desanimar. Sem *Ele* nada seria possível.

À minha família, em especial à minha mãe, Anailde Rodrigues, por todo o incentivo e amor ao longo desses anos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Maximilian Fries e à minha coorientadora Prof. Dra Karen Leopoldino, que me concederam a oportunidade de realizar este trabalho, por toda ajuda e ensinamentos. Obrigada por todas as discussões e sugestões ao longo desta pesquisa. Sem vocês nada disso seria possível!

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES/DS pela bolsa de estudos (Processo n.88887.502757/2020-00) e ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Paraná pela oportunidade de realização do mestrado.

Aos queridos professores Alessandra Bongioiolo, Francisco Ferreira, João Carlos Biondi, Maria Cristina e Saulo Pomponet por todos os aprendizados ao longo dessa jornada. Foi uma honra ser aluna de vocês.

Agradeço ao suporte técnico do Laboratório de Geofísica Aplicada (LGA), da Universidade Federal do Pampa (Unipampa), e ao Laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto (LGPSR) da Universidade Federal do Ceará (UFC), pelo empréstimo, respectivamente, do gravímetro digital Scintrex CG-5 e o DGPS Trimble R10 para o levantamento gravimétrico.

Agradeço imensamente ao amigo João Batista Dias Neto, pelo auxílio durante a etapa de campo. Sua participação foi fundamental para a realização desse estudo. Muito obrigada! Também agradeço ao MSc. geofísico Fernando Santos Filho (LGPSR-UFC) pelos comentários a respeito do processamento inicial dos dados gravimétricos. Agradeço também ao Jackson Martins (LGPSR-UFC) por todas as dicas acadêmicas ao longo desses anos.

Aos meus queridos amigos Linara Rodrigues e Eduardo Gurgel, por todas as conversas, apoio, paciência e risadas. Vocês são únicos! Eu sou agitada e vocês são a calma na forma de pessoa e, de alguma forma, somos grandes amigos. Muito obrigada por ficarem ao meu lado por todos esses anos.

Obrigada aos amigos Guilherme Maia (“GuiLerme”), Erick Márcio (mi hermano), Laryssa Carneiro (Lala) e Thainara Rodrigues (Thatha), por me acompanharem ao longo de tantos anos. Agradeço também ao Pedro Alencar pelos momentos compartilhados.

Aos membros da empresa Geoscan, em especial ao Caio Jucá e Eduardo Capelo, por lá no passado, em 2016, confiarem em uma simples aluna de graduação do 5º semestre, e não pouparem esforços em ensinar tudo o que sabiam. Hoje eu tenho a plena consciência que muito do que eu sei, muito do que eu sou como geóloga, eu devo a vocês dois. Os meus mais sinceros agradecimentos.

Por fim, gostaria de apresentar uma citação que eu tenho bastante apreço: *“The great moments of your life won't necessarily be the things you do they'll also be the things that happen to you. Now, I'm not saying you can't take action to affect the outcome of your life, you have to take action, and you will. But never forget that on any day, you can step out the front door and your whole life can change forever. You see, the universe has a plan, and that plan is always in motion. A butterfly flaps its wings, and it starts to rain. It's a scary thought but it's also kind of wonderful. All these little parts of the machine constantly working, making sure that you end up exactly where you're supposed to be, exactly when you're supposed to be there. The right place at the right time”*. Agradeço a todos que contribuíram diretamente ou indiretamente nessa jornada (não só do mestrado, mas da vida), mesmo que não citados nominalmente. Somos um reflexo de todas as pessoas que conhecemos (mesmo as que não fazem mais parte do nosso dia a dia) e de todas as ações que tomamos (mesmo aquelas feitas anos atrás).

Obrigada por tudo e a todos!!

“Eita, Nordeste da peste,
Mesmo com toda seca
Abandono e solidão,
Talvez pouca gente perceba
Que teu mapa aproximado
Tem forma de coração.

E se dizem que temos pobreza
E atribuem à natureza,
Contra isso, eu digo não.
Na verdade temos fartura
Do petróleo ao algodão.

Isso prova que temos riqueza
Embaixo e em cima do chão.
Procure por aí a fora
"Cabra" que acorda antes da aurora
E da enxada lança mão.

Procure mulher com dez filhos
Que quando a palma não alimenta
Bebem leite de jumenta
E nenhum dá pra ladrão

Procure por aí a fora
Quem melhor que a gente canta,
Quem melhor que a gente dança
Xote, xaxado e baião.

Procure no mundo uma cidade
Com a beleza e a claridade
Do luar do meu sertão.”

Exaltação ao Nordeste, Luiz Gonzaga de Moura

“O senhor saiba: eu toda minha vida pensei por mim, forro, sou nascido diferente. Eu sou é eu mesmo. Divêrjo de todo mundo... Eu quase nada sei. Mas desconfio de muita coisa. O senhor concedendo, eu digo: para pensar longe, sou cão mestre - o senhor solte em minha frente uma ideia ligeira, e eu rastreio essa por fundo de todos os matos, amém!”

Riobaldo, Grande Sertão: Veredas, João Guimarães Rosa

RESUMO

A Plataforma Sul-Americana possui diversas bacias formadas no estágio de Transição Proterozoico-Fanerozoico, as quais apresentam uma relação temporal com o final da orogênese brasileira. De idade cambro-ordoviciano, na Província Borborema (PB), essas bacias caracterizam-se por apresentar um forte controle estrutural, situando-se próximas às zonas de cisalhamento, uma intensa alteração hidrotermal, bem como a presença de sulfetos disseminados, levando diferentes autores a classificarem tais mineralizações como semelhantes aos depósitos de classe mundial *Iron-Oxide-Copper-Gold* (IOCG). Todavia, apesar das perspectivas preliminarmente estabelecidas, esses ambientes não possuem informações sobre o seu arcabouço geológico-estrutural. Dessa forma, a presente pesquisa teve como objetivo principal contribuir para o conhecimento da geologia de subsuperfície das bacias Catolé-São Julião (BCSJ) e Carnaubinha (BC), Piauí, nordeste do Brasil, tendo como base dados geofísicos (aeromagnetometria e gravimetria terrestre). Foram interpretados lineamentos geofísicos com direções principais de NE-SW e NW-SE para a BCSJ e BC, respectivamente, os quais foram corroborados por lineamentos morfoestruturais extraídos de Modelos Digitais de Elevação (MDE) oriundos de imagens Alos-Palsar. A aplicação de técnicas de realce permitiu dividir as áreas em Domínios Magnéticos (DMs), sendo quatro para BCSJ e seis para BC, que apresentaram boa correlação com os dados geológicos. As estimativas de profundidades das fontes magnéticas e gravimétricas foram realizadas a partir da Deconvolução de Euler 2D, alcançando máximos na ordem de 2,5 km para BCSJ e 1,5 km para BC. Também foi utilizado o Espectro de Potência Radial e a Deconvolução de Euler 3D, estes apenas para os dados magnéticos em ambas as áreas, enquanto o *Tilt Angle* foi utilizado apenas para a BC, tais métodos refletem a predominância de fontes rasas (no geral, inferior a 500 m). Foram realizadas modelagens gravimétricas para ambos os riftes, as quais mostraram que os pacotes sedimentares apresentam espessuras máximas na ordem de 500 m para ambas as bacias. Diante do exposto, a presente pesquisa gerou resultados inéditos, visto que até então não haviam sido realizados estudos geofísicos com foco em tais bacias.

Palavras-chave: bacias do estágio de transição; métodos potenciais; deconvolução de Euler; modelamento gravimétrico; lineamentos geofísicos.

ABSTRACT

The South American Platform has several basins formed in the Proterozoic-Phanerozoic Transition stage, which have a temporal relationship with the end of the Brasiliano Orogeny. In the Borborema Province (BP), northeastern Brazil, these basins show strong structural controls due to proximity to shear zones, with intense hydrothermal alteration, as well as the presence of disseminated sulfides. These aspects motivated several authors to classify such mineralizations as similar to Iron-Oxide-Copper-Gold (IOCG) deposits. However, despite the apparent importance, these environments do not have information about their geological-structural framework. Thus, the main objective of this research was to contribute to the knowledge of the subsurface geology of the Catolé-São Julião (CSJB) and Carnaubinha (CB) basins in Piauí, northeastern Brazil, based on geophysical data (aeromagnetic and ground gravity). Geophysical lineaments were interpreted with main direction of NE-SW and NW-SE for CSJB and CB, respectively, which were corroborated by morphostructural features extracted from Digital Elevation Model (DEM) products derived from Alos-Palsar images. The application of the enhancement techniques made it possible to divide the areas into Magnetic Domains (MDs), four for CSJB and six for CB, which showed a good correlation with the geological data. The depth estimation of the magnetic and gravity sources was performed from the 2D Euler Deconvolution, reaching maximums in the order of 2,5 km for CSJB and 1,5 km for CB. The Radially Averaged Power Spectrum and 3D Euler Deconvolution were applied in both areas only for magnetic data, and Tilt Angle was used only for CB, reflecting the predominance of shallow sources (in general, less than 500 m). Gravity modeling was carried out for both rifts, which showed that the sedimentary packages have maximum thicknesses in the order of 550 m for CSJB and 520 m for CB. Based on the above, this research has produced unprecedented results, as there are no geophysical studies focused on the basins.

Keywords: transitional-stage basins; potential field methods; Euler deconvolution; gravity modeling; geophysical lineaments.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 -	CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO. A) LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO EM MAIOR DETALHE, COM DESTAQUE PARA AS PRINCIPAIS VIAS DE ACESSO LOCAIS, B) CONTEXTO GEOGRÁFICO DAS ÁREAS DE ESTUDO, E C) PRINCIPAIS VIAS DE ACESSO REGIONAIS..	18
FIGURA 2 -	FLUXOGRAMA DE TRABALHO ADOTADO NA PRESENTE PESQUI	20
FIGURA 3 -	MAPA DE LOCALIZAÇÃO DO PROJETO AEROMAGNÉTICO UTILIZADO NA PESQUISA. AS ÁREAS DE ESTUDO TAMBÉM SÃO DESTACADAS.	22
FIGURA 4 -	MAPA CONTENTO AS ÁREAS DE ESTUDO E A DISTRIBUIÇÃO DAS ESTAÇÕES GRAVIMÉTRICAS CEDIDAS PELA ANP.	23
FIGURA 5 -	RELATÓRIO DA ESTAÇÃO GRAVIMÉTRICA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL UTILIZADA COMO BASE NO INÍCIO DA AQUISIÇÃO GRAVIMÉTRICA.	24
FIGURA 6 -	BASES GRAVIMÉTRICAS UTILIZADAS NO PROJETO. A) BASE GRAVIMÉTRICA DA ESTAÇÃO DE CAMPOS SALES “B”, DE RESPONSABILIDADE DO ON, B) BASE GRAVIMÉTRICA DE APOIO PARA A ÁREA I, EM SÃO JULIÃO, E C) BASE GRAVIMÉTRICA DE APOIO PARA A ÁREA II, EM PIO IX.	25
FIGURA 7 -	ESTAÇÕES GRAVIMÉTRICAS COLETADAS EM CAMPO. A) BACIA CATOLÉ-SÃO JULIÃO, E B) BACIA DE CARNAUBINHA.	26
FIGURA 8 -	TRABALHOS DE CAMPO REALIZADOS EM OUTUBRO DE 2021. A ATÉ I) DETALHES DAS AQUISIÇÕES DAS ESTAÇÕES GRAVIMÉTRICAS E DOS DADOS PLANIALTIMÉTRICOS.	27
FIGURA 9 -	SUPERCONTINENTE GONDWANA OESTE COM DESTAQUE PARA AS REGIÕES CRATÔNICAS E AS FAIXAS MÓVEIS DO BRASILIANO PAN-AFRICANO.	31
FIGURA 10 -	CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL DA ÁREA DE ESTUDO. DESTAQUE PARA AS BACIAS EOPALEOZOICAS DA PROVÍNCIA BORBOREMA.	32

FIGURA 11 - ESTRATIGRAFIA TIPO DO SISTEMA ORÓS-JAGUARIBE (FAIXA ORÓS).....	34
FIGURA 12 - GEOLOGIA DA BACIA CATOLÉ-SÃO JULIÃO E ADJACÊNCIAS. ZCT - ZONA DE CISALHAMENTO TATAJUBA, ZCL - ZONA DE CISALHAMENTO LIMOEIRO, ZCI - ZONA DE CISALHAMENTO INDISCRIMINADA (SEM NOME DEFINIDO).	40
FIGURA 13 - GEOLOGIA DA BACIA DE CARNAUBINHA E ADJACÊNCIAS. O POLÍGONO EM PRETO REPRESENTA A ÁREA COM INFORMAÇÕES GEOLÓGICAS EM ESCALA DE 1:25.000 SOBREPOSTA À FOLHA PIO IX, EM ESCALA DE 1:100.000. ZCI - ZONA DE CISALHAMENTO INDISCRIMINADA (SEM NOME DEFINIDO).....	41
FIGURA 14 - FLUXOGRAMA DO PRÉ-PROCESSAMENTO REALIZADO NOS DADOS AEROGEOFÍSICOS, COM BASE O RELATÓRIO TÉCNICO DO PROJETO.....	45
FIGURA 15 - COMPROVANTE DE SUBMISSÃO DO ARTIGO DA ÁREA I.....	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	14
1.2	JUSTIFICATIVA DO TEMA	15
1.3	OBJETIVOS	16
1.4	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA E VIAS DE ACESSO	17
1.5	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	18
2	MATERIAIS E MÉTODOS	20
2.1	LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	20
2.2	ORGANIZAÇÃO DA BASE DE DADOS	20
2.3	DADOS AEROMAGNÉTICOS	21
2.4	DADOS GRAVIMÉTRICOS	22
2.5	PROCESSAMENTO DOS DADOS AEROMAGNÉTICOS, GRAVIMÉTRICOS E PLANIALTIMÉTRICOS	28
2.6	MODELAGEM GRAVIMÉTRICA 2D	28
3	CONTEXTO GEOLÓGICO	30
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	30
3.2	ARCABOUÇO TECTÔNICO	30
3.3	DOMÍNIOS TECTÔNICOS	31
3.4	SISTEMA ORÓS-JAGUARIBE	33
3.5	BACIAS DA PLATAFORMA SUL-AMERICANA FORMADAS NO ESTÁGIO DE TRANSIÇÃO	37
3.6	GRANITOIDES DIVERSOS	38
3.7	BACIA DO PARNAÍBA	39
3.8	GEOLOGIA LOCAL	39
4	GEOFÍSICA: ESTADO DA ARTE	42
4.1	GRAVIMETRIA	42
4.1.1	Pré-processamento e controle de qualidade dos dados	43
4.1.2	Processamento dos dados	43
4.2	MAGNETOMETRIA	44
4.2.1	Pré-processamento dos dados	45
4.2.2	Processamento de dados aeromagnéticos	45
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48

5.1	ARTIGO Nº 1.....	49
5.2	ARTIGO Nº 2.....	81
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	110
	REFERÊNCIAS.....	113
	APÊNDICE A – LISTA DE FIGURAS DOS ARTIGOS	123
	APÊNDICE B – LISTA DE TABELAS DOS ARTIGOS	126
	ANEXO A – RELATÓRIO DE PROCESSAMENTO DOS DADOS	
	PLANIAMENTO MÉTRICOS (PPP - IBGE)	127
	ANEXO B – PUBLICAÇÕES RELACIONADAS COM A PRESENTE	
	PESQUISA.....	128

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Seja do ponto de vista acadêmico ou econômico, as bacias sedimentares apresentam grande importância, visto que possuem condições favoráveis no que concerne à concentração de recursos naturais, tais como petróleo, gás natural, água subterrânea e depósitos minerais. Existindo desde os primórdios da evolução da Terra, esses ambientes, presentes em todos os continentes – ocorrendo na forma *onshore* ou *offshore* -, associam-se a diversas épocas geológicas (Figueiredo e Gabaglia, 1986; Martins Neto, 2006). Desse modo, a intensificação dos estudos e o aumento da qualidade dos dados contribuem diretamente para a compreensão dos processos de formação, bem como para o sucesso exploratório.

No Brasil, nordeste da Plataforma Sul-Americana, existe um conjunto de bacias formadas na transição Proterozoico-Fanerozoico, as quais se situam nas Províncias Borborema e Mantiqueira, bem como nas imediações das bacias do Parnaíba e Paraná. A evolução desses ambientes apresenta uma relação temporal com o fim da Orogênese Brasileira, sendo a Bacia do Camaquã, no Escudo Sul Rio-Grandense, uma das principais representantes, na qual é possível encontrar praticamente toda a sucessão estratigráfica da fase de transição, como descreveu Almeida em 1969 (Teixeira et al., 2004).

Na Província Borborema (PB), nordeste do Brasil, essas bacias exibem sequências clásticas imaturas, compostas, essencialmente, de conglomerados, arenitos e folhelhos de ambiente continental, passíveis de estar associados, ou não, com magmatismo bimodal (Brito Neves, 1998; Parente et al., 2004). Tais ambientes também mostram um forte controle estrutural, situando-se próximas às zonas de cisalhamento, uma intensa alteração hidrotermal, bem como a ocorrência de sulfetos disseminados. Esses fatores motivaram vários autores a classificarem tais mineralizações como semelhantes aos depósitos de classe mundial de Cu-Au-Óxido de Ferro, IOCG (Maas, 2003; Garcia et al., 2006; Machado, 2006; Huhn et al., 2011; Parente et al., 2011; Saraiva e Rodrigues, 2018; Medeiros e Paula, 2019). Entre essas bacias cita-se Jaibaras, Cococi e Iara, no estado do Ceará, Carnaubinha e São Julião (também conhecida como Catolé), no estado do Piauí.

Todavia, apesar das perspectivas preliminarmente estabelecidas, não há informações sobre o arcabouço geológico-estrutural da maior parte dessas bacias. No geral, as pesquisas realizadas têm como enfoque o mapeamento geológico e as caracterizações tipológicas dos minérios e geoquímicas de suas rochas, assim como do embasamento adjacente. Com efeito, a geofísica torna-se uma ferramenta de extrema importância em regiões onde são escassas informações de subsuperfície.

Os métodos baseados no campo potencial (magnetometria e gravimetria) são comumente aplicados em estudos relacionados às bacias sedimentares, possibilitando determinar seus limites, o relevo do seu embasamento, as feições estruturais e as heterogeneidades entre os pacotes sedimentares (Castro e Castelo Branco, 1999; Reynolds, 2011; Hinze et al., 2013; Pedrosa Junior et al., 2015; Santos Filho et al., 2021). Ademais, a análise de produtos derivados de imagens de sensoriamento remoto contribui para a definição do padrão estrutural de uma região (Leandro et al., 2011).

Tendo em vista o potencial econômico para a ocorrência de minerais de minério, associado com a inexistência de informações de subsuperfície, as bacias de Carnaubinha e Catolé-São Julião, com áreas de 17 e 39 km², respectivamente, e suas adjacências foram selecionadas como alvo desta pesquisa. As áreas de estudo localizam-se na porção nordeste do Brasil, contemplando o estado do Piauí, entre os municípios de Pio IX e São Julião.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TEMA

As bacias de Catolé-São Julião e Carnaubinha, assim como as demais bacias formadas no estágio de transição situadas Província Borborema, possuem grande importância econômica, visto que apresentam elementos semelhantes aos depósitos de classe mundial do tipo IOCG.

No final da década de setenta, nas proximidades do município de São Julião, geólogos da Companhia de Desenvolvimento do Estado do Piauí (COMDEPI) depararam-se com ocorrências de malaquita associadas a um corpo granítico durante campanhas de mapeamento de corpos de calcário (Lopes Filho et al., 1982 *apud* Maas, 2003). Posteriormente, a mesma instituição iniciou o projeto denominado *Cobre-Mandacaru*, que visava encontrar sulfetos disseminados em zonas alteradas por processos hidrotermais, onde foi possível definir alvos prospectivos e realizar

aquisições locais de polarização induzida e magnetometria (Marinho, 1981a; Marinho, 1981b), bem como efetuar a coleta de amostras para análises geoquímicas.

Nos anos subsequentes diversas outras companhias realizaram pesquisas nessa região e adjacências (Maas, 2003). Atualmente, em 2022, de acordo com o Sistema de Informações Geográficas da Mineração (SIGMINE), de responsabilidade da Agência Nacional de Mineração (ANM), diversas empresas como a *Nexa Recursos Minerais S.A.*, *Vicenza Mineração e Participações S.A.* e *Puma Metals Mineração Ltda*, requerem ambas as áreas de estudo, e suas regiões circundantes, para pesquisas de minério de cobre.

Além disso, diversos autores contribuíram para o conhecimento geológico da região, em especial, na identificação dos limites das bacias, das unidades existentes e de suas relações estratigráficas (Parente, 1984; Maas, 2003; Araújo e Lisboa, 2006; Saraiva e Rodrigues, 2018; Medeiros e Paula, 2019).

Todavia, ainda não existem, na literatura científica, estudos com enfoque na configuração do arcabouço estrutural/geofísico dessas bacias e suas arquiteturas internas. Tais informações podem auxiliar em interpretações com foco regional, assim como gerar um novo conjunto de dados que podem ser usados em estudos posteriores, como definição de áreas-alvo para estudos mais detalhados, independente da finalidade.

Dessa forma, a partir do exposto, a pesquisa em questão teve como alicerce os seguintes questionamentos:

- i) Qual é o padrão estrutural dos litotipos que compõem as bacias Carnaubinha, Catolé-São Julião e suas adjacências?
- ii) Qual a profundidade e a disposição do embasamento das bacias Carnaubinha e Catolé-São Julião?

1.3 OBJETIVOS

Tendo como base os dados geofísicos aereomagnéticos e as aquisições gravimétricas terrestres, o objetivo principal deste trabalho é contribuir para o conhecimento da geologia de subsuperfície das bacias de Carnaubinha e Catolé-São Julião. Nesta ótica, para alcançar o objetivo supracitado torna-se necessário o cumprimento dos seguintes objetivos específicos:

- Definir a estruturação interna e adjacente das bacias, obtendo as espessuras e descontinuidades dos pacotes sedimentares, e de seus arcabouços estruturais;
- Caracterizar e mapear estruturas internas nas rochas dos embasamentos das bacias, assim como suas direções principais e subordinadas;

1.4 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA E VIAS DE ACESSO

O projeto em questão é composto por duas áreas de estudo, as quais se situam na porção nordeste do Brasil, mais especificamente no extremo leste do estado do Piauí, próximo à divisa com o estado do Ceará, envolvendo as bacias Carnaubinha e Catolé-São Julião e seu arcabouço tectônico (**Figura 1**).

A primeira área engloba a Bacia de Carnaubinha e localiza-se na porção sudoeste do município de Pio IX, distando cerca de 470 km de Teresina, capital do estado, e cerca de 500 km de Fortaleza, capital do Ceará. Esta área encontra-se inserida na Folha Pio IX (SB.24-Y-A-VI).

O segundo alvo de estudo circunscreve-se entre os municípios de São Julião e Alegre do Piauí e dista em torno de apenas 30 km de Carnaubinha. Encontra-se inserida na Folha Fronteiras (SB.24-Y-C-III), abrangendo a Bacia Catolé-São Julião e seu embasamento adjacente.

O acesso às áreas de estudo pode ser efetuado, partindo de Fortaleza, por meio da rodovia federal BR-020, passando pelos municípios de Canindé, Boa Viagem e Tauá, sendo esse o trajeto principal. Todavia, outros percursos também podem ser adotados. Pode-se seguir pela rodovia BR-116 até o município de Chorozinho e, a partir desse ponto, continuar pela BR-122, atravessando os municípios de Quixadá e Quixeramobim, seguindo até Tauá, na CE-060, dali é possível continuar o trajeto pela BR-020. Por fim, o itinerário também pode ser percorrido pela BR-166 até as proximidades do município de Cristais, seguindo pela CE-138 até Morada Nova, onde o trajeto é continuado pela CE-371, passando próximo à sede dos municípios de Solonópole, Iguatu e Campos Sales, e, partir deste último, o percurso é continuado pela BR-230.

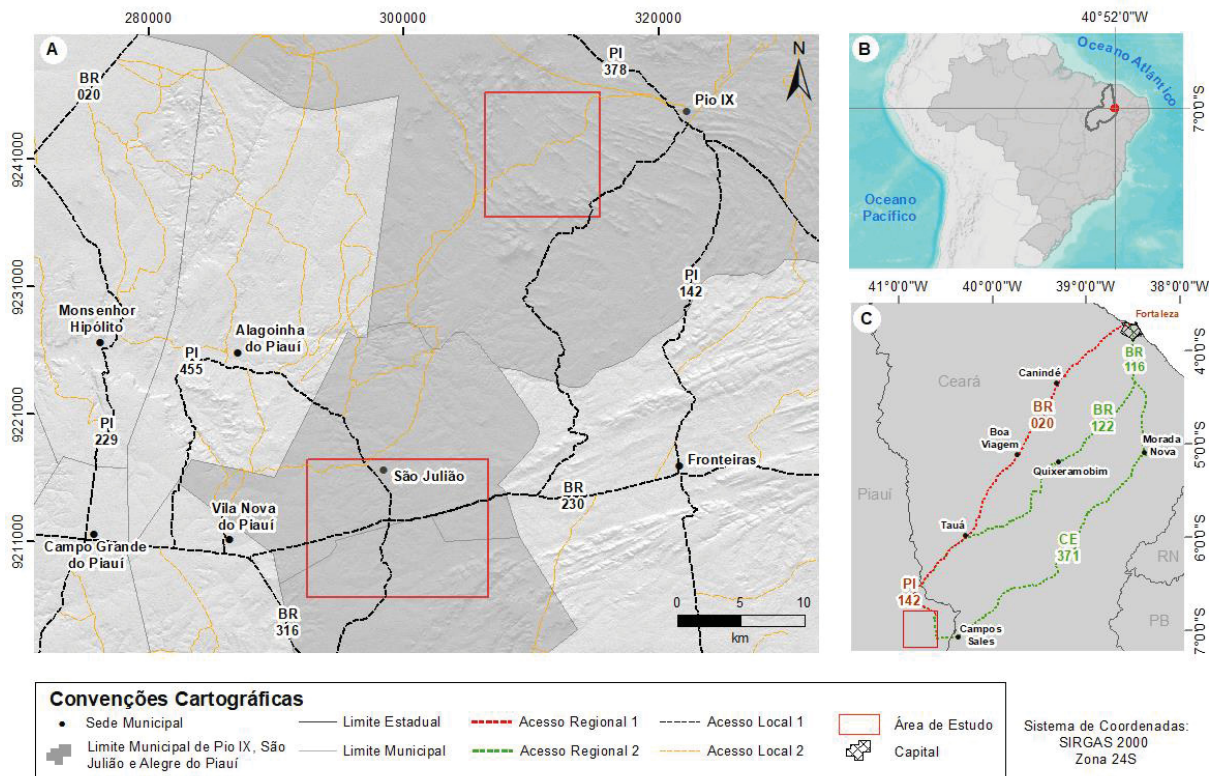


FIGURA 1 - Caracterização das áreas de estudo. A) Localização das áreas de estudo em maior detalhe, com destaque para as principais vias de acesso locais, B) Contexto geográfico das áreas de estudo, e C) Principais vias de acesso regionais. Base de dados: Pfaltzgraff et al. (2010), Brandão et al. (2014) e Base Map “World Terrain Base” (2020).

É possível acessar o local até a área de estudos através da rodovia estadual PI-142. Da mesma forma, os trajetos também podem se dar por meio de estradas secundárias e carroçáveis.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é composta por um total de seis capítulos, os quais são descritos de forma sucinta a seguir:

Capítulo 1: é a introdução e fornece uma ambientação ao leitor sobre os aspectos introdutórios do trabalho, relatando a justificativa do tema escolhido, os objetivos gerais e específicos, assim como informações sobre localização e acesso das áreas de estudo.

Capítulo 2: descreve os materiais e métodos utilizados para a confecção do projeto em tese.

Capítulo 3: disserta sobre os aspectos geológicos de uma forma ampla, partindo das grandes unidades geotectônicas até o contexto regional das áreas de

estudo, mostrando, também, de forma sucinta, os litotipos locais. Tais dados são fundamentados em diversos trabalhos presentes na literatura científica.

Capítulo 4: apresenta uma introdução aos fundamentos teóricos dos métodos utilizados. Também discorre sobre as técnicas de processamento dos dados magnéticos e gravimétricos.

Capítulo 5: expõe os resultados e discussões obtidos neste trabalho, sendo dividido em dois artigos: *i)* envolvendo a área da Bacia Catolé-São Julião e adjacências, o qual foi submetido ao *Journal of Applied Geophysics*, com o título “*Contribution to the knowledge of the structural framework of the Catolé-São Julião basin, Brazil, based on gravity and magnetic data*”; e *ii)* englobando a área da bacia de Carnaubinha e adjacências, intitulado “*Structural framework of the Carnaubinha basin, based on gravity and magnetic data*”. Esse último ainda não foi submetido. Estes estudos apresentam as interpretações das assinaturas magnéticas e gravimétricas do arcabouço estrutural das bacias de Carnaubinha e Catolé-São Julião, as informações referentes a fontes presentes em subsuperfície, geradas por meio da Deconvolução de Euler, Espectro de Potência Radial e método *Tilt*, bem como a modelagem gravimétrica 2D. Tais resultados são complementados com informações geológicas de superfície e lineamentos morfoestruturais oriundos de Modelos Digitais de Elevação (MDE).

Capítulo 6: apresenta uma síntese das principais ideias levantadas e discutidas ao longo da presente pesquisa, assim como as considerações finais deste trabalho.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a confecção da presente dissertação foram necessárias diversas etapas, as quais são esquematizadas no fluxograma da **Figura 2** e descritas de forma detalhada a seguir.

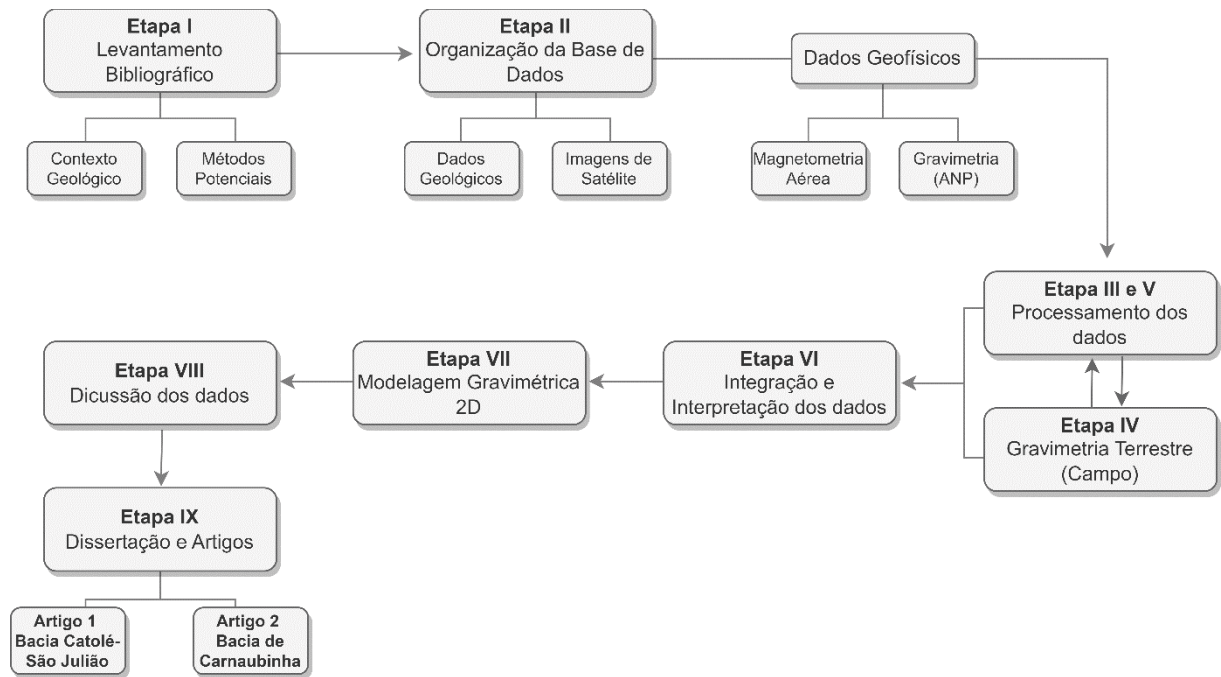


FIGURA 2 - Fluxograma de trabalho adotado na presente pesquisa.

2.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

A primeira etapa baseou-se, essencialmente, em uma compilação de dados referente ao contexto geológico, estrutural e tectônico da região, bem como sobre o referencial teórico dos métodos utilizados na pesquisa. Foram analisados artigos nacionais e internacionais, trabalhos de conclusão de curso, dissertações de mestrado, teses de doutorados, projetos de pesquisa, livros e, também, demais tipos de publicações, como resumos simples e expandidos.

2.2 ORGANIZAÇÃO DA BASE DE DADOS

O principal intuito dessa etapa era organizar um acervo digitalizado em ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas), permitindo, assim, a integração de informações de diferentes fontes e escalas.

Foram analisados dados geológicos e estruturais referentes às Folhas Pio IX (SB.24-Y-A-VI), Fronteiras (SB.24-Y-C-III), com escala 1:100.000, e Jaguaribe SW (SB.24-Y), com escala 1:500.000, publicadas nos anos 2014, 2017 e 2000, respectivamente. Soma-se a isso os produtos oriundos de trabalhos de conclusão de curso desenvolvidos nos últimos anos por alunos da Universidade Federal do Ceará (UFC). Destaca-se que nestes últimos trabalhos foram realizados mapeamentos em escala de 1:25.000, gerando, dessa forma, materiais com um excelente grau de detalhamento e confiabilidade (Saraiva e Rodrigues, 2018; Medeiros e Paula, 2019).

Nesta etapa também foi feita a aquisição de imagens *Alos Palsar* com resolução espacial de 12,5 metros, disponibilizado por Alaska Satellite Facility (ASF), de responsabilidade da *Earth Data (NASA)*. Tais dados foram utilizados para a extração dos lineamentos morfoestruturais. Foram geradas imagens de relevo sombreado para os ângulos de iluminação 0°, 45°, 90° e 135° e, para todos os produtos, utilizou-se uma elevação solar de 45°. Posteriormente, para as feições positivas e negativas extraídas manualmente na escala de 1:80.000, obteve-se os azimutes através da extensão Arc-SDM, *Spatial Data Modeller for ArcGIS* (Sawatzky et al., 2010) para a geração do diagrama roseta no *software Stereonet versão 8.8.6* (Allmendinger et al., 2013).

2.3 DADOS AEROMAGNÉTICOS

A base de dados aerogeofísicos utilizada neste trabalho pertence ao Projeto Centro-Sudoeste do Ceará (Código nº 1101), executado pela Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas Ltda, conveniada ao Serviço Geológico do Brasil – CPRM, no ano de 2010 (**Figura 3**). Esse conjunto de dados cobre uma área de 100.487,00 km de perfis de alta resolução, com um intervalo de amostragem de 0,1 s (magnetômetro) e altura média de 100 m, englobando os estados do Ceará, Pernambuco e Piauí, com linhas de voo e controle espaçadas em 0,5 km e 10 km, e orientadas nas direções N-S e E-W, respectivamente (CPRM, 2010).

Os dados do projeto foram obtidos por meio da plataforma digital GeoSBG (CPRM – Serviço Geológico do Brasil), em formato digital do tipo XYZ, em que X e Y correspondem às coordenadas UTM, e Z às medidas de magnetometria (nT). Posteriormente, realizou-se cortes no banco de dados (arquivo *.gdb*), visando abranger cada área de estudo individualmente.

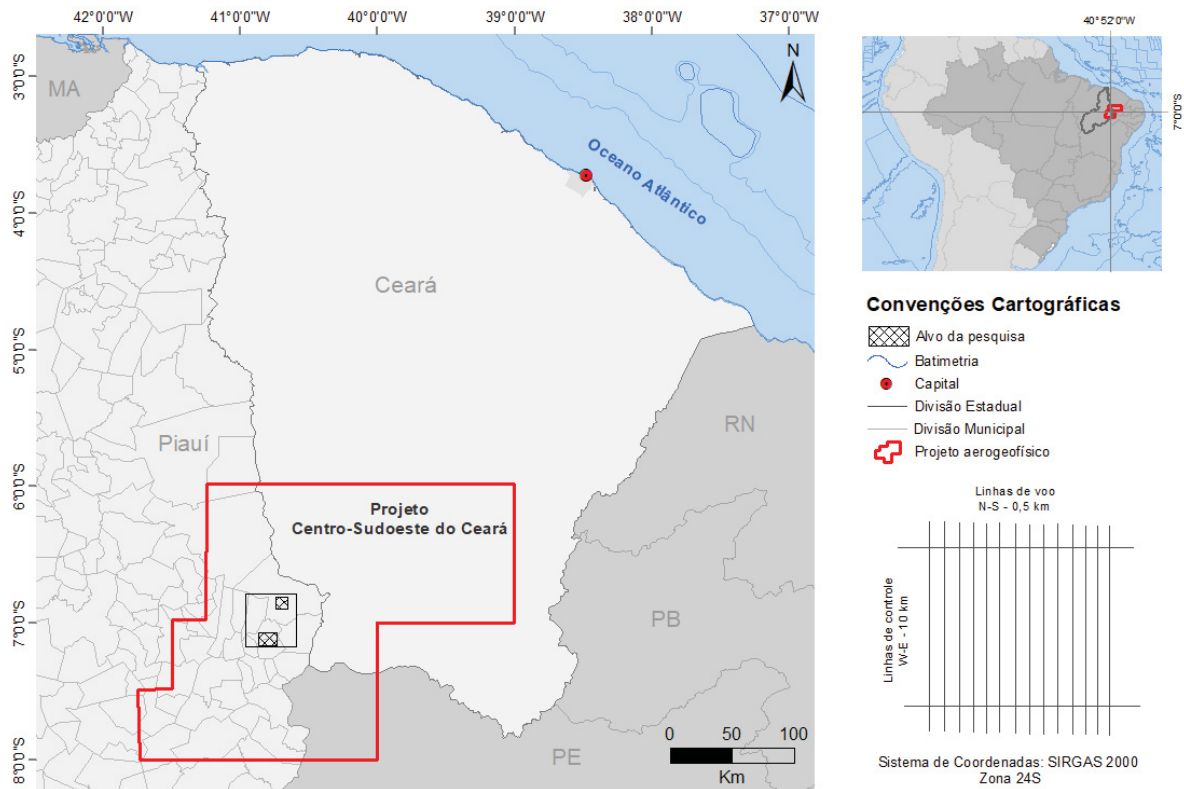


FIGURA 3 - Mapa de localização do projeto aeromagnético utilizado na pesquisa. As áreas de estudo também são destacadas.

2.4 DADOS GRAVIMÉTRICOS

Inicialmente, buscou-se construir um acervo de dados gravimétricos com base em informações já existentes. Dessa forma, foi realizada uma solicitação ao Banco Nacional de Dados Gravimétricos (BNDG), de responsabilidade da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), que reúne dados de inúmeros levantamentos independentes, realizados por diversas universidades públicas e órgãos governamentais. Ao todo, a ANP disponibilizou para pesquisa 128 estações gravimétricas, todavia, conforme pode ser observado na **Figura 4**, a cobertura é praticamente inexistente em ambas as áreas de estudo, abrangendo apenas um contexto regional, o que impossibilitaria alcançar os objetivos propostos pela presente dissertação.

Assim, realizou-se, em outubro de 2021, atividades de campo visando aumentar a cobertura gravimétrica da região, uma vez que nas proximidades dos Riftes Carnaubinha e Catolé-São Julião as informações eram inexistentes. A estratégia da operação teve como base executar transectas ao longo das principais

rodovias e vias de acesso, objetivando realizar cortes ortogonais e longitudinais por toda a extensão das bacias.

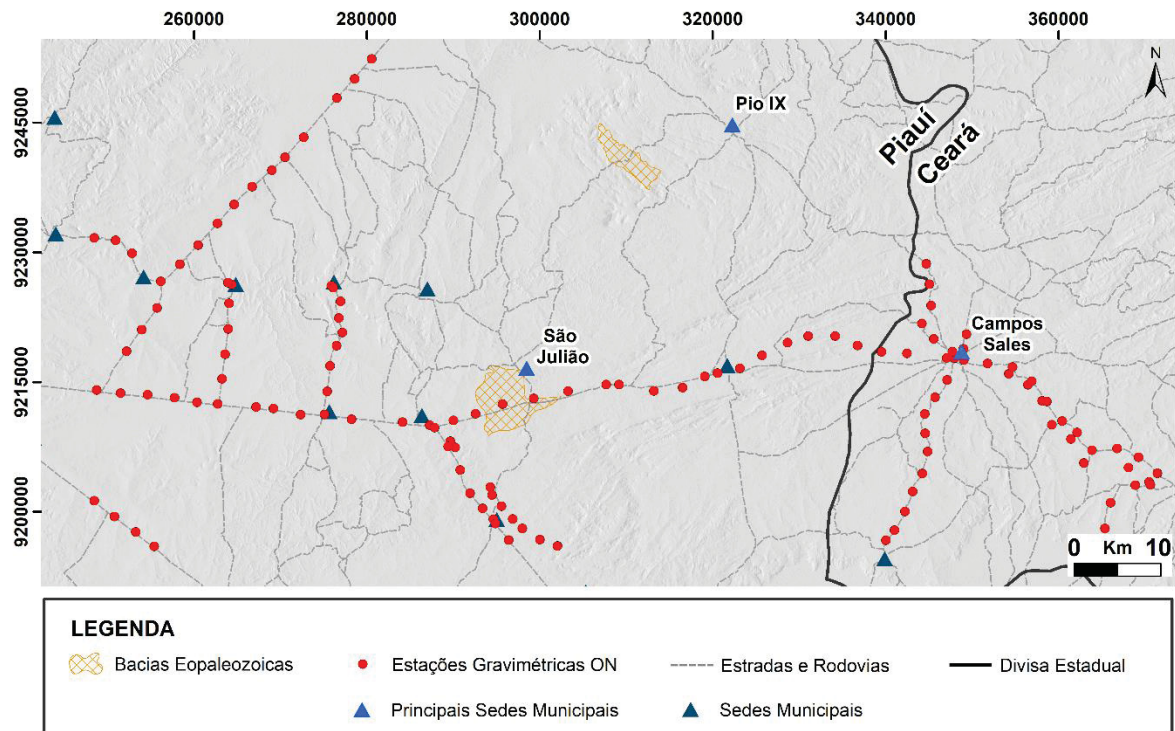
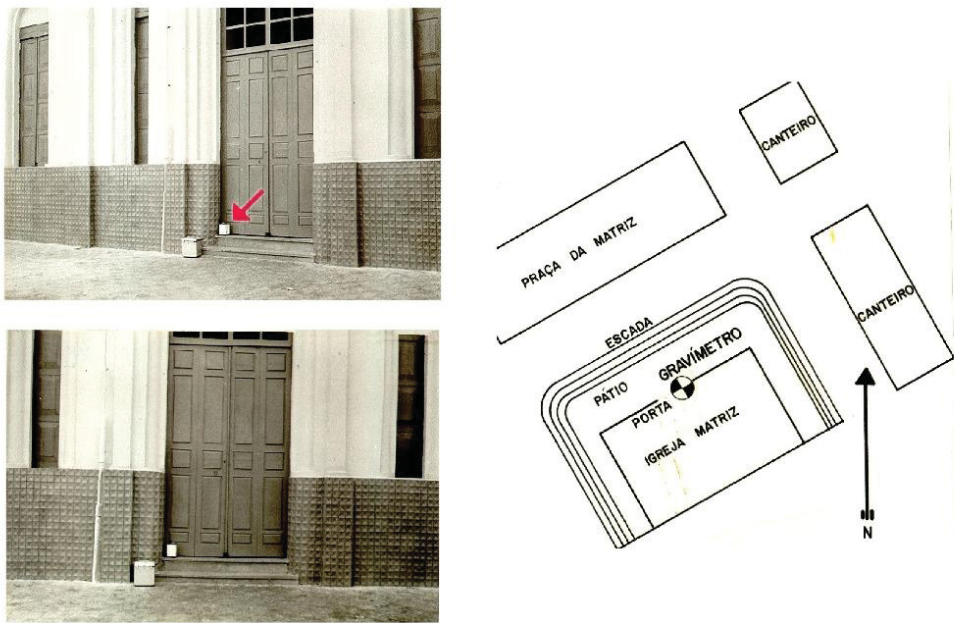


FIGURA 4 - Mapa contendo as áreas de estudo e a distribuição das estações gravimétricas cedidas pela ANP.

A aquisição dos dados foi iniciada utilizando a base gravimétrica Campos Sales B (Código n.º 100181), registrada no Observatório Nacional (ON), localizada na soleira da porta principal da Igreja Matriz (**Figura 5**). Contudo, como a base situava-se distante de ambas as áreas de estudo, realizou-se a implantação de bases gravimétricas de apoio nas igrejas matrizes das cidades de São Julião e Pio IX (**Figura 6**). Para maiores detalhes sobre a localização dessas cidades, consultar a **Figura 4**.

Laboratório de Gravimetria	
Relatório de Estação Gravimétrica	
Estação: Campos Sales "B" (CE)	Código: 100181
Gravímetro na soleira da porta principal da Igreja Matriz, no lado esquerdo de quem entra, no vértice formado entre a parede e a porta.	
Situação em 01/07/1990: PRESERVADA	
Coordenadas WGS84/SIRGAS2000	Gravimetria
Latitude: 07° 04' 29,5" Sul Longitude: 40° 22' 35,3" Oeste Altitude geométrica: 556 m Altitude ortométrica: 567,05 m	Gravidade: 977968,72 ± 0,02 mGal Anomalia Ar-Livre: 34 mGal Anomalia Bouguer simples: -30 mGal (densidade: 2670 kg/m ³)
Imagens	
	

Rua General José Cristino, 77 - São Cristóvão - 20921-400 Rio de Janeiro (RJ) - Brasil
Telefone/Fac-símile: (21) 2580-7081 - www.on.br

Quinta-Feira, 24 de Setembro de 2020

FIGURA 5 - Relatório da Estação Gravimétrica do Observatório Nacional utilizada como base no início da aquisição gravimétrica.



FIGURA 6 - Bases Gravimétricas utilizadas no projeto em questão. A) Base Gravimétrica da Estação de Campos Sales “B”, de responsabilidade do ON, B) Base Gravimétrica de Apoio para a área I, em São Julião, e C) Base Gravimétrica de Apoio para a área II, em Pio IX.

Foram coletadas 116 estações gravimétricas (**Figura 7**), com espaçamento médio de 500 m, por meio do gravímetro digital modelo *AutoGrav CG-5*, fabricado pela SCINTREX, com precisão na ordem de 0,001 mGal, cedido pelo Laboratório de Geofísica Aplicadas (LGA) da Universidade Federal do Pampa (Unipampa). Destaca-

se que diariamente as aquisições eram realizadas em circuitos fechados, iniciando e finalizando em uma base gravimétrica. Em virtude da necessidade de se obter o posicionamento das coordenadas X e Y e a altitude (Z) com alta precisão, realizou-se o levantamento planialtimétrico em todas as estações. O equipamento utilizado foi o GPS Diferencial (*DGPS – Differential Global Position System*) da marca Trimble, modelo R10, pertencente ao Laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto (LGPSR), do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará (UFC), com o erro de posicionamento horizontal milimétrico e o vertical centimétrico.

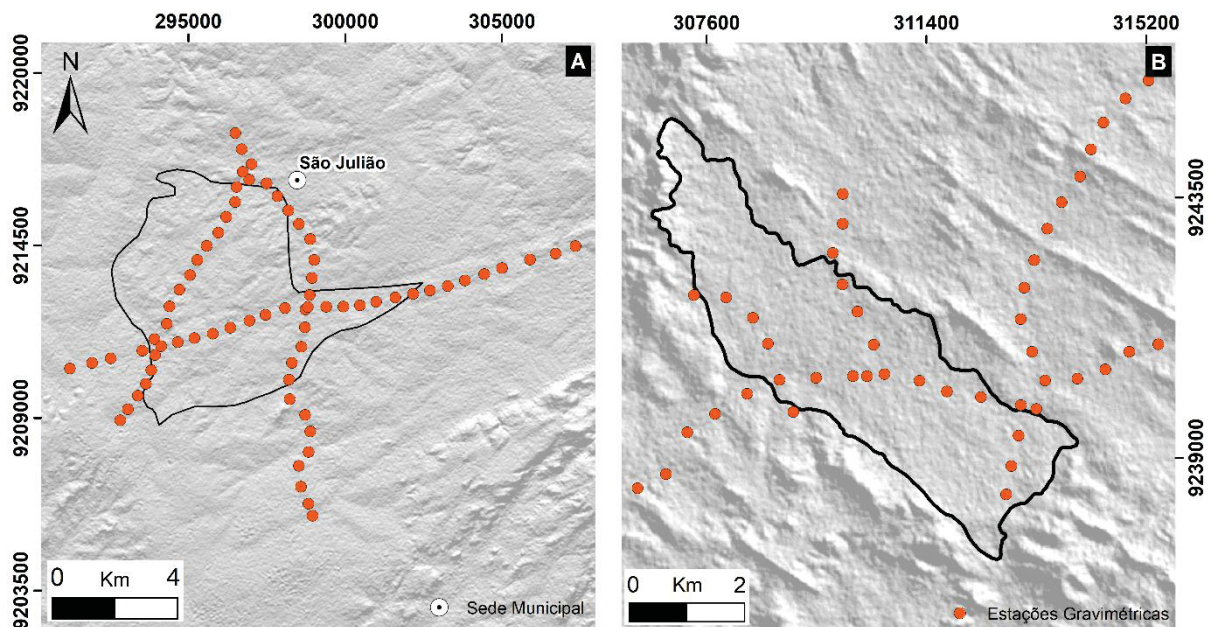


FIGURA 7 - Estações Gravimétricas coletadas em campo. A) Bacia Catolé-São Julião, e B) Bacia de Carnaubinha.

A **Figura 8** exibe detalhes das aquisições realizadas, nas quais as leituras gravimétricas tinham uma duração de 3 minutos (com exceção das bases, que realizavam 5 ciclos de 60 segundos). Em contrapartida, o levantamento das estações planialtimétricas foi realizado no modo estático, para a realização de um pós-processamento, em que o tempo total de leitura foi de 10 minutos.

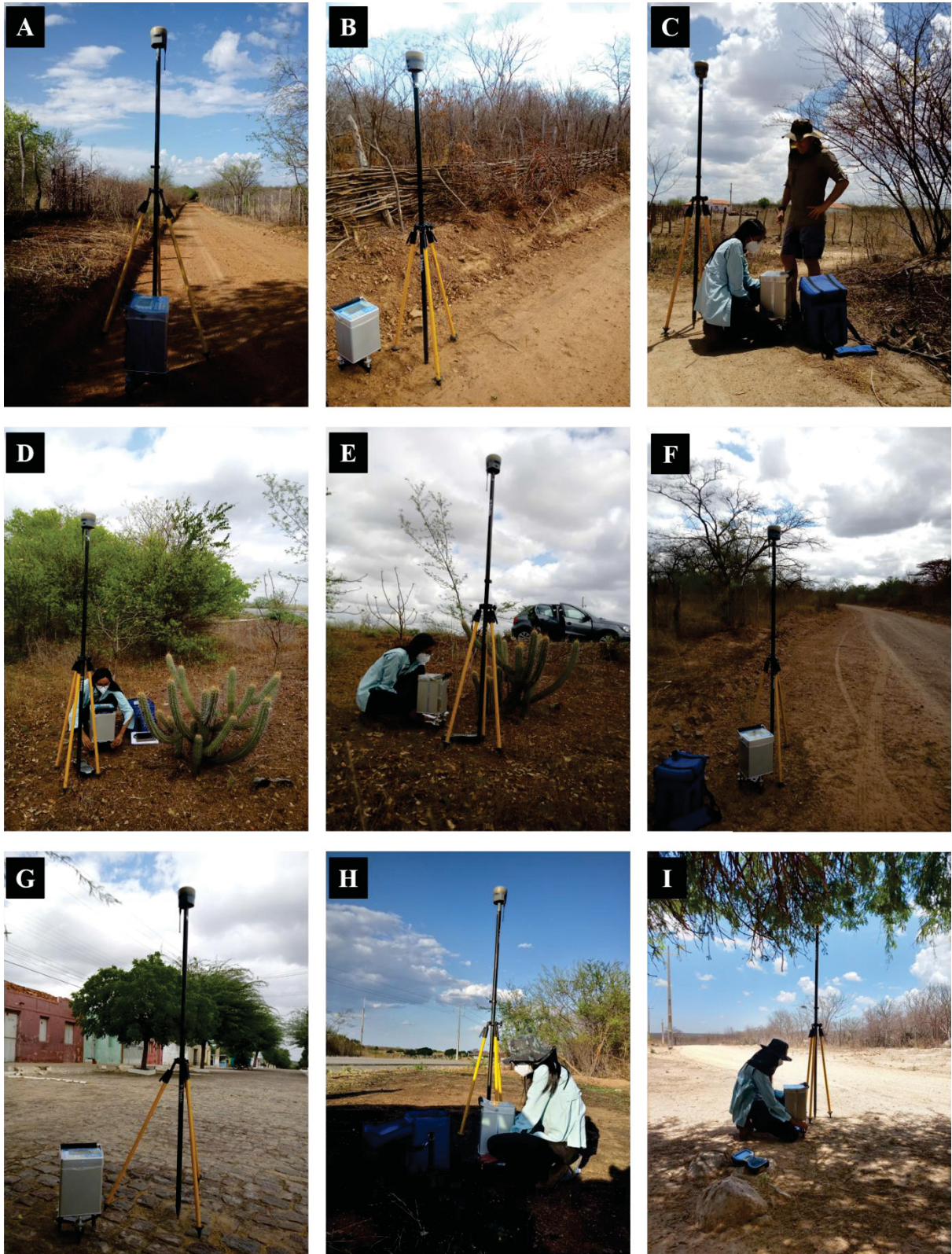


FIGURA 8 – Trabalhos de campo realizados em outubro de 2021. A até I) Detalhes das aquisições das estações gravimétricas e dos dados planialtimétricos.

2.5 PROCESSAMENTO DOS DADOS AEROMAGNÉTICOS, GRAVIMÉTRICOS E PLANIALTIMÉTRICOS

Os dados aeromagnéticos do projeto Centro-Sudoeste do Ceará (2010), apresentados no tópico 2.3 (ver **Figura 3**), foram interpolados por meio do método bi-direcional em uma malha regular de 125x125 m, obtendo-se, assim, o mapa de anomalias magnéticas. Em continuidade, aplicou-se filtros para a atenuação de ruídos, bem como técnicas de realce visando destacar as características específicas de cada fonte magnética, como suas bordas e profundidades. Dentre as principais técnicas, cita-se: Amplitude do Sinal Analítico (ASA), Inclinação do Sinal Analítico do Gradiente Horizontal Total (ISA-GHT) e Deconvolução de Euler.

Os dados gravimétricos adquiridos em campo foram organizados em um banco de dados, no qual, posteriormente, realizou-se todas as correções necessárias, a saber: maré, deriva instrumental, latitude, ar livre, Bouguer e terreno. Destaca-se que os dados disponibilizados pelo BNDG (ANP) não foram utilizados na presente pesquisa, visto que não abrangiam as áreas-alvo pretendidas neste estudo. A cobertura gravimétrica compreendia apenas a Bacia Catolé-São Julião, contando apenas com 6 estações, as quais apresentavam um espaçamento irregular, variando entre 1 e 3 km (ver **Figura 4**).

O processamento das estações planialtimétricas foi realizado por meio do serviço online para o pós-processado de dados GNSS, do IBGE-PPP (Posicionamento por Ponto Preciso), o qual atingiu satisfatoriamente altas precisões (<10 cm) para cada estação coletada, como pode ser observado no **Anexo 1**, descrito na opção (95%). Para isso, foi necessário apenas realizar a conversão dos dados para o formato RINEX, através do *software ConvertToRinex*, informar o modo do levantamento (estático), altura (2,00 m) e modelo da antena (TRMR10), bem como um e-mail válido.

Salienta-se que para o processamento dos dados gravimétricos utilizou-se os valores de altitude ortométrica. Com esse intuito, o geoide usado para conversão de altura geométrica para ortométrica foi o Imbituba.

2.6 MODELAGEM GRAVIMÉTRICA 2D

Foram realizadas modelagens gravimétricas 2D das anomalias Bouguer Residuais para as bacias Carnaubinha e Catolé-São Julião. Esse procedimento consiste em separar os efeitos gravitacionais da fonte alvo e do embasamento e, em seguida, modelar de forma iterativa apenas a contribuição gravimétrica da fonte (Blakely, 1996; Rao et al., 1995; Castro, 2005).

3 CONTEXTO GEOLÓGICO

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para uma melhor compreensão sobre a área de estudo, neste capítulo serão apresentados os aspectos geológicos de uma forma ampla, partindo das grandes unidades geotectônicas até o contexto regional das áreas de estudo (bacias de Carnaubinha e Catolé-São Julião), fundamentando-se em diversos trabalhos da literatura científica.

3.2 ARCABOUÇO TECTÔNICO

Baseando-se em Almeida et al. (1977, 1981), o território brasileiro é compartimentado em dez províncias estruturais geotectônicas, sendo elas: Rio Branco, Tapajós, São Francisco, Tocantins, Mantiqueira, Borborema, bacias Amazônica, Parnaíba, Paraná e a província Costeira e de margem continental. Tal divisão é fundamentada em aspectos litológicos, metamórficos e tectônicos.

A Província Borborema (PB), situada na porção nordeste da plataforma Sul-Americana, apresenta uma extensão na ordem de 450.000 km² e limita-se a oeste com as rochas sedimentares fanerozoicas da bacia do Parnaíba, a sul pelo Cráton São Francisco e a norte e leste pelas bacias costeiras (Almeida et al., 1977; Brito Neves et al., 2000). Segundo Arthaud (2007), esta província é composta por rochas com idades entre o Arqueano e o Neoproterozoico e foi resultante da convergência entre os crátons São Luís/Oeste África e São Francisco/Congo, responsável pela amálgama final do continente West Gondwana, ocorrido há cerca de 600 Ma (**Figura 9**).

A PB é parte integrante do sistema orogênico Brasileiro/Pan-Africano (Osako et al., 2011). Diversos autores acreditam que ela se trata de um fragmento de um supercontinente unido durante o Mesoproterozoico Superior, podendo ser correlacionada, através de aspectos litológicos e estruturais, com a porção Pan-Africana do Noroeste da África (Brito Neves et al., 2001; Mabessone, 2002; Santos et al., 2004; Oliveira, 2008).

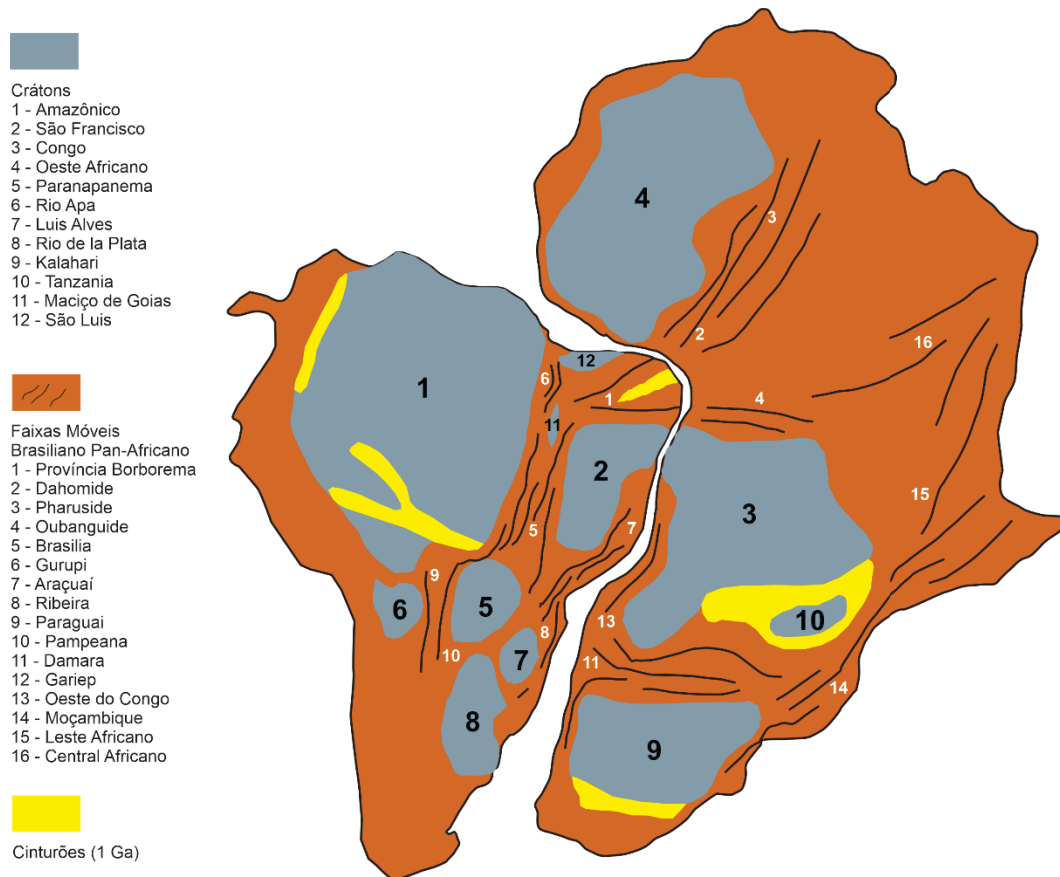


FIGURA 9 - Supercontinente Gondwana Oeste com destaque para as regiões cratônicas e as faixas móveis do Brasiliano Pan-africano. Base de dados: Modificado de Schobbenhaus e Campos (1984), Trompette (1994), De Wit et al. (2008) e Uchoa (2016).

A Orogênese Brasileira/Pan-Africana é de extrema importância para a província, sendo responsável pelo desenvolvimento de grandes zonas de cisalhamento transcorrentes, assim como pelo intenso magmatismo granítico, o qual ocupa cerca de 30% do território (Almeida et al., 1981). Ademais, o *trend* principal das grandes estruturas encontram-se para NE, apresentando também grandes estruturas que se destacam com direções E-W, que são os lineamentos Patos e Pernambuco (Almeida et al., 1981).

3.3 DOMÍNIOS TECTÔNICOS

Devido à sua história complexa, a PB apresentou diversos modelos de divisão tectônica ao longo dos anos. Segundo Delgado et al. (2003), baseando-se em diversos trabalhos existentes na bibliografia, a província é dividida em três segmentos fundamentais, sendo eles: Subprovíncia Setentrional, Subprovíncia da Zona Transversal (Central) e Subprovíncia Meridional (Externa), os quais são limitados por

importantes zonas de cisalhamento. Esses segmentos, por sua vez, foram individualizados em domínios, terrenos e faixas, tendo como base feições litoestratigráficas, dados estruturais e geocronológicos, além de distintas assinaturas geofísicas.

Além desta, diversos pesquisadores adotam a divisão proposta por Brito Neves et al. (2000), que divide a província em cinco domínios tectônicos contínuos (**Figura 10**), a saber:

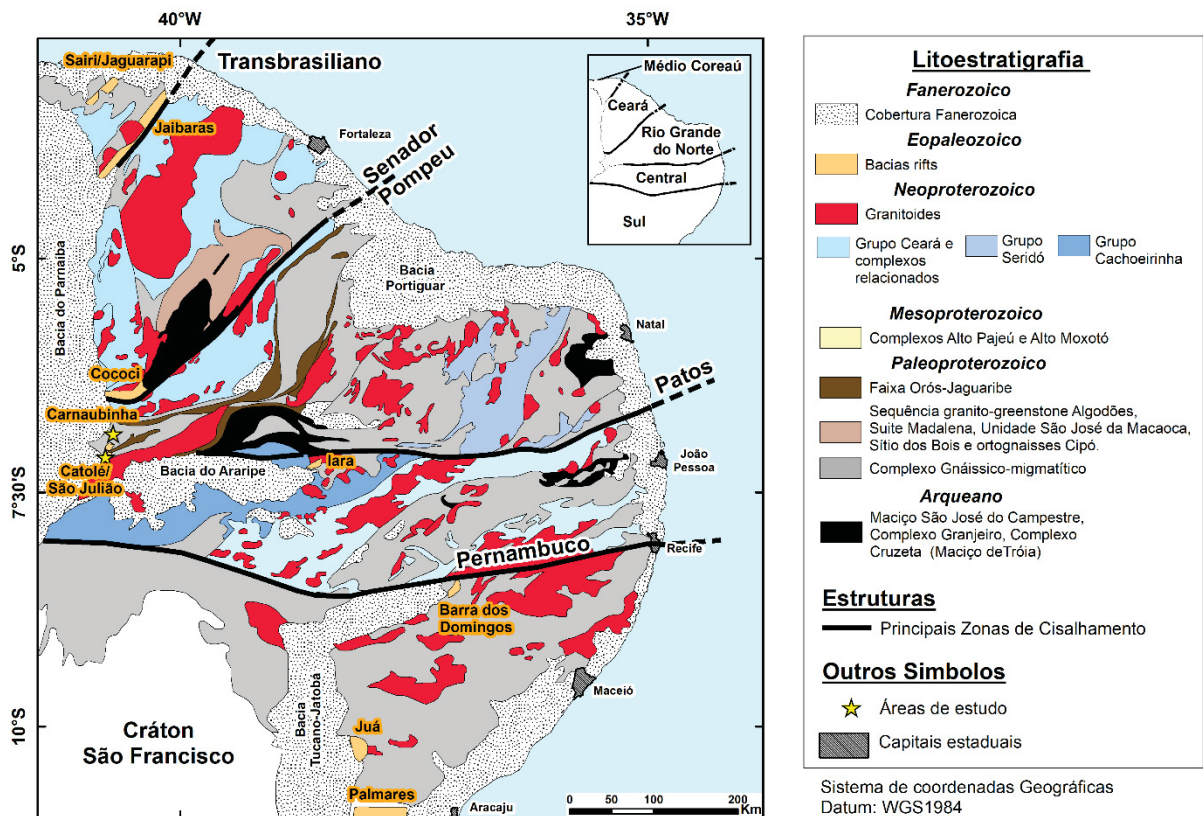


FIGURA 10 - Contexto geológico regional da área de estudo. Destaque para as bacias Eopaleozoicas da Província Borborema (Base de dados: Medeiros, 2004, Veríssimo et al., 2016, Berni et al., 2019).

- **Domínio Médio Coreau (DMC):** localizado na porção noroeste da Zona de Cisalhamento Sobral-Pedro II (Lineamento Transbrasiliiano);
- **Domínio Ceará Central (DCC):** refere-se a região limitada a NW pela zona de cisalhamento Sobral-Pedro II (Lineamento Transbrasiliiano), a SE pela zona de cisalhamento Senador Pompeu (ZCSP) e é recoberto, na porção SW-W, pelos sedimentos da bacia do Parnaíba;
- **Domínio Rio Grande do Norte (DRGN):** limitada pela zona de cisalhamento Senador Pompeu na porção W-NW, ao sul pelo lineamento de Patos, estando

encoberta pela bacia Potiguar e sedimentos costeiros cenozoicos, a norte e leste, respectivamente;

- **Domínio da Zona Transversal ou Central (DZT):** compreende a área ocupada entre os Lineamentos Patos a norte e Pernambuco a sul, com *trend* estrutural leste-oeste;
- **Domínio Sul ou Externi (DS):** limita-se entre os lineamentos Pernambuco a norte e o Cráton São Francisco a sul.

As áreas do projeto em questão encontram-se inseridas no DRGN, o qual ocupa uma área em torno de 150.000 km² da PB. De acordo com Delgado et al. (2003), esse domínio é composto pelas faixas Orós-Jaguaribe e Seridó, e pelos terrenos Rio Piranhas, São José do Campestre e Granjeiro. Destes, apenas o sistema Orós-Jaguaribe ocorre na área de estudo, sendo detalhado a seguir.

3.4 SISTEMA ORÓS-JAGUARIBE

Composto por duas sequências metavulcanossedimentares, o Sistema Orós-Jaguaribe (SOJ) apresenta um caráter linear contínuo de 500 km de extensão, com forma sigmoidal, e espessura variando entre 15 e 75 km, aproximadamente. Ocorre no Estado do Ceará, onde predomina, assim como ao longo do Piauí e Rio Grande do Norte (Parente e Arthaud, 1995).

De forma simples, tais sequências são associadas à ortognaisses, geralmente porfíricas, variando entre subalcalinos a alcalinos, separadas por um embasamento que é dividido em dois blocos distintos, o Jaguaretama e o São Nicolau (Mendonça e Braga, 1987; Parente e Arthaud, 1995), sendo recobertas por sedimentos da bacia do Parnaíba em seu extremo sudoeste (Gomes e Vasconcelos, 2000). Esse sistema, com *trend* NE-SW, é limitado por zonas de cisalhamento transcorrentes, sendo elas: Portalegre a leste e Orós a oeste, com a Jaguaribe cortando a faixa leste (Arthaud et al., 2008).

A seguir as unidades fundamentais desse sistema serão descritas baseando-se na bibliografia mais tradicional: Parente e Arthaud (1995). Todavia, este trabalho apresenta um contexto mais geral, sem detalhar unidades mais básicas, como Formações, dessa forma, outras bibliografias, que adotam outros nomes, serão adaptadas para o contexto do trabalho supracitado.

3.4.1 Litoestratigrafia

De forma simplificada, a litoestratigrafia da região é composta por um embasamento interno, o qual é o responsável por separar as sequências metavulcanicassedimentares. Sobrepostas a tais sequências, ocorrem coberturas mesozoicas, representadas pelas rochas das sub-bacias da região de Iguatu, e diques básicos pós-tectônicos, estes últimos não serão considerados no presente trabalho (**Figura 11**).

Idade	Unidade Litoestratigráfica	Legenda	Tipos Litológicos
Mesozóico / Cenozóico	Aluviões		Areias e cascalhos não consolidados
	Diques Básicos		Diabásios
	Bacias de Iguatu, Malhada Vermelha, Lima Campos e Icó		Folhelhos, arenitos arcoseanos e conglomerados polimíticos
Proterozóico Superior	Rochas Plutônicas	Intrusões Graníticas	Granitos alcalinos a sub-alcalinos (1); Granitos porfíricos a megacristais de FK (2); Ortognaisses com biotita de granulação média (3); Ortognaisses com biotita porfírica milonitizado (4)
		Intrusões Básicas	Metahornblenda gabros e metahornblenditos (900 Ma, Sá 1991)
Proterozóico Médio (1800/1000Ma)	Faixa Orós		Ortognaisses oftálicos com megacristais de FK (1); Ortognaisses com anfibólios sódicos porfíricos milonitizados (2)
			Granodioritos gnáissicos com biotita (3)
			Metapelitos com intercalações de metaconglomerados carbonatados polimíticos (mcp), de quartzitos (qz), de mármores calcíferos (mc), dolomíticos (md) e magnésiferos (mn), de calcosilicatos (cs)
			Metavulvânicas porfíricas ácidas
			Metavulcânicas básicas e básicas-intermediárias
Proterozóico Inferior/Arqueano (>1800 Ma)	Embasamento		Paragnaisses migmatizados com mobilizados granatíferos (b); Ortognaisses de composição granodiorítica à tonalítica parcialmente migmatizados com mobilizados e hornblenda.

FIGURA 11 - Estratigrafia tipo do Sistema Orós-Jaguaribe (Faixa Orós). Fonte: Adaptado de Parente e Arthaud (1995).

3.4.1.1 Embasamento Cristalino

Conforme já citado, o embasamento interno é representado pelos Blocos (ou complexos) Jaguaretama e São Nicolau. Esses blocos caracterizam-se por ortognaisses diversos bandados e, em algumas porções, parcialmente migmatizados, assim como rochas metassedimentares, predominantemente pelíticas, podendo estar associadas à quartzitos e rochas calcissilicáticas. A principal diferença entre estes é

que no primeiro predomina rochas metassedimentares, enquanto no São Nicolau essas rochas são raras ou ausentes.

3.4.1.2 Faixa Orós

A Faixa Orós é composta, especialmente, por metapelitos, representados por xistos aluminosos intercalados por quartzitos, mármore calcíticos, dolomíticos e magnesianos, rochas calcissilicáticas, bem como quartzitos carbonosos. Em termos litoestratigráficos, a porção basal é representada por xistos aluminosos, seguidos por uma associação carbonática na porção intermediária, com xistos a duas micas e feldspatos no topo.

Petrograficamente, os xistos podem ser classificados como xistos à clorita, xistos negros aluminosos com granada, xistos a duas micas, xistos feldspáticos, dentre outros, situando-se em sua porção centro-oeste, próximo à base da sequência. Os quartzitos apresentam uma composição bastante variável, sendo distribuídos de forma heterogênea (predominando na porção nordeste da faixa), em especial, ao longo dos principais desníveis topográficos, sustentando as serras de Orós e do Franco, bem como lentes ao longo das sequências metapelíticas. As demais rochas, calcissilicáticas e carbonática, apresentam expressiva variação composicional, ocorrendo na forma de grandes lentes.

As rochas metavulcânicas são caracterizadas por composições félsicas a máficas, as quais podem apresentar contatos bruscos, sugerindo, dessa forma, um magmatismo bimodal. As ácidas possuem, em geral, composições dacíticas, riodacíticas e riolíticas, com idade em torno de 1,8 Ga, enquanto as básicas são representadas por metabasaltos e metandesitos, podendo estar associados e/ou recortados por rochas hipoabissais.

Já as rochas metaplutônicas, que recortam as litologias supracitas, são caracterizadas por diferentes ortognaisses, a exemplo: *i*) facoidais (tipo Lima Campos), com composição granítica e textura porfirítica, apresentando, em porções localizadas, textura rapakivi; *ii*) de composição granodiorítica, com hornblenda e/ou biotita; e *iii*) porfirítico milonitizados (tipo Cariús), os quais são semelhantes aos facoidais. Soma-se ainda intrusões neoproterozoicas, representadas pelos biotita granito-gnaisses de Jucás, granitos alcalinos a subalcalinos da região de Saboeiro e da Serra do Morais, assim como o complexo básico-ultrabásico de Santarém.

3.4.1.3 Faixa Jaguaribe

A Faixa Jaguaribe apresenta uma predominância de rochas vulcano-plutônicas sobre as metassedimentares. As rochas vulcânicas são representadas, especialmente, por lavas e piroclásticas ácidas, com composição riolítica, enquanto as plutônicas são compostas por ortognaisses facoidais e diques de diorito. As rochas metassedimentares, por sua vez, são constituídas por xistos e quartzitos.

3.4.1.4 Características Deformacionais

Em termos de deformação, o sistema apresenta dois comportamentos distintos: *i)* as faixas apresentam uma foliação de alto grau na região N-S do sistema e com mergulhos acima de 45° na sua porção E-W. Apresentam uma elevada deformação, afetando, em especial, as rochas ortoderivadas, com porções miloníticas a ultramiloníticas nas zonas de cisalhamento, evidenciando, assim, um caráter transcorrente; e *ii)* o Bloco Jaguaretama possui uma foliação ondulada e com mergulhos abaixo de 45°, caracterizando uma tectônica tangencial. Em contrapartida, o São Nicolau, apresenta um comportamento transcorrente predominante. Dessa forma, ao contrário das faixas que são monicíclicas, o embasamento apresenta um caráter policíclico de deformação.

3.4.1.5 Características Metamórficas

Os dois blocos do embasamento são caracterizados por um metamorfismo de fácies anfibolito alto, com uma migmatização variando entre incipiente a acentuada. Enquanto as rochas metassedimentares da faixa apresentam uma mudança progressiva, indo da fácies xisto verde, em sua porção oeste, à fácies anfibolito baixo na região de Alencar/Orós/Cangati. Dessa forma, o aumento do metamorfismo de oeste para leste pode ser associado, em especial, a deformação transcorrente ocorrida na porção W-E.

3.4.2 Quadro Tectônico Evolutivo

Segundo Mendonça e Braga (1984), baseando-se em dados litológicos e geoquímicos, essas unidades apresentam inúmeras semelhanças com as sequências

do tipo *greenstone belts*, sendo a Faixa Orós comparável aos cinturões de Crixás, enquanto a Faixa Jaguaribe assemelha-se ao *greenstone belt* do Rio Itapicuru.

Parente e Arthaud (1995) acreditam que a evolução do sistema iniciou por volta de 1,8 Ga quando o embasamento, metamorfizado e deformado, foi sujeito ao estiramento e, conseqüentemente, divisão em domínios de uma crosta afinada. Esse adelgaçamento ocorreu associado com uma sedimentação de origem plataformal ou paraplataformal, bem como intrusões. Toda essa estrutura foi preservada ao longo da orogênese Brasileira, apresentando um comportamento transcorrente dextral.

3.5 BACIAS DA PLATAFORMA SUL-AMERICANA FORMADAS NO ESTÁGIO DE TRANSIÇÃO

Almeida, em 1969, definiu como estágio de transição o intervalo de tempo em que uma região evolui de condições paraplataformais para ortoplataformais, atingindo a estabilização após a tecto-orogênese do período geossinclinal (Teixeira et al., 2004). Esse estágio corresponde à fase molássica ou de fechamento de uma bacia oceânica com a colisão continental, todavia, é importante citar que o termo molassa é usado de forma equivocada. Originalmente, era utilizado para se referir às associações de rochas sedimentares detríticas que preenchem a antefossa alpina, mas, com o passar do tempo, passou a ser aplicado para quaisquer facies sedimentares com características semelhantes, mas condições tectônicas adversas (Teixeira et al., 2004).

Nesse estágio, diversas bacias foram formadas ao longo de um substrato que ainda estava instável e marcado por diversas descontinuidades. Todavia, essas bacias têm um potencial de preservação muito baixo, uma vez que foram sujeitas à diversos eventos deformacionais e erosivos, podendo ser, em muitos casos, soterradas por coberturas fanerozoicas, como as rochas sedimentares das bacias do Parnaíba e Paraná (Teixeira et al., 2004).

De acordo com Parente et al. (2004), na PB ocorrem diversas bacias formadas nesse estágio, as quais são caracterizadas por depósitos terrígenos imaturos representados, essencialmente, por conglomerados, arenitos e folhelhos, associados com magmatismo bimodal. Baseando-se em Brito Neves (1998), essas bacias podem ser classificadas em dois tipos: *i*) as formadas ao longo de zonas de cisalhamento ou

lineamentos; e *ii*) as associadas aos processos de evolução tardi a pós-tectônicos do orógeno Sergipano, representando bacias de antepaís e riftes distais associados.

As bacias de transição da PB são, geralmente, controladas por zonas de cisalhamento transcorrentes, com direção NE-SW ou E-W, a exemplo: *i*) Jaibaras: limitada pelos lineamentos Sobral-Pedro II (leste) e Café-Ipueiras (oeste); *ii*) Cococi/Rio Jucá: limitada pela zona de cisalhamento Senador Pompeu; *iii*) Iara: ao longo do lineamento Patos (sul) e zona de cisalhamento Cuncas (ramificação do primeiro); *iv*) Sairi: zona de cisalhamento Jaguarapi; e *v*) Catolé-São Julião, ao longo da zona de cisalhamento Tatajuba. As bacias de maior extensão ocorrem na porção oeste da província, sendo sotopostas pelas rochas sedimentares da Bacia Parnaíba (Parente et al., 2004).

Parente et al. (2004) classificaram as sequências sedimentares em duas distintas: Alfa Inferior e Alfa Superior. A primeira é representada por sedimentos oriundas de sistemas de leques deltaicos prográdantes em corpos lacustres, os quais podem ser associados com rochas vulcânicas, enquanto a segunda pode ser interpretada como produtos de fluxos detríticos subaéreos, relacionada com corpos aquosos rasos, como lacustres. Em cada bacia, tais sequências apresentam nomes distintos, mas características bem semelhantes.

3.6 GRANITOIDES DIVERSOS

Em ambas as áreas de estudo são reportados corpos granitoides nas regiões adjacentes. De acordo com Cavalcante (1999), a Suíte Magmática Serra do Deserto é representada por ortognaisses cinzentos de estrutura facoidal (Augen-gnaiss) com composição granítica e megacristais de feldspatos, com oscilações significativas entre pórfiros e matriz, datado do paleoproterozoico. No geral, seus principais contatos com as rochas do embasamento são representados por zonas de cisalhamento.

O Granito Mandacaru é um corpo controlado por falhas na direção NE-SW, que o coloca em contato com rochas granito-gnáissicas a sul e ao norte com as rochas da Bacia Catolé-São Julião (Parente et al., 1986). Possui grande variabilidade composicional, sendo representada por cinco fácies petrográficas distintas (Parente et al., 1986). Também é recortado por diques de composição básica e ácida, apresentando, também, brechas com cobre localizado na forma de malaquita e sulfetos subordinados (Parente e Fuck, 1987; Machado, 2006; Medeiros e Paula,

2019). De acordo com Machado (2006), o Granito Mandacaru possui idade U-Pb de $576 \pm 6,7$ Ma. Também ocorre o Granitoide Neoproterozoico Riacho do Puiú, constituído por granitos leucocráticos associados a mobilizados pegmatóides (Veríssimo et al., 2014). Cita-se que não há muitas menções na literatura sobre o mesmo, restringindo-se apenas ao trabalho supracitado, que corresponde a Folha de Pio IX, em escala de 1:100.000.

Nas proximidades da bacia de Carnaubinha ocorre um corpo granitoide sem denominação, descrito pela primeira vez por Saraiva e Rodrigues (2018), o qual faz contato com os ortognaisses do Complexo São Nicolau.

3.7 BACIA DO PARNAÍBA

Implantada sobre os riftes cambro-ordovicianos, a Bacia do Parnaíba recobre porções de importantes bacias formadas no estágio transição, tais como Jaibaras, Cococi e Catolé-São Julião (Silva et al., 2003), sendo constituída pelos grupos Serra Grande, Canindé, Balsas, Mearim, bem como as formações Grajaú, Codó e Itapecuru (Góes e Feijó, 1994). Neste trabalho só será detalhado, de forma simplificada, o Grupo Serra Grande (Formação Jaicós), unidade presente nas áreas deste projeto.

A Formação Jaicós é representada por arenitos médios a grossos, com seixos angulares a subangulares, mal selecionados, os quais podem apresentar estratificação cruzada ou lenticular, sendo caracterizados por uma sedimentação de ambiente fluvial entrelaçado (Góes e Feijó, 1994; Vaz et al., 2007).

3.8 GEOLOGIA LOCAL

Como o intuito da pesquisa em questão não é um mapeamento geológico, utilizou-se como base as informações disponíveis em Saraiva e Rodrigues (2018) e Medeiros e Paula (2019), responsáveis por realizar um mapeamento em escala de semi-detalhe (1:25.000), englobando as bacias de Carnaubinha e Catolé-São Julião, respectivamente. Como forma complementar, também se utilizou, quando necessário, informações oriundas das Folhas Pio IX (SB.24-Y-A-VI), Fronteiras (SB.24-Y-C-III), com escala 1:100.000, e Jaguaribe SW (SB.24-Y), com escala 1:500.000 (**Figuras 12 e 13**).

De forma simplificada, ambas as áreas de estudo apresentam características semelhantes. O embasamento das bacias de Carnaubinha e Catolé-São Julião é representado pelo Complexo São Nicolau e pelas rochas supracrustais do Grupo Orós. Já as bacias são preenchidas por uma sequência clástica imatura formada por conglomerados, arenitos, folhelhos e siltitos, a qual é intrudida por diques vulcânicos ácidos e máficos. Além disso, nas adjacências de ambas as áreas, ocorrem corpos graníticos e ambas as bacias são sotopostas pela Formação Jaicós (Grupo Serra Grande) da Bacia do Parnaíba.

Em termos estruturais, a região que compreende as áreas de estudo é representada por dois compartimentos, um ao sul, nas proximidades do município de Fronteiras (englobando a Bacia Catolé-São Julião), e outro ao norte, na região de Pio IX (compreendendo a Bacia de Carnaubinha). O primeiro é marcado pela ocorrência de zonas de cisalhamento transcorrentes dextrais, enquanto o segundo é representado por estruturas sinistrais, resultando em uma dobra de arrasto regional (Maas, 2003).

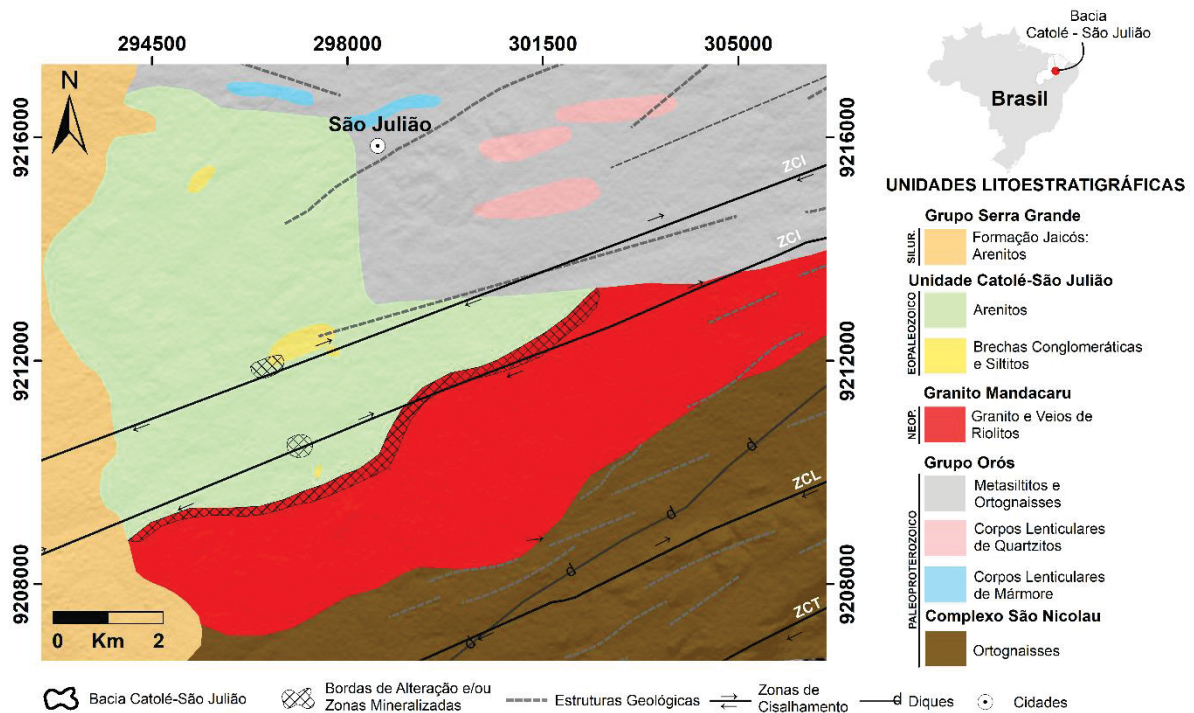


FIGURA 12 - Geologia da Bacia Catolé-São Julião e adjacências. ZCT - Zona de Cisalhamento Tatajuba, ZCL - Zona de Cisalhamento Limoeiro, ZCI - Zona de Cisalhamento Indiscriminada (sem nome definido). Base de dados: Gomes et al. (2000), Virgens Neto (2017), Medeiros e Paula (2019).

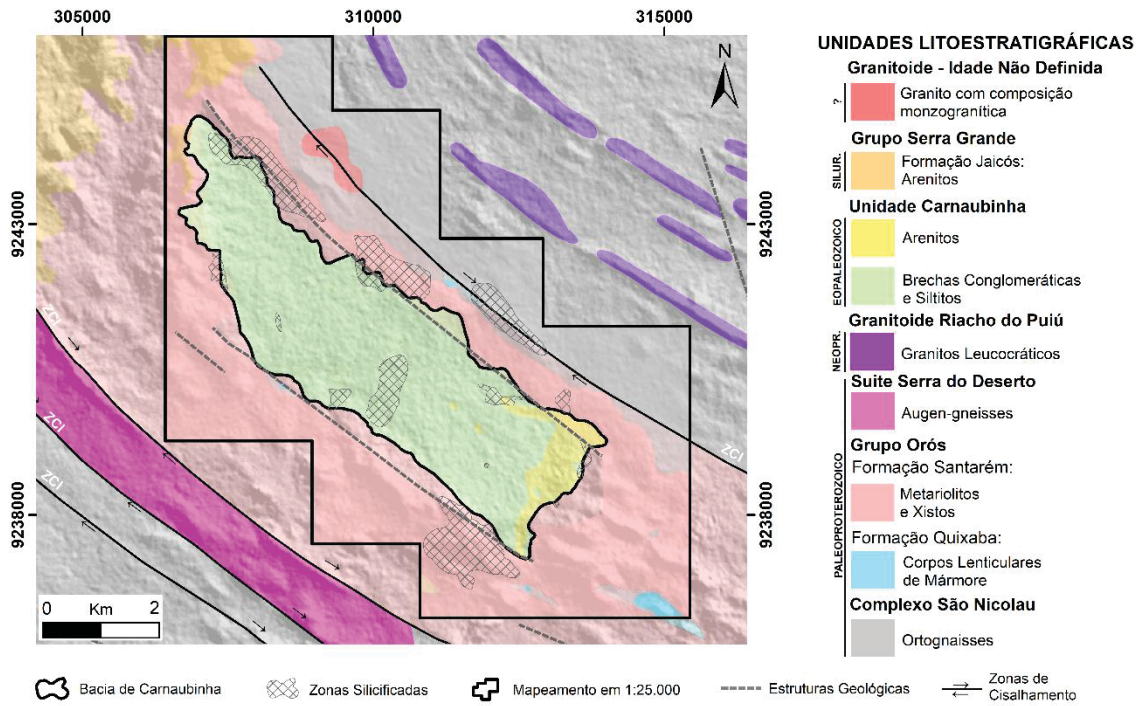


FIGURA 13 - Geologia da Bacia de Carnaubinha e adjacências. O polígono em preto representa a área com informações geológicas em escala de 1:25.000 sobreposta à Folha Pio IX, em escala de 1:100.000. ZCI - Zona de Cisalhamento Indiscriminada (sem nome definido). Base de dados: Veríssimo et al. (2014) e Saraiva e Rodrigues (2018).

4 GEOFÍSICA: ESTADO DA ARTE

De forma simples, a geofísica pode ser definida como a ciência que estuda a geologia de subsuperfície com base em princípios físicos, investigando tanto regiões rasas, quanto profundas. Essa área pode ser dividida em geofísica global (ou pura), cujo o objetivo é entender a estrutura da Terra, assim como os fenômenos físicos que acontecem no planeta (como terremotos e tsunamis), e geofísica aplicada, com a finalidade prospectiva, buscando materiais de interesse econômico, como depósitos minerais e água subterrânea (Telford et al., 1990; Mussett e Khan, 2000; Reynolds, 2011).

Os métodos utilizados nesta pesquisa (gravimétrico e magnetométrico) são embasados na teoria do potencial (Blakely, 1996), também conhecida como campo natural. Todavia, apesar desta semelhança, a forma de representação é completamente distinta, o primeiro caracteriza-se por um caráter monopolar, ou seja, a anomalia possui apenas uma variação, positiva ou negativa, em contrapartida, o segundo é dipolar, o que acaba dificultando, de uma certa forma, a interpretação. Por se tratarem de métodos amplamente conhecidos, a fundamentação teórica dos mesmos não será detalhada na presente pesquisa. Para maiores detalhes sugere-se consultar as seguintes referências: Telford et al. (1990); Luiz e Silva (1995); Blakely (1996); Mussett e Khan (2000); Reynolds (2011); Hinze et al. (2013); Dentith e Mudge (2014).

4.1 GRAVIMETRIA

A gravimetria é um método geofísico passivo que investiga a geologia de subsuperfície com base nas variações naturais do campo gravimétrico da Terra, as quais são ocasionadas pela diferença de densidade das rochas (Telford, et al 1990; Reynolds, 2011; Dentith e Mudge, 2014). Dessa forma, um corpo com contraste de densidade em relação ao material à sua volta pode ser detectado pela medição da força da gravidade (Ribeiro e Molina, 2018), tal fato fez com que ele se tornasse mais popular em estudos com intuito prospectivos no início do século XX, em especial na exploração de hidrocarbonetos (Reynolds, 2011).

4.1.1 Pré-Processamento e Controle de Qualidade dos Dados

Após a atividade de campo, iniciou-se a rotina de organização dos dados gravimétricos, visando análises prévias ao processamento, bem como o processamento dos dados planialtimétricos, para a obtenção de valores com precisão centimétricas/milimétricas de X, Y e Z. Todas as estações foram analisadas de forma individual, uma vez que em cada ponto foram realizadas três leituras (cinco nas bases), com exclusão das destoantes, visando a geração de um resultado mais confiável.

4.1.2 Processamento dos Dados

A crosta terrestre não é homogênea, apresentando diferentes tipos de rochas (ígneas, sedimentares e metamórficas) que, por conta da diferença de composição e porosidade, apresentam densidades distintas. Soma-se ainda os efeitos ocasionados na leitura pela latitude e topografia, por exemplo.

Dessa forma, após a aquisição dos dados brutos, antes de realizar as interpretações, os dados gravimétricos precisam ser corrigidos (ou compensados), sendo esse processo chamado de redução gravimétrica ou, segundo alguns autores, redução ao geóide, uma vez que os dados são levados para um *datum* de referência, em geral, o nível médio dos mares. Empiricamente, essas variações podem ser temporais (*drift* instrumental e efeito das marés) e espaciais (latitude, elevação, excesso de massa e topográfica). Para mais detalhes, sugere-se consultar as bibliografias mencionadas anteriormente, bem como o manual de processamento de dados gravimétricos do Oasis Montaj (Geosoft, 2010).

i) Correção de maré: Devido à atração gravitacional do sistema luni-solar, todas as leituras foram corrigidas da variação de maré para a data (dia e hora) e local de observação;

ii) Correção da altura do instrumento: Cada leitura foi corrigida sobre a estação gravimétrica ou base sobre a qual a elevação é medida;

iii) Correção da variação instrumental: É calculada com base no erro de fechamento entre a primeira e a última leitura na estação gravimétrica base de cada circuito;

iv) Correção da latitude: Requer a gravidade teórica para o local da medida sobre o esferoide terrestre;

v) Correção ar-livre: Responsável por corrigir a variação de gravidade ocasionada pela diferença de elevação entre as estações medidas e o nível médio dos mares. Tal correção mostra a importância de se realizar um levantamento topográfico de precisão para cada estação coletada;

vi) Correção Bouguer: A correção *free-air* compensa apenas a diferença de altitude entre a estação de leitura e o *datum* utilizado, no entanto, nenhum tratamento é realizado para remover a influência das massas rochosas existentes, para isto, realiza-se a correção Bouguer. De forma simples, esta correção aproxima toda a massa acima do nível do mar à uma placa homogênea infinita, com espessura igual à altura do ponto de leitura, ou seja, considera a topografia como sendo plana (Blakely, 1996). A placa deve ter densidade igual à do material existente entre o geóide e a estação (Luiz e Silva, 1995);

vii) Correção de terreno: A correção Bouguer considera que a topografia que circunda a estação de leitura é plana, o que raramente acontece. Regiões com cotas mais elevadas, por exemplo, exercem atração sobre a estação de leitura, reduzindo a gravidade medida no ponto, assim, esse efeito deve ser subtraído do valor da gravidade normal reduzido pelas correções *free-air* e bouguer ou adicionado ao valor da gravidade medido. Essa correção recebe o nome de topográfica ou de terreno. Teoricamente, é considerado que a estação se encontra no centro de um círculo dividido por linhas radiais e concêntricas em um grande número de compartimentos, o qual é conhecido como carta de Hammer, onde as zonas se encontram em um raio entre 2 e 21,90 km. Esta carta é sobreposta a um mapa topográfico e a elevação de cada nível é identificada, essa elevação é subtraída desses valores e o efeito gravitacional de cada compartimento pode ser determinado utilizando tabelas de referências (Kearey et al., 2011). Em termos práticos, o programa calcula as correções de terreno para cada estação pela extração das correções regionais a partir do *grid* da correção de terreno regional e pela adição da correção de terreno local.

4.2 MAGNETOMETRIA

A magnetometria é um método geofísico passivo, assim como a gravimetria, que investiga a geologia de subsuperfície com base nas variações naturais do campo

magnético da Terra. Essas variações são ocasionadas pela presença significativa de minerais magnéticos, tais como magnetita e ilmenita, nos diferentes tipos de rochas (Telford, et al., 1990; Reynolds, 2011; Dentith e Mudge, 2014).

A aplicação de métodos magnéticos em estudos geológicos avançados começou por volta de 1630, quando uma bússola de relógio de sol foi utilizada para prospectar minério de ferro na Suécia, tornando-se, assim, um dos métodos mais antigos de exploração geofísica (Blakely, 1996).

4.2.1 Pré-Processamento dos Dados

A aquisição dos dados oriundos do projeto Centro-Sudoeste do Ceará (Código nº 1101) foi realizada em duas aeronaves Piper Navajo PA31-350 (prefixos PR-PEC e PR-PRS) com um sistema aeromagnético acoplado a um sensor de vapor de cézio montado na cauda, do tipo *Stinger* (CPRM, 2010). Posteriormente, a equipe responsável pela execução do levantamento realizou diversas correções (**Figura 14**).

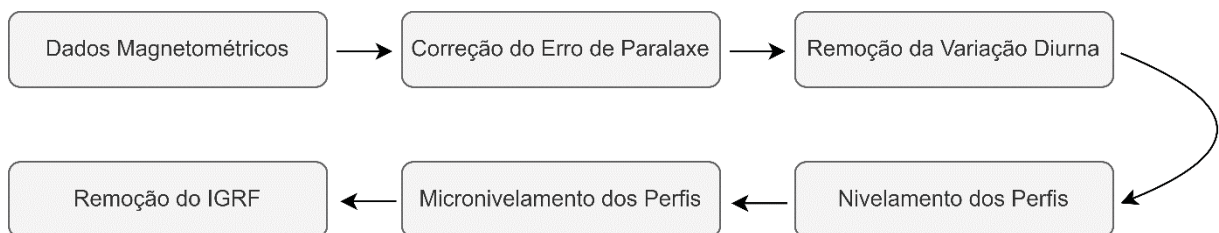


FIGURA 14 - Fluxograma do pré-processamento realizado nos dados aerogeofísicos, com base o relatório técnico do projeto (CPRM, 2010).

Como o intuito deste trabalho não é detalhar as etapas de pré-processamento dos dados aerogeofísicos, recomenda-se a leitura do relatório técnico emitido pela CPRM (2010) para maiores detalhes. O mesmo encontra-se disponível na plataforma GeoSBG, de responsabilidade do Serviço Geológico do Brasil – CPRM.

4.2.2 Processamento de Dados Aeromagnéticos

- Interpolação dos dados

Os dados foram organizados e interpolados em malhas quadradas regulares de 125 metros, ou seja, $\frac{1}{4}$ do espaçamento das linhas de voo (500 m), por meio do método bidirecional, através da rotina *bi-direcional line gridding* (BIGRID) presente no

software Oasis Montaj™ da *Seequent*. Vasconcelos et al. (1994) sugerem que o tamanho da célula varie entre 1/4 a 1/8 do espaçamento da linha de voo, a fim de evitar perda de informações, assim como o falseamento (*aliasing*) ou incorporação de altas frequências sem solução em frequências baixas.

O método bidirecional é indicado para dados que estejam distribuídos na forma de linhas, possibilitando destacar tendências perpendiculares às direções do levantamento, sendo ideal para uma alta densidade de amostras (Geosoft, 2013). Esse processo é realizado por meio de duas etapas distintas: i) interpolação nas linhas de produção N-S, obedecendo o tamanho da célula definida; e ii) os pontos de interseção de cada linha são extrapolados para a direção transversal, gerando, dessa forma, um dado em grade.

- Processamento e Aplicação de Técnicas de Realce

Com a realização do procedimento supracitado (interpolação dos dados), foi gerado o mapa de Campo Magnético Anômalo (CMA) e, em seguida, para balancear os valores mínimos e máximos do produto final realizou-se uma correção, onde o valor médio do grid foi subtraído de sua totalidade (sendo - 20,95 para Carnaubinha e - 32,49 para Catolé-São Julião). A fim de remover as altas frequências comumente associadas ao ruído, o CMA foi suavizado duas vezes com o filtro Hanning (convolução 3x3).

Em seguida, antes de realizar as interpretações, visando realçar as características específicas de cada fonte, bem como estimar o comportamento destas com a profundidade, foram aplicadas técnicas de filtragem, as quais se baseiam no domínio do espaço ou no de Fourier. A Inclinação do Sinal Analítico do Gradiente Horizontal Total (ISA-GHT), por exemplo, realça as bordas dos corpos magnéticos, independentemente da profundidade da fonte (Ferreira et al., 2013). Já o Espectro de Potência Radial e a Deconvolução de Euler são usados para estimar a profundidade das fontes magnéticas. Para mais detalhes da etapa de pré-processamento, bem como destas e de outras técnicas de realce, recomenda-se a leitura de Telford et al. (1990), Blum (1999), Reeves (2005) e Isles e Rankin (2013).

Sobre o CMA, foram aplicados métodos qualitativos e semi-quantitativos. Destaca-se que o *grid* gerado pela Amplitude do Sinal Analítico (ASA) foi utilizado como produto principal, uma vez que a Redução ao Polo (RTP) apresentou

instabilidade em algumas anomalias das áreas de estudo (inversão de polaridade ou permanência de um carácter dipolar), o que é factível de ser ocasionado pela baixa latitude da região. Com base no CMA, aplicou-se a Deconvolução de Euler 3D. O Índice Estrutural (IE) que apontou maior homogeneização para as áreas de estudo foi o 1 (dique), ao passo que os demais parâmetros foram escolhidos com base no método de tentativa e erro, sendo utilizado 10 para o tamanho da janela (equivalente a 1250 m) e 7% para profundidade máxima de tolerância. Também foram geradas soluções de Euler no *software Euler 1.5*, a partir da componente gravimétrica residual e da Amplitude do Sinal Analítico (ASA), considerando um tamanho de janela de 10. É importante citar que os dados utilizados no *software Euler 1.5* se referem a perfis 2D, os quais foram extraídos das interpolações dos dados supracitados (Bouguer residual e ASA). Ademais, as componentes gravimétricas foram separadas a partir do filtro Gaussiano (regional-residual).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da presente dissertação serão apresentados na forma de dois artigos, um para cada área de estudo, sendo:

i) **Área I (Bacia Catolé-São Julião e adjacências):** intitulado “*Contribution to the knowledge of the structural framework of the Catolé-São Julião basin, Brazil, based on Gravity and Magnetic data*”. Submetido para *Journal of Applied Geophysics*, conforme pode ser observado na **Figura 15**.

APPGEO-D-22-00570 - Confirming your submission to Journal of Applied Geophysics



This is an automated message.

CONTRIBUTION TO THE KNOWLEDGE OF THE STRUCTURAL FRAMEWORK OF THE CATOLÉ-SÃO JULIÃO BASIN, BRAZIL, BASED ON GRAVITY AND MAGNETIC DATA

Dear Miss Rodrigues Saraiva,

We have received the above referenced manuscript you submitted to Journal of Applied Geophysics. It has been assigned the following manuscript number: APPGEO-D-22-00570.

To track the status of your manuscript, please log in as an author at <https://www.editorialmanager.com/appgeo/>, and navigate to the "Submissions Being Processed" folder.

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,
Journal of Applied Geophysics

FIGURA 15 - Comprovante de submissão do artigo da área I.

ii) **Área II (Bacia de Carnaubinha e adjacências):** intitulado “*Structural Framework of the Carnaubinha basin, based on Gravity and Magnetic data*”, ainda não submetido para nenhum periódico científico.

5.1 ARTIGO Nº 1

Submetido para *Journal of Applied Geophysics*

CONTRIBUTION TO THE KNOWLEDGE OF THE STRUCTURAL FRAMEWORK OF THE CATOLÉ-SÃO JULIÃO BASIN, BRAZIL, BASED ON GRAVITY AND MAGNETIC DATA

Claudia Estefani Rodrigues Saraiva¹, Maximilian Fries^{1,2}, Karen Maria Leopoldino
Oliveira^{3,4}

1 Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Brazil.

2 Associate Professor, Laboratório de Geofísica Aplicada (LGA), Universidade Federal do Pampa (Unipampa), Brazil.

3 Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará (UFC), Brazil

4 Assistant Professor, Laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto (LGPSR), Universidade Federal do Ceará (UFC), Brazil.

ABSTRACT

The Catolé-São Julião basin, northeast of Brazil, has a temporal relationship with the end of the Brasiliano Orogeny. During the Ediacaran and the Ordovician ages, there was the formation of several intracontinental rifts, called Transitional-stage Basins. In the Borborema Province (BP), these basins are characterized by having a solid structural control, being located close to the shear zones, an intense hydrothermal alteration, and the presence of disseminated sulfides leading different authors to classify such mineralizations as similar to Iron-Oxide-Copper-Gold (IOCG) deposits. However, despite the apparent importance, many of these basins do not have information regarding the geological-structural framework. Therefore, from the integration of aeromagnetic and ground gravity methods, it was possible to perform a characterization of the subsurface geology of the Catolé-São Julião basin and its surroundings. Geophysical lineaments with the main direction of NE-SW were interpreted, supported by morphostructural features extracted from the DEM image. Through 2D and 3D Euler deconvolution, the depth of geophysical sources was

identified, helping to define geological contacts and extension of discontinuities. The area was divided into four distinct Magnetic Domains (MDs), which showed a good correlation with the geological data. In addition, a 2D gravity modeling was carried out along three transects, which allowed the analysis of the internal geometry of the basin and its depth, which reached maximums in the order of 500 meters. Thus, the study provided the generation of new results, since there are no geophysical works published focusing on the basin, which can help in future research.

Keywords: Potential methods, Geophysical Mapping, Geophysical Lineaments, Euler Deconvolution, Gravity Modeling, Transitional-Stage Basins

1. INTRODUCTION

The Pan-African/Brasiliano orogeny, responsible for the Gondwana amalgamation, and the development of the Brazilian synclises mark the passage between the Proterozoic-Phanerozoic in the South American Platform (Schobbenhaus and Brito Neves, 2003; Hasui., 2012). During this period, more specifically between the Ediacaran and the Ordovician, there was the formation of several intracontinental rifts, these so-called transitional-stage basins (Almeida, 1969; Teixeira, 2000; Teixeira, et al., 2004; Almeida, et al., 2010).

In the Borborema province, northeastern Brazil, these basins show clastic immature sequences essentially composed of conglomerates, sandstones, and shale of continental environments, which whether or not be associated with bimodal magmatism (Brito Neves, 1998; Parente et al., 2004). Such regions also exhibit strong structural controls being located close to shear zones, an intense hydrothermal alteration in addition to the presence of disseminated sulfides. These aspects motivated several authors to classify such mineralizations as similar to IOCG deposits (Maas et al., 2003; Machado, 2006; Garcia et al., 2006; Saraiva and Rodrigues, 2018; Medeiros and Paula, 2019).

Despite being known since the '80s, the Catolé-São Julião Basin not present information about its geological-structural framework. Generally, the research executed focuses on geological mapping and typological characterizations of the ore and geochemical characteristics of their rocks and the basement (Parente, 1984; Parente et al., 1986; Parente and Fuck, 1987; Medeiros and Paula, 2019).

Methods based on the potential field (magnetic and gravity) are commonly applied in studies related to sedimentary basins, making it possible to determine their

limits, the basement relief, structural features, and heterogeneities between the sedimentary packages based on the contrasts of magnetic susceptibility and density (Castro, 2011; Castro et al., 2014; Pedrosa Junior et al., 2015, 2017; Oliveira et al., 2018; Santos Filho et al., 2021). Additionally, the analysis of products derived from images of remote sensing corroborates the definition of the structural pattern of a region (Jacques, et al., 2014). Thus, the purpose of this work is to contribute to the knowledge of the subsurface geology of the area in study, based on information from aerogeophysical data (magnetic) and terrestrial gravity transects, along with geological information and remote sensing images. As the first geophysical study executed with focus on the basin, the integration of these results generated unprecedented information, which can help future research, whether with an evolutionary or prospective focus.

2. GEOLOGICAL CONTEXT

The study area is located in the western portion of the Borborema Province (BP) northeast of the South American Platform, along the axis of the Paraíba basin (**Figure 1**). As defined by Almeida et al. (1981), the BP has an extension of 450000 km² (Brito Neves et al., 2000). Formed by the convergence of the Amazonian, São Luís/West African, and São Francisco/Congo cratons, at the end of the Brasiliano-Pan African orogeny, which resulted in the formation of the Gondwana (Brito Neves and Cordani, 1991; Brito Neves et al., 2000). It is commonly known that such event is extremely important for this province, since it is responsible for the development of the major transcurrent shear zones, for the definition of the main trend generally oriented in the northwest quadrant, and the magmatism (Almeida et al., 1981).

Based on Brito Neves et al. (2000), the BP is divided into five distinct tectonic domains, which are parted by regional-scale shear zones. The study section is located in the Rio Grande do Norte Domain (RGND), limited by the Senador Pompeu and Patos lineaments by the Potiguar Basin and coastal sediments (**Figure 1b**). This consists of archean basement blocks (e.g. São José do Campestre Masif), Paleoproterozoic blocks (e.g. Rio Piranhas), and Paleoproterozoic to Neoproterozoic supracrustal sequences (e.g. Orós-Jaguaribe Belt), (Parente and Arthaud, 1995; Van Schmus, 1995; Brito Neves et al., 2000; Dantas et al., 2004).

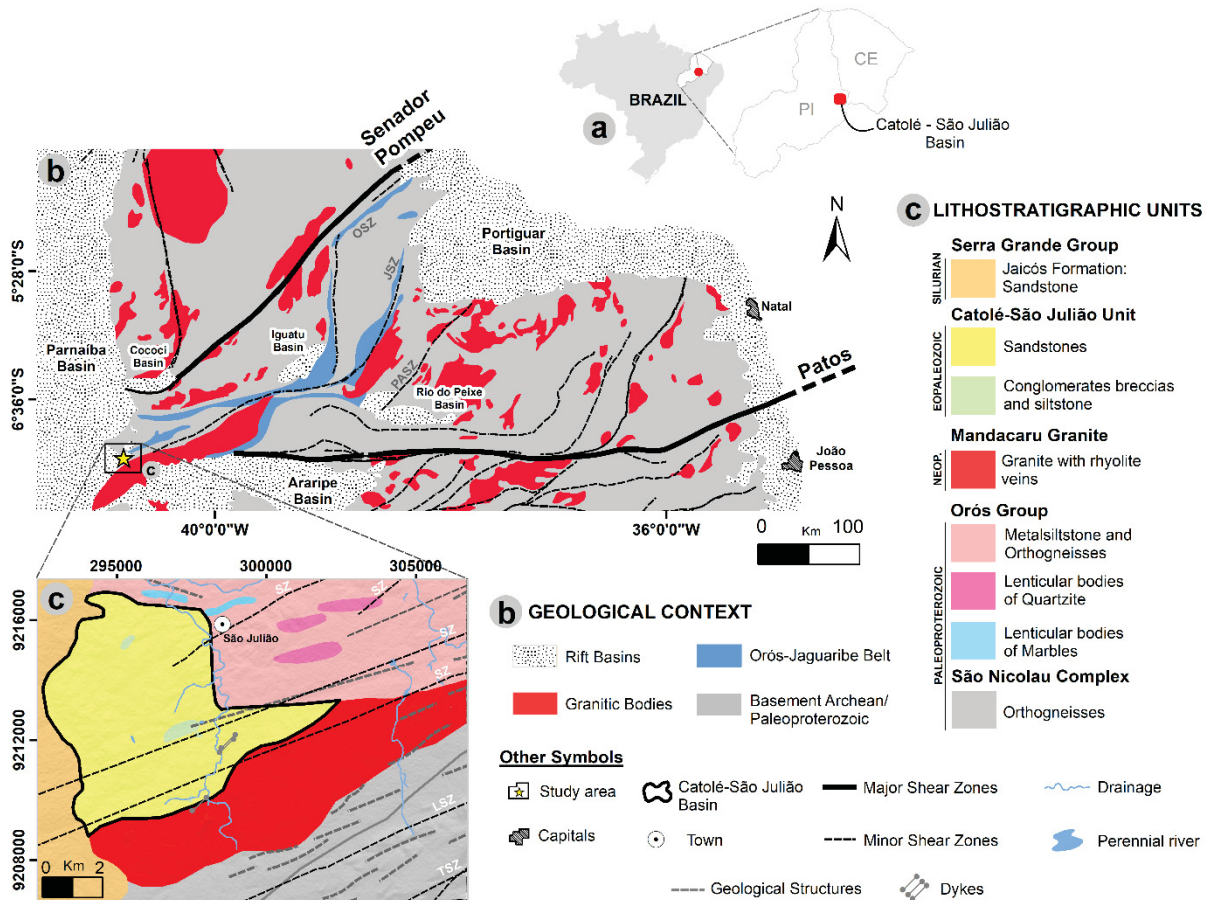


Figure 1 - General characterization of the Catolé-São Julião Basin. (a) Location of the study area, (b) Simplified map of BP, highlighting the RGND and the study area, (c) Geology 1:25000 scale of the Catolé-São Julião Basin and surroundings. OSZ - Orós Shear Zone; JSZ - Jaguaribe Shear Zone; PASZ - Portalegre Shear Zone. Source from: Gomes et al., (2000); Veríssimo et al., (2016); Virgens Neto (2017); Medeiros e Paula (2019).

The Catolé-São Julião Basin, the area of interest of this study is located overlying rocks of the Orós-Jaguaribe System (~1.80 Ga) and under the Serra Grande Group of the Parnaíba Basin (**Figure 1c**). The first is characterized by having sigmoidal NE-SW trending features, limited by transcurrent shear zones, id est: Orós, in its western portion, and Portalegre, located to the east (Parente and Arthaud, 1995; Arthaud et al., 2008). The local lithostratigraphy is composed of a basement that is divided into two distinct blocks, Jaguaretama and São Nicolau, which are responsible for separating the Orós metavolcanosedimentary sequences, to the west, and Jaguaribe, to the east (Mendonça and Braga, 1987; Parente and Arthaud, 1995). The basement is composed of several banded orthogneisses and, in some portions, partially migmatized, as well as paraderived rocks. The Orós and Jaguaribe sequences present schists, quartzites, calcitic/dolomitic/magnesitic marbles, calcsilicate rocks, and carbonaceous quartzites, as well as metavolcanic rocks of bimodal magmatism,

and metaplutonic rocks characterized by different orthogneisses (Parente and Arthaud, 1995).

The Mandacaru Granite, outcropping in the study area, is a body controlled by the system of faults in the NE-SW direction, which puts it in contact with the granite-gneissic rocks to the south and north with the rocks of the Catolé-São Julião basin (Parente et al., 1986). It has a large compositional variability, represented by five distinct petrographic facies (Parente et al., 1986). It has also intrusions of dykes of basic and acidic composition, presenting breccias with the presence of copper located in the form of malachite and subordinate sulfides (Parente and Fuck, 1987; Machado, 2006; Medeiros and Paula, 2019). According to Machado (2006), the Mandacaru Granite shows an age of U-Pb 576 ± 6.7 Ma.

Of the Eopaleozoic age, the Catolé-São Julião basin has its origin linked to the Brasiliano/Pan African event. It has an area of approximately 40 km² and consists of an immature clastic sequence marked by the deposition of sandstones, conglomerates, and siltstones cut by rhyolitic dykes, all of them affected by hydrothermal alterations (Medeiros and Paula, 2019). The stratigraphy of the basin is composed of two sequences, the Lower Alpha (Ediacaran-Cambrian) and the Upper Alpha (Cambro-Ordovician), represented by the Catolé Formations, a Vulcano-sedimentary sequence, and Tamboril characterized by the presence of polymictic conglomeratic breccias (Parente, 1984; Parente et al., 2004). All units are located under the Serra Grande Group (Jaicós Formation) of the Parnaíba Basin dated back to the Silurian, represented by conglomeratic sandstones (Parente et al., 1984; Medeiros and Paula, 2019).

3. MATERIALS AND METHODS

The present work was based on the integration of aeromagnetic data, terrestrial gravity transects, remote sensing images, and information on the surface geology obtained from previous geological mappings. The steps and procedures used are shown in **Figure 2**.

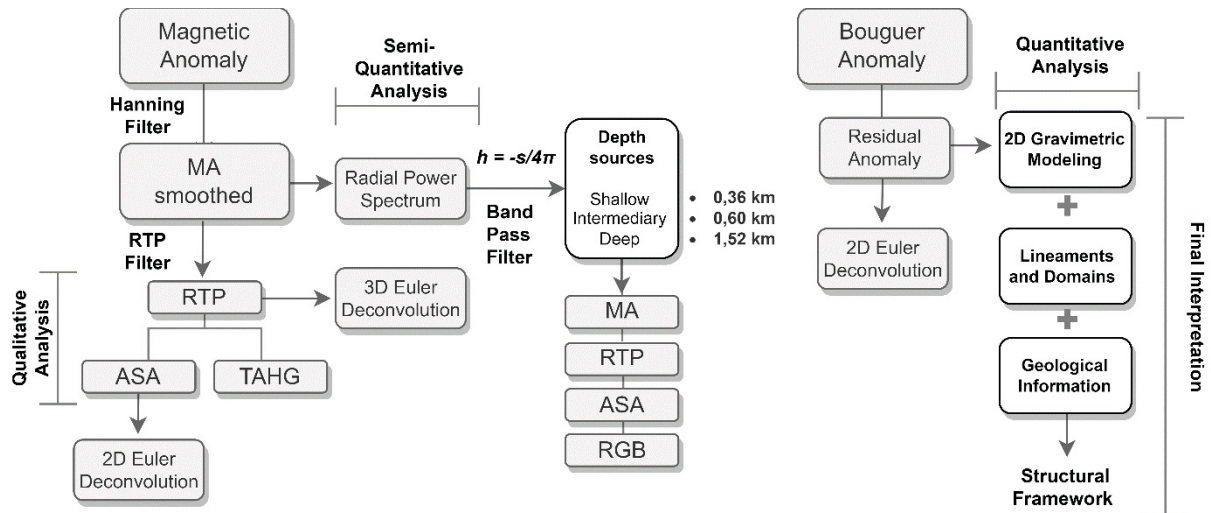


Figure 2 - Processing of magnetic and gravity data. Highlight for the integration of results with information from remote sensing and geology. MA - Magnetic Anomaly, RTP - Reduction to the Pole, ASA - Analytic Signal Amplitude, TAHG - Tilt Angle of the Total Horizontal Gradient, RGB - Red/Green/Blue.

3.1 Aeromagnetic data analysis

In this research, aerogeophysical data from the Centro-Sudoeste do Ceará project (n.º1101) were used, obtained by Prospector Aerolevantamentos e Sistemas LTDA, affiliated to the Serviço Geológico do Brasil - CPRM (**Figure 3**). This dataset was acquired in 2010, covering an area of 100487.00 km² of high-resolution profiles, 0.1 s sampling interval (magnetic data), and 100 m nominal flight height. Flight lines performed in the N-S direction spaced 0.5 km, and tie lines in the E-W direction spaced 10 km (CPRM, 2010).

The diurnal variation corrections and the removal of the main field value were previously executed (CPRM, 2010). The data were organized and interpolated into a grid of 125x125 m (cell size), i.e., ¼ of the spacing of the flight lines (Vasconcelos et al., 1994), by the bi-directional method (BIGRID – Geosoft, 2014), generating the magnetic anomaly (MA). To remove the high frequencies commonly associated with noise, the MA was smoothed twice with the Hanning filter (3x3 convolution).

Qualitative and semi-quantitative methods were applied to the MA, aiming to highlight the specific characteristics of each magnetic source, as well as to estimate their behavior with depth. Thus, the procedures used in this work were:

- i) Reduction to the Pole (RTP) (Baranov, 1957; Baranov e Naudy, 1964);
- ii) Amplitude of the analytic function (Nabighian, 1972, 1984);
- iii) Tilt Angle of the Total Horizontal Gradient (TAHG) (Ferreira et al., 2010, 2013);

- iv) Radially Average Power Spectrum (Spector and Grant, 1970); and
- v) 3D Euler deconvolution (Thompson, 1982; Reid et al., 1990).

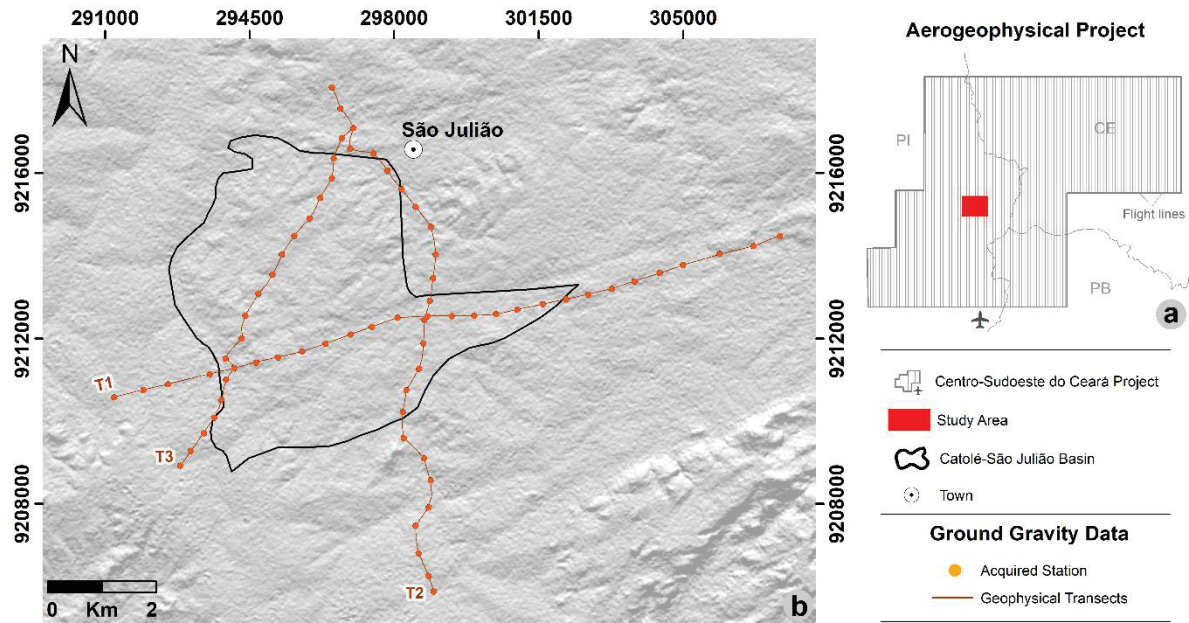


Figure 3 - Geophysical data used. (a) Location of the Centro-Sudoeste do Ceará project, and (b) Distribution of the gravity stations.

3.2 Structural Configuration

The Digital Elevation Model (DEM) is derived from Alos Palsar, with a spatial resolution of 12.5 meters provided by the Alaska Satellite Facility (ASF). This product offered a basis for the extraction of the morphostructural lineaments. Hill shading images with artificial illumination for the azimuth angles of 0° , 45° , 90° , and 135° were generated, where a sun altitude of 45° was used for all products. Subsequently, for the positive and negative topographic features manually extracted at a scale of 1:80000, the azimuths were obtained using the Arc-SDM extension, Spatial Data Modeller for ArcGIS (Sawatzky et al., 2010) to generate the rose diagram in the software Stereonet version 8.8.6 (Allmendinger et al., 2013).

3.3 Gravity Data

Based on a database available by the National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP), which provides stations collected by Brazilian universities and public agencies. However, the gravity coverage of the study area presents low resolution (only 6 gravity stations, with spacing ranging from 1 to 3 km). Therefore, 70

gravity stations were acquired in the form of three transects with an average spacing of 0.5 km using a digital SCINTREX gravimeter, model CG-5 (**Figure 3**). Concomitantly, a planialtimetric survey was carried out with a Differential GPS (Differential Global Positioning System or DGPS) from TRIMBLE, model R10, with millimeter precision.

All measured stations and respective data reduction was performed using the Gravity module of the Oasis Montaj software, encompassing the tidal effects, instrumental drift, latitude, the free-air and Bouguer anomalies, the latter associated with the terrain correction, making it possible to generate the complete Bouguer anomaly graph of each profile, which represents the total gravity, encompassing residual and regional anomalies. For the calculated Bouguer anomalies an average slab density of 2670 kg/m^3 was applied. For more details, see Geosoft (2015). Subsequently, from the power spectrum, the regional-residual separation filter was performed.

3.4 Depth Estimation

3.4.1 Radially Average Power Spectrum

The Radially Average Power Spectrum (Spector and Grant, 1970) is commonly used to estimate the depth of magnetic sources through the spectral separation of shallow, intermediate, and deep sources. From the adjusted lines, the crossing position for the abscissa axis is projected, making it possible to define the corresponding wave number, used as a complementary tool for the determination of the depth of the sources. Such components were separated using a band-pass filter (Geosoft, 2015) over the MA.

3.4.2 Euler deconvolution

Euler deconvolution is an extremely important technique since it allows performing depth estimation of magnetic and gravity sources (Thompson, 1982; Reid et al., 1990). For its use, it is necessary to define three parameters, which must be chosen with criteria, id est: structural index (which varies from 0 to 3), window size, and maximum depth error tolerance (Barbosa and Silva, 2005).

In this study, 3D Euler deconvolution was applied on the reduced to the pole aeromagnetic data, where the structural index that presented the best homogenization was 1 (dyke model), while the other elements were chosen based on the trial-and-error

method, with 10 being used for the window size (1250 m) and 7 % for maximum depth error tolerance.

Euler solutions were also generated in Euler 1.5 software (Cooper, 2002), from the residual gravity component and the magnetic anomaly submitted to ASA, for the geophysical transects (T1, T2, and T3) to estimate the depth of gravity and magnetic sources. For this, the following structural indexes from 0.00 to 1.0 were used, which are compatible with the local geology, being represented by linear features, such as faults and geological contacts (Castro, 2011). 2D Euler solutions helped in gravity modeling and will be discussed in topic 4.

3.5 2D Gravity modeling

The three profiles cross-sectioning the Catolé-São Julião Basin were modeled using the GM-SYS tool (GM-SYS, 2004) existent in the Oasis Montaj software, which is based on the algorithms developed by Talwani et al. (1959), Talwani and Heirtzler (1964) and Won and Bevis (1987), that uses the residual Bouguer anomaly. During the process, the user defines the location and depth of the different existing bodies and the degree of reliability of the model is analyzed from the comparison between the observed and calculated anomalies.

The models were developed based on 2D and 3D Euler deconvolution and previous geological surface data. The study area has significant structural control, represented by structures mapped by Gomes et al. (2000), in Folha Jaguaribe SW (scale 1:500000), and Virgens Neto (2017), in Folha Fronteiras (scale 1:100000). These structures are especially represented by dextral transcurrent shear zones and faults that originated with the Brasiliano orogeny event. Several of these structures, except for the Tatajuba and Limoeiro shear zone, do not have a defined nomenclature. For the lithological data, the units described by Medeiros and Paula (2019), obtained from a semi-detail 1:25000 scale mapping, were used as a basis.

Overall, the gravity models were divided into five blocks, namely:

- i) Lower basement comprising high-grade metamorphic rocks (São Nicolau Complex);
- ii) Upper basement composed of metasedimentary sequences, which present high compositional variation (Orós Group);
- iii) Immature clastic sequence from the Catolé-São Julião Basin;

- iv) Magmatic manifestations of bimodal composition, represented by the Mandacaru Granite, of Neoproterozoic age, and basic dykes; and
- v) Sedimentary sequence of the Parnaíba Basin (Jaicós Formation, Serra Grande Group).

The densities used in the modeling of the three sections involving the shallower crustal levels were defined based on the literature for the main lithostratigraphic units existing in the area (Telford et al., 1990), as well as on works executed in nearby areas and/or correlated (**Table 1**). Oliveira et al. (2018) modeled the Jaguaretama Complex with values between 2780 and 2800 kg/m³. Osako et al. (2011) used the value of 2700 kg/m³ for rocks from the same unit. Cavalcante (1999) considered densities between 2700 and 2720 kg/m³ for gneiss-migmatite complexes with a high rate of leucocratic mobilization, and 2780 to 2810 kg/m³ for gneiss complexes with the presence of amphibolitic lenses. In this work, the average between 2720 and 2770 kg/m³ was adopted for the lithotypes interpreted as belonging to the São Nicolau Complex.

For the metasedimentary sequences of the Orós Group, Oliveira et al. (2018) adopted the range from 2600 to 2700 kg/m³, similar to the one adopted in the study area (2650 to 2730 kg/m³). It is worth mentioning that in the area the occurrence of rhyolites associated with such sequences is described, presenting values in the order of 2350 to 2700 kg/m³ (Telford et al., 1990).

Table 1 - Density values used for 2D gravity modeling. The values were chosen based on the bibliography.

Geological Unit	Minimum density (kg/m ³)	Maximum density (kg/m ³)
São Nicolau Complex	2720	2770
Oros Group	2650	2730
Catolé-São Julião Basin	2530	2800
Mandacaru Granite	2650	2740
Serra Grande Group	2480	2480

Santos Filho et al. (2021) used the value of 2540 kg/m³ for the Rio Jucá Group, belonging to the Cococi Basin, which is correlated to Catolé-São Julião. Pedrosa Junior et al. (2017), based on density tests carried out on samples, used values between 2520 and 2580 kg/m³ to model sandstones and polymictic breccia of the Jaibaras Basin, also from Eopaleozoic age. In this work, the modeling of the sedimentary unit of the Catolé-São Julião Basin was conducted with a value of 2530

kg/m³. Pedrosa Junior et al. (2015, 2017) also used the values of 2850 and 2900 kg/m³ to the Parapuí Formation (Jaibaras Basin) basic rocks. For this work, the value of 2800 kg/m³ was adopted.

Pedrosa Junior et al. (2017) adopted densities in the order of 2600 kg/m³ for the Meruoca and Mucambo Granites, existing nearby the Jaibaras Basin, while Santos Filho et al. (2021) used values in the order of 2650 kg/m³ for granitic rocks close to the Cococi Basin. In this work, values between 2650 and 2740 kg/m³ were adopted for the Mandacaru Granite, because it presents great faciological variations (Parente et al., 1986). Telford et al. (1990) consider for granites the range from 2500 to 2810 kg/m³, corroborating the adopted values.

For the sedimentary package of the Serra Grande Group, a density of 2480 kg/m³ was adopted, similar to the values used for the same unit by Oliveira (2016) and Santos Filho et al. (2021), which were 2400 and 2500 kg/m³, respectively. Castro et al. (2014) performed modeling considering the general value of 2450 kg/m³ for the sedimentary sequences of the Parnaíba Basin, confirming the other studies.

4 RESULTS AND DISCUSSION

4.1 Magnetic-Structural Configuration

The analysis of the magnetic signatures obtained through the different magnetic anomalies maps was fundamental for the characterization of the structural framework of the Catolé-São Julião Basin and the adjacent basement. The magnetic anomaly map exhibits a gradient ranging from -385.67 to 263.27 nT, as well as a main trend in the NE-SW direction (**Figure 4a**), while the reduced to the pole has values between -210.34 to 613.18 nT. Despite being located in regions of low magnetic latitudes, the pole reduction filter showed a good result, however, it was noted the presence of some instabilities, such as polarity inversion and asymmetrical anomalies (**Figure 4b**). Therefore, based on the ASA magnetic products, in particular, TAHG, the extraction of magnetic linear features that can be associated with faults, geological contacts, and dykes was conducted (**Figures 4c and 4d**). One hundred and sixty-two lineaments were extracted, and domains were delineated (**Figures 4e and 4f**), which highlights a main trend in the NE/E direction, in the order of N72°E (**Figure 4g**).

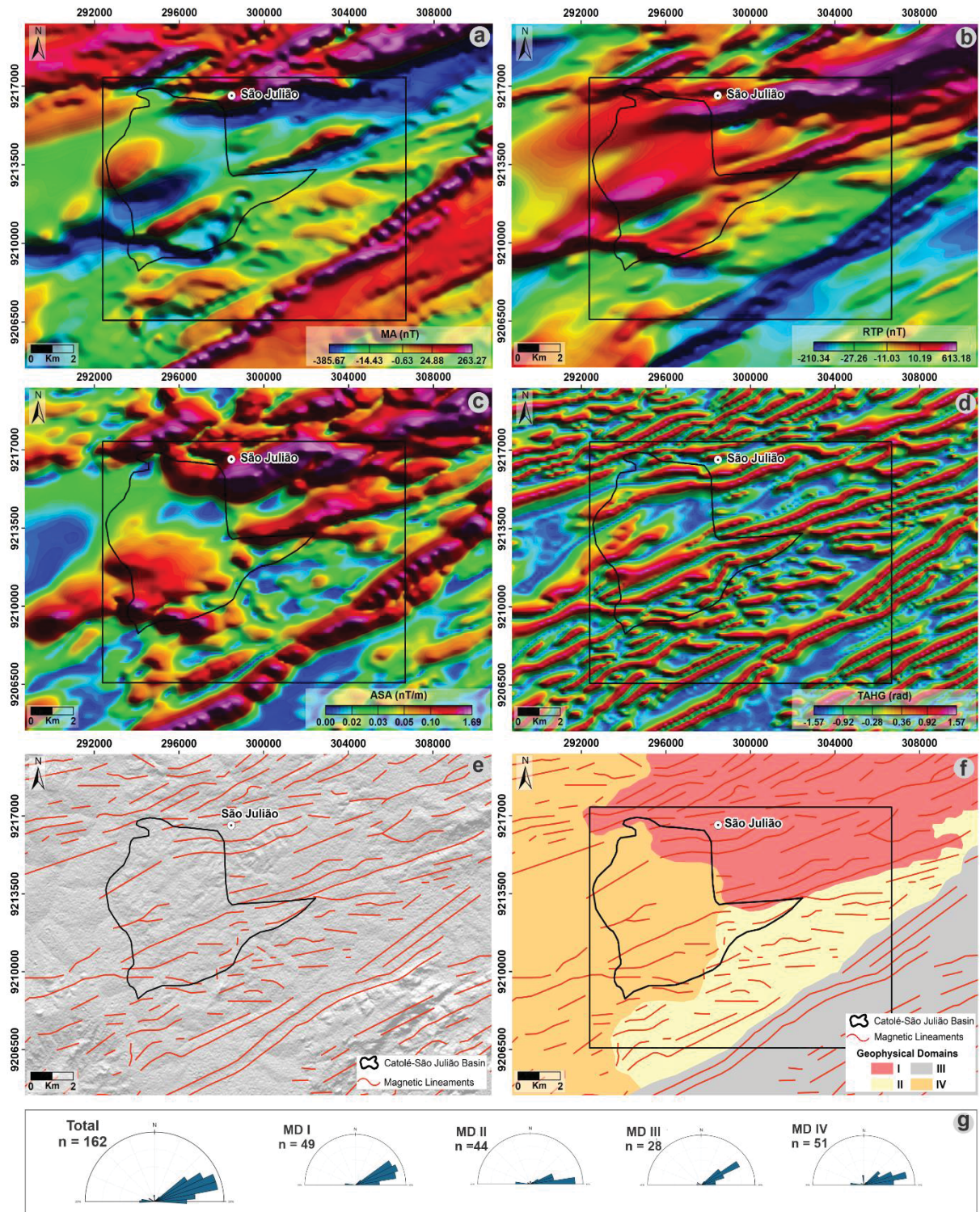


Figure 4 - Aeromagnetic products and interpretations. (a) Magnetic anomaly map, (b) Reduction to the Pole, (c) Analytic Signal Amplitude - RTP, (d) Tilt Angle of the Total Horizontal Gradient - RTP, (e) Magnetic Lineament interpretation, (f) Magnetic Domain interpretation, and (g) Rose diagrams calculated for the magnetic lineaments, general and by domain. The black square polygon refers to the area with geological information presented in Fig. 1c.

4.1.1 Magnetic Domains and Lineaments

Based on the magnetic distribution of the region and reflected by the observed anomalies generated by applying the ASA, and the pattern of the magnetic lineaments

interpreted by TAHG, considering density, preferential direction, and average length, the study area was divided into four magnetic domains (**Figure 4f**).

The Magnetic Domain I (MDI) is located in the N/NE portion of the area and is characterized by the predominance of high amplitude values of the analytical signal (~ 0.10 to 1.64 nT/m). Here, the lineaments present a main direction of $N68^\circ E$, as well as high density and medium length (predominantly extensions between 1 and 7 km). The boundary of this magnetic domain is similar to that defined by the rocks of the Orós Group, following the trend mapped by the quartzite and marble lens (**Figure 1c**). The Euler's solutions enhance the NE-SW pattern, and show an intense correlation with the traced lineaments, highlighting the predominance of shallow to intermediate magnetic sources (maximum of 500 m), with the presence of restricted deep sources (maximum near 1000 m) (**Figure 5a**). A lineament of major extension located near the edge of the domain is noticeable, it enters the Catolé-São Julião basin (**Figure 3f**) with a good correlation with structures described by Gomes et al. (2000) and Virgens Neto (2017) (**Figure 5b**) as well as with the Euler solutions.

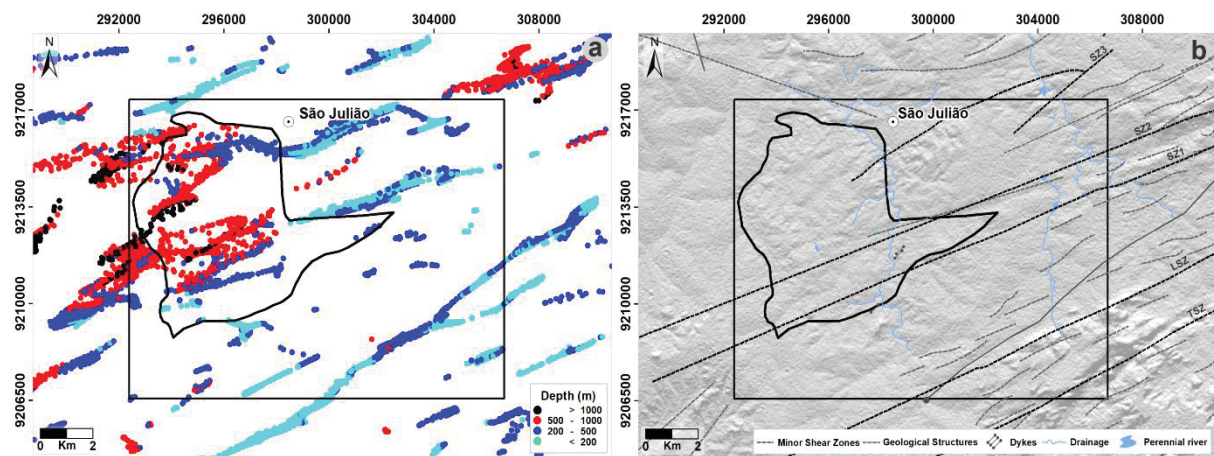


Figure 5 - Correlation between 3D Euler solutions and geological data. (a) Euler solutions with estimated depths, and (b) Compilation of previous geological structures (Gomes et al., 2000; Virgens Neto, 2017). The black square polygon refers to the area with geological information presented in Fig. 1c.

The Magnetic Domain II (MDII) is located in the central/west sector of the area, showing the predominance of low to intermediate magnetic values (maximum around 0.50 nT/m) and the absence of significant variations (**Figure 4f**). The lineaments indicate a more homogeneous geological configuration, prevailing discontinuities with smaller extension (less than 2 km) and oriented approximated towards $N80^\circ E$. Euler solutions (**Figure 5a**) are sparse and exhibit a shallow/intermediate pattern (maximum 500 m). This portion corresponds in particular to the Mandacaru Granite and includes

a small part of the Catolé-São Julião basin and the rocks of the São Nicolau Complex (**Figure 1c**).

The Magnetic Domain III (MDIII) is located in the southeastern portion of the area (**Figure 4f**) and reveals a very heterogeneous character, with low to high amplitude values of the analytical signal (**Figure 4c**). The lineaments are oriented in the N55°E direction, exhibiting lengths (greater than 2 km), low density, and depth (mostly in the order of 200 m), the latter highlighted by Euler solutions (**Figure 5a**). This domain encompasses the gneiss of the São Nicolau Complex, which are characterized by low values ($< \sim 0.080$ nT/m). It is noteworthy that the magnetic lineaments located near the northwest edge of the domain, highlighted by TAHG, Euler solutions, as well as in ASA, have high values (>0.20 nT/m) and correspond to a mafic dyke (diabase) and the Limoeiro dextral shear zone, described by Gomes et al. (2000) and Virgens Neto (2017).

Magnetic Domain IV (MDIV) occurs in the western portion of the study area (**Figure 4f**) and shows a heterogeneous pattern, with a predominance of low values ($< \sim 0.040$ nT/m). Here, there are magnetic lineaments of different extensions (0.01 to 7.22 km), with the main direction to N70°E, as well as the predominance of solutions with higher depths (maximum of 1697 m). High magnetic values associated with long lineaments are observed and detected by Euler solutions and by TAHG. In this domain, there are the rocks of the Serra Grande Group (Parnaíba Basin), the sedimentary units of the Catolé-São Julião basin, and a small portion of the Mandacaru Granite. Note that the highest values are found near the west-south contact of the basin with its boundary. Medeiros and Paula (2019) mapped hydrothermal alterations and copper mineralization (carbonates and sulfides) irregularly distributed along the edge of the Mandacaru Granite (contact with the Catolé-São Julião basin). Thereby, magnetic minerals can cause high values of magnetization of the lineament from the percolation of hydrothermal fluids, along with the mafic dykes.

Furthermore, in the central portion of the Catolé-São Julião basin, Euler solutions associated with the magnetic lineaments are observed (**Figure 5a**), which may indicate an extension of the already mapped structures in the adjacent basement (**Figure 5b**). There is a high density of Euler solutions on the NW/W edge of the Catolé-São Julião basin that are characterized by high depths (500 to 1697 m). The deepest solutions (above 1000 m) are aligned with the NE-SW trend, in the form of structures that go out of the Parnaíba Basin heading toward the Catolé-São Julião Basin.

When analyzing the rose diagrams obtained for the different magnetic domains a uniform behavior is observed, with the main direction NE-SW (**Figure 4g**). These results are supported by the foliation and bedding measurements collected *in situ* from the Catolé-São Julião Basin basement rocks by Medeiros and Paula (2019). According to Gomes and Vasconcelos (2000), the Brasiliano event affected the study area, where almost all the shear zones were developed or reactivated in this period, obliterating most of the previous structures. Thus, these authors infer that the oldest structures present an E-W direction or sinuous trace, while the younger ones occur in the NE-SW direction.

4.1.2 Structural pattern from the Digital Elevation Model (DEM)

From the DEM image, 922 features of the morphostructural mapping were extracted, **Figure 6a** shows the features fully distributed in the study area. The main trends were established based on the rose diagrams (**Figure 6b**) where there is a well-marked NE-SW pattern, with an average direction of N45°E.

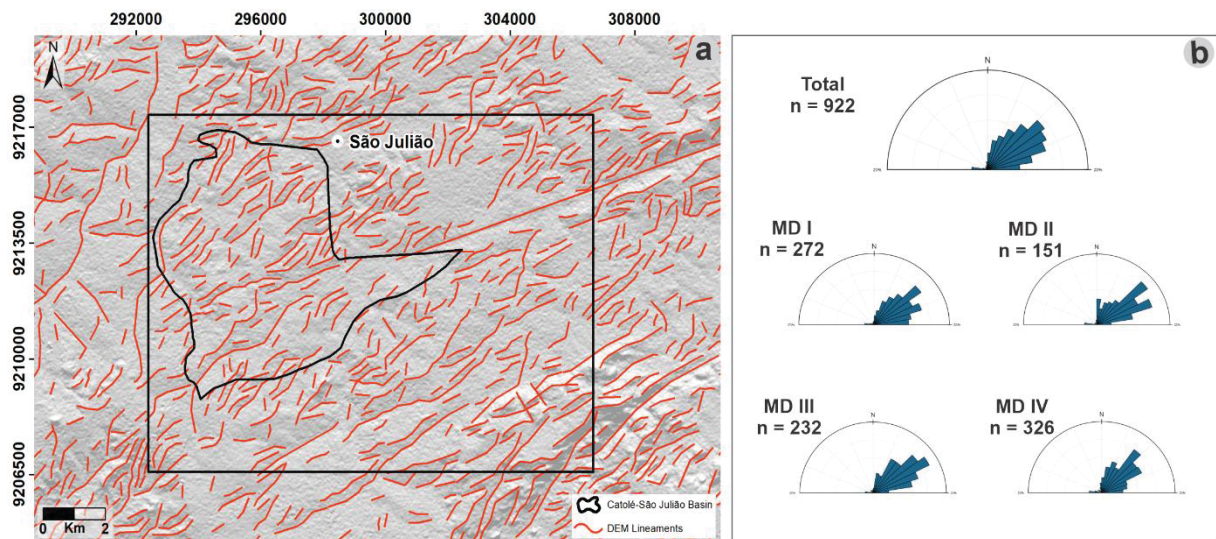


Figure 6 - Morphostructural lineaments (a) Extracted from DEM-Alos Palsar; and (b) Rose diagrams calculated for the morphostructural lineaments, total and by previously interpreted magnetic domains (MD). The black square polygon refers to the area with geological information presented in Fig.1c.

Linear features were divided according to the previously interpreted Magnetic Domain, called MDI to MDIV (**Figure 4f**). The MDI to MDIII compartments reflect the crystalline rocks associated, respectively, with the Orós Group, Mandacaru Granite, and São Nicolau Complex, displaying a high density. MDIV, on the other hand, corresponds to the sedimentary units of the Parnaíba and Catolé-São Julião Basins. In this last domain, there is a reduction in the density of lineaments in the portion

corresponding to the Parnaíba Basin, here; the structures refer to the negative features.

4.2 Depth of the sources

4.2.1 Radially Average Power Spectrum

To analyze the characteristics of magnetic sources at different crustal depths, the radially averaged power spectrum was used (**Figure 7**). It was possible to adjust three lines that made it viable to decompose the MA into products with different depth intervals (maximum and minimum cut values). The following features were defined: i) shallow, with wavelengths between 1.11 and 2.56 km and depths between 364 and 602 m; ii) intermediate, with wavelengths between 2.56 and 6.25 km and depths between 602 e 1520 m; and iii) deep, with a wavelength of more than 6.25 km and a depth greater than 1520 m. It is noteworthy that the maximum depth interpreted by the 3D Euler solutions was around 1697 meters, which corroborates the results obtained (**Figure 5a**).

For the products from the decomposed MA, there was a low mean (0.060, 0.579, and -0.642 nT for shallow, intermediate and deep sources, respectively) and standard deviation (23.65, 30.21 and 33.50 nT for shallow sources, intermediate and deep). There is an increase in the standard deviation with depth, indicating a possible increase in the distribution of magnetic data, however, the low averages suggest few regions with high magnetization, as well as a possible compensation between the dipoles, since amplitudes occur in the same order (**Figure 7**).

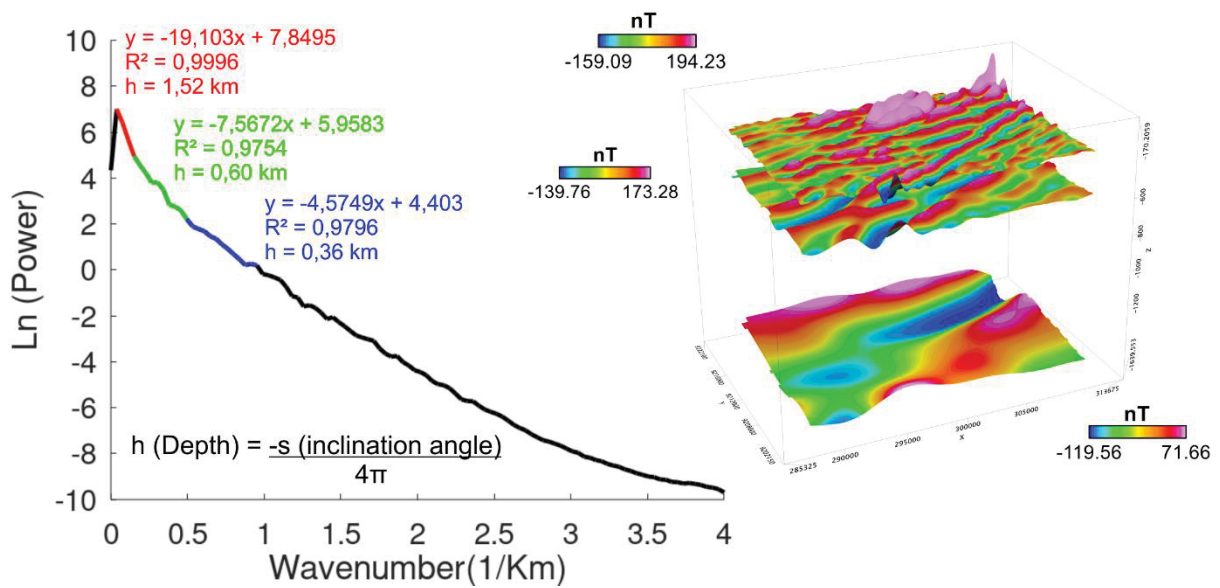


Figure 7 - Radially Average Power Spectrum of the magnetic anomaly. Each segment marked with a color represents a distinct depth from the top of the magnetic causative sources, highlighted by the MA product. The equations in different colors refer to the linear regressions used for each line, where R^2 is the coefficient of determination. The closer to one, the better the linear regression.

When observing the ASA products that were originate from the decomposition, there is an attenuation of intensity (maximum range) with depth, revealing a high magnetization of the shallow/intermediate rocks for the area (**Figures 8a and 8b**). In general, shallow depths correlate well with existing geological data, as does the ASA product. In the deep ASA data, it is verified that the region of the Catolé-São Julião and Parnaíba basins are represented by magnetic lows (**Figure 8c**).

For a better visualization of the distribution of magnetic anomalies in-depth, a ternary diagram was elaborated with the decomposed products of the ASA (**Figure 8d**). The red color indicates regions where the sources are shallow, the green color refers to the intermediate ones, and the blue to the deeper ones. The white color is associated with the portions that present high magnetic values in the three levels, while the black color refers to the low magnetic values. The results show that the most magnetized regions correspond to the rocks of the Orós Group, presenting high values from the shallowest to the deepest portions, while the basin region encompasses shallow to intermediate sources. In the Mandacaru Granite, the predominance of shallow sources is observed, while those associated with the Serra Grande Group rocks (Parnaíba Basin) tend to be deep. Close to the northwest edge of the Catolé-São Julião basin, deep magnetic features can be observed with a linear character. It

is important to note that this coincides with the presence of the deepest Euler solutions in this region (**Figure 5a**).

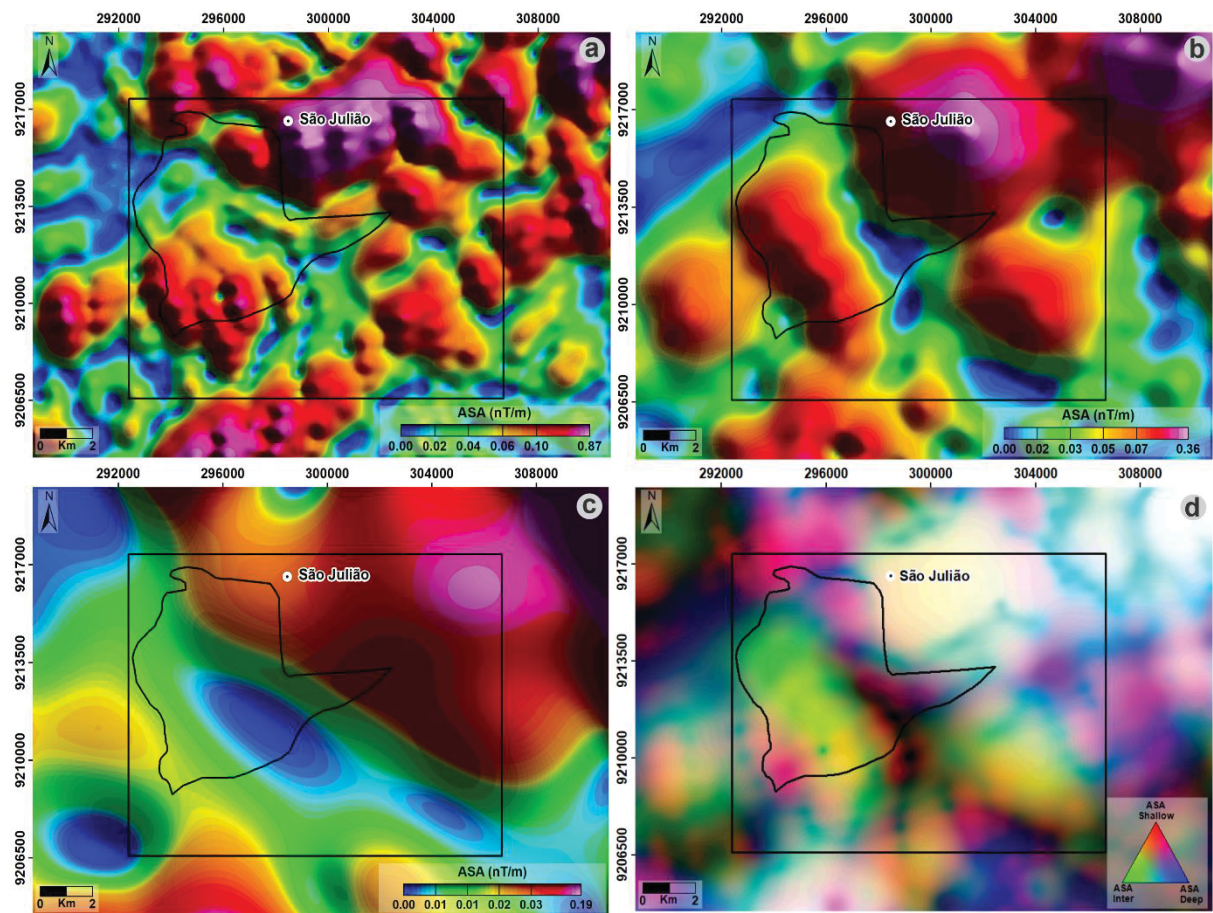


Figure 8 - Analytic Signal Amplitude maps of the data in Figure 7. (a) Shallow, (b) Intermediate, (c) Deep, and (d) Ternary composition of the data in (a), (b) and (c). The black square polygon refers to the area with geological information presented in Fig.1c.

4.2.2 2D Euler deconvolution

From the 2D Euler Deconvolution applied to the ASA and the residual Bouguer anomalies, it was possible to identify different subsurface structures, which are quite consistent with surface geological information where the deepest ones are associated with the Catolé-São Julião Basin (**Figure 9**). The integration of such information was fundamental for a more accurate definition of the limits of the geological units.

In T1, the solutions reach depths of up to 2.5 km, however, the largest amount is located at shallow levels, in the order of 0.6 km (**Figure 9a**). The highest density of clouds is associated with the Catolé-São Julião Basin, and its contact regions with the other units. The deepest (> 1.5 km) are located close to the contact between the Catolé-São Julião and Parnaíba Basins (Serra Grande Group), which may indicate discontinuities (fractures) in the basement that influenced the development of the

Catolé-São Julião Basin. In 3D Euler deconvolution, a high density of Euler solutions (**Figure 5a**) marks this portion. Gomes et al. (2000) mapped several unnamed dextral transcurrent shear zones in the study region, two of which intersect the profile in question near 7.5 and 15.6 km positions. In both cases, there is a bigger density of solutions at more superficial depths, reaching 1 km.

In T2, shallower solutions are observed, with depths of less than 1.5 km, with a higher density of up to 0.5 km (**Figure 9b**). Based on data from Gomes et al. (2000) and Virgens Neto (2017), the profile in question is cut by several dextral transcurrent shear zones and fractures. Such features are identified in 2D Euler solutions, presenting a very striking character at shallower depths and subvertical dipping. Inside the basin, there is a high clouds solution density, which may represent discontinuities. Such regions are important from an exploratory point of view because fluids rich in elements tend to ascend to more crustal portions through conduits (structures) and, due to changes in physical-chemical conditions, many metals end up precipitating, making these places favorable for the occurrence of ore such as the reported by Medeiros and Paula (2019). Around the 5.8 km position, some solutions exceed 1 km associated with a well-defined gravity high. In general, the solutions present inflections at low depths. The presence of solutions that coincide with dikes mapped on the surface stands out.

T3 has a similar character to the previous ones, with solutions at variable depths, generally less than 1.5 km that are denser and deeper in the Catolé-São Julião Basin, reaching up to 1 km (**Figure 9c**). The other solutions may indicate contact limits between different lithotypes and the extension of shallow structures. Notably, the contact between the Catolé-São Julião and Parnaíba basins is well-defined by the magnetic and gravity solutions.

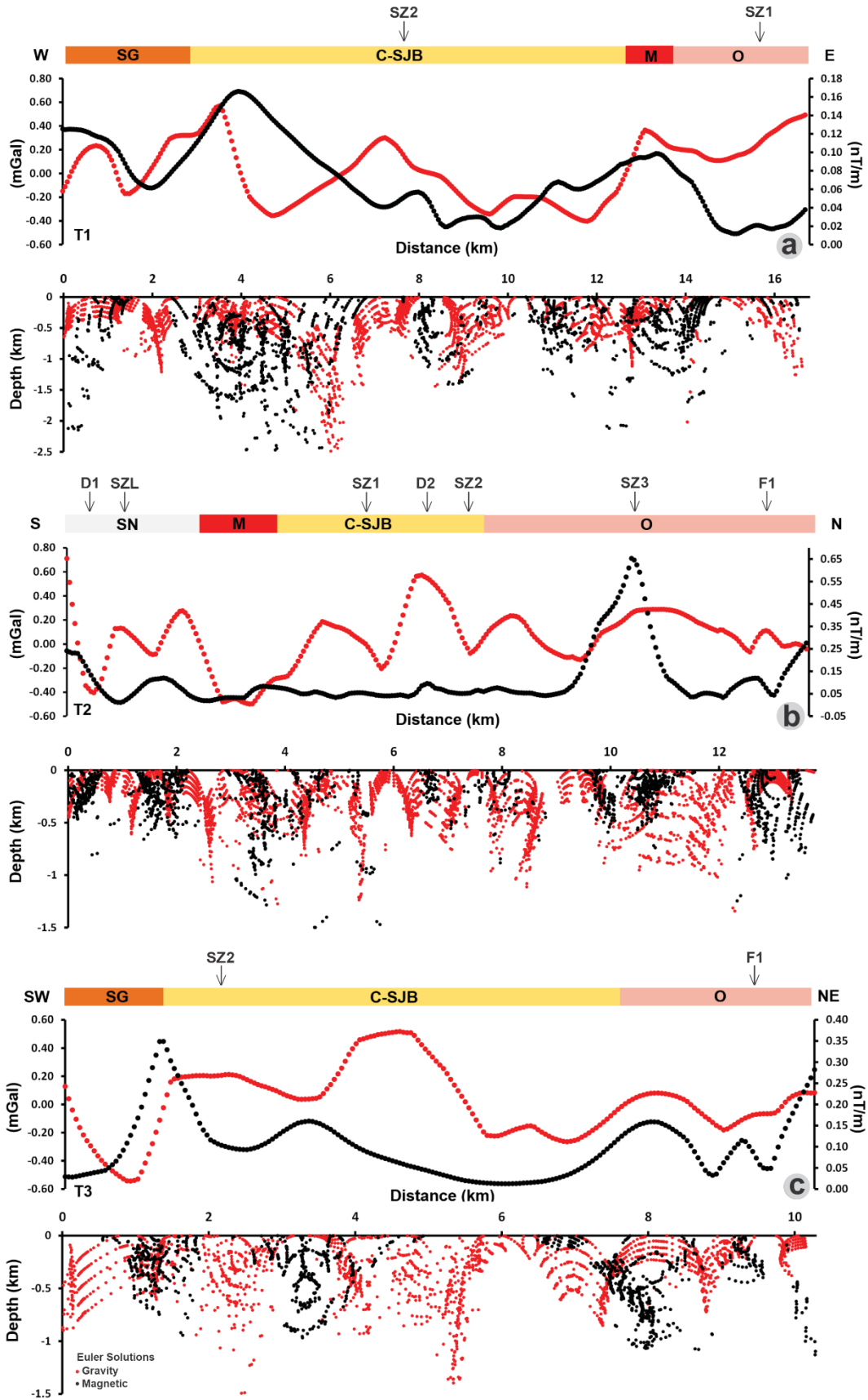


Figure 9 - 2D Euler solutions obtained through Analytical Signal Amplitude (black) and residual gravity data (red). (a) Transect T1, (b) Transect T2, and (c) Transect T3. The information at the top refers to the geological interpretations executed, along with information from existing structures. SG – Serra

Grande, C-SJB – Catolé-São Julião Basin, M – Mandacaru, O – Orós, SN – São Nicolau, SZ – Shear Zone, D – Dyke, F – Fault.

4.3 2D Gravity Modeling

The results of gravity modeling, complemented with the subsidy Euler solutions and surface geological information, are shown in **Figure 10**. For the models construction, there was no contribution from wells registered in the Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) database, under the responsibility of the Serviço Geológico do Brasil – CPRM since the region lacks wells with geological information. In addition, there is no mention in the scientific literature of the possible depths of the Catolé-São Julião Basin basement. Therefore, the information obtained here is a reflection of the densities of the rocks from the region, compiled out of different research and the Euler deconvolution. Note that the observed and calculated anomalies showed a satisfactory adjustment and these are proven through the RMS error with values of 0.010, 0.021, and 0.012, for transects T1, T2, and T3, respectively.

The residual anomaly of T1, characterized by alternating highs and lows, varying between -0.404 and 0.031 mGal possibly related to changes in lithotypes and variations in the thickness of the sedimentary package (**Figure 10a**). In the central portion of the profile, there is a well-defined major gravity low signature, correlated with the Catolé-São Julião Basin. A relative gravity high is perceptible, possibly related to a basement high, as well as the presence of dykes. In the present model, the presence of mafic dykes was included, located near positions 7.5 and 15.6 km of the profile. The first coincides with an anomalous region evidenced in the ASA (**Figure 4c**) and with the deepest 3D Euler solutions in the area (**Figure 5a**). The second is located near hydrothermally altered rocks and with the presence of sulfides (Medeiros and Paula, 2019), making it possible to infer that it may have been a source of metal-rich fluids, responsible for the precipitation of sulfides reported in the bibliography (Parente, 1984; Medeiros and Paula, 2019). In addition, as previously mentioned, Gomes et al. (2000) highlight the presence of a dextral shear zone near the 7.5 km position of the profile, which coincides with this interpreted feature. A high density of 2D Euler solutions (**Figure 9a**) enhances both portions.

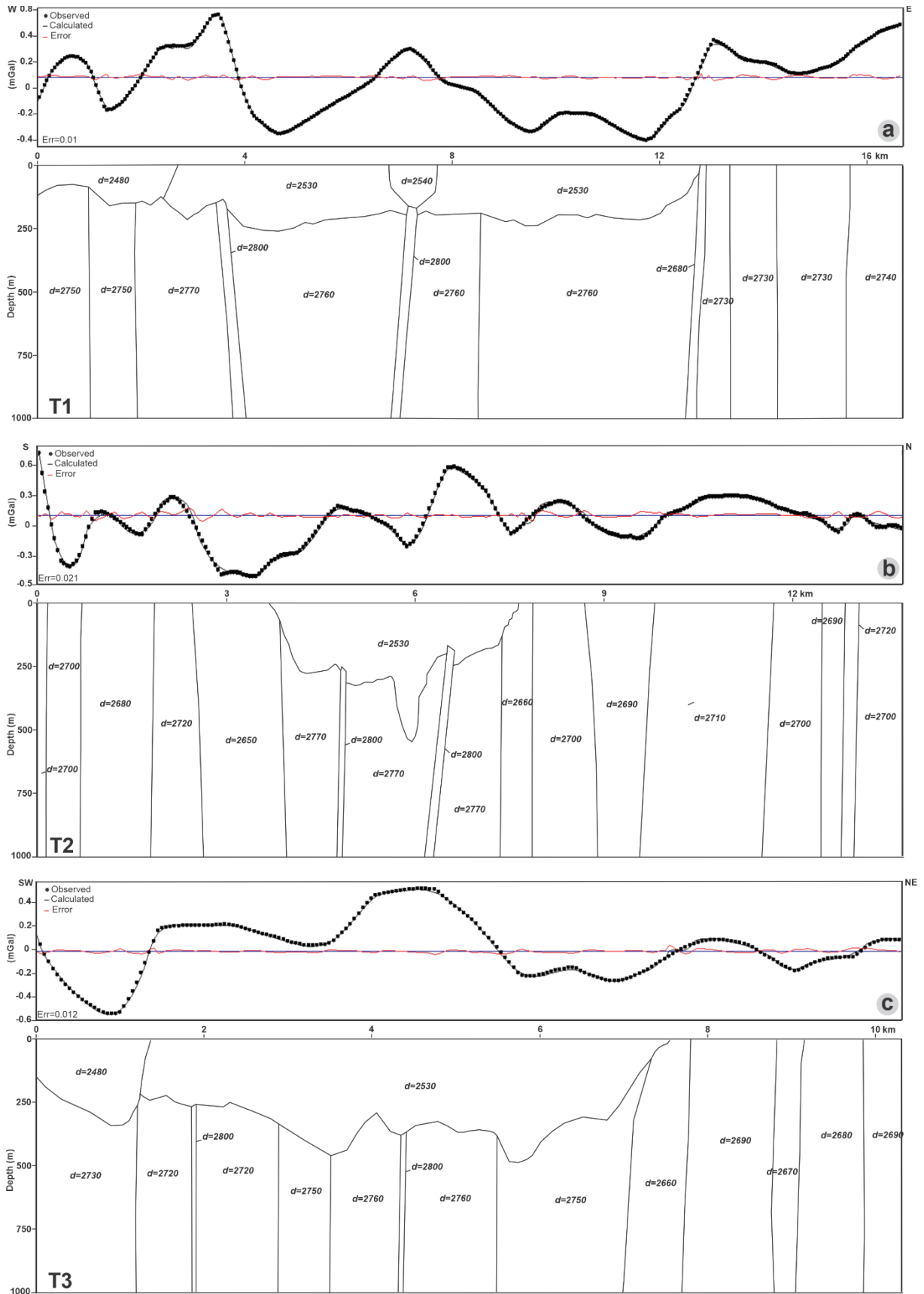


Figure 10 - 2D gravity modeling. (a) Transects T1, (b) T2, and (c) T3. See the location of the profiles in Fig 3b.

The initial segment of the profile is marked by gravity lows, representing the sediments of the Serra Grande Group (Jaicós Formation), belonging to the Parnaíba Basin. Here, there is a variation between gravity highs and lows, which may be related to the sedimentary thinning and thickening of the Group in question, respectively. Such blocks overly on rocks with moderately high density, which can be associated with the gneiss of the São Nicolau Complex. The gravity high in the final portion of the profile correspond to the Mandacaru Granite and the lithotypes of the Orós Group, respectively. It is important to mention that in the same unit small density variations were observed between its blocks, which can be explained by the great textural variation and mineralogical composition of the lithotypes in the study area. Mandacaru granite has five distinct petrographic facies (Parente and Fuck, 1987), while the Orós Group, according to data from Medeiros and Paula (2019), is composed of marbles, quartzites, siltstones, and rhyolites. In addition, both lithologies present hydrothermal alterations, which may or may not present associated disseminated sulfides.

The residual anomaly of T2 presents minimums and maximums of -0.498 and 0.711 mGal, respectively (**Figure 10b**). Discrete intercalations can be noted that may indicate small compositional variations between the different lithotypes. Subsequently, a gravity low can be associated with the Mandacaru granite. In contact with it, between 3.7 and 7.7 km, the block represented by the sedimentary layer of the Catolé-São Julião Basin occurs with variations caused by differences in the subsurface thickness. In this portion, two discrete gravity highs are also observed, which can be related to the presence of basic dikes mapped close to the transect, as reported by Medeiros and Paula (2019). In addition, the parts are near two dextral transcurrent shear zones. Among such discontinuities, the sedimentary package reached thicknesses of 500 meters, which can be associated with a graben. The rest of the profile can be represented by the lithotypes of the Orós Group.

Varying between -0.543 and 0.517 mGal, the model defined from the T3 starts with an expressive gravity low for the profile background, which extends to the vicinity of the 1.4 km position, relating to the sedimentary package of the Serra Grande Group (**Figure 10c**). Next, there is the Catolé-São Julião Basin, presenting relative highs and lows, associated with the variation of sediment thickness and compositional variation of the basement. There is also the presence of two punctual mafic dykes. The last section of the profile is marked by small lateral variations, with the presence of discrete

gravity lows, which may be related to the different lithologies mapped in the area belonging to the Orós Group.

4.4 Geological models

From the integration of gravity models, aeromagnetic data, geological information present in the literature, and 2D and 3D Euler solutions, geological models were prepared for each section (**Figure 11**). Such models help to understand the internal geometry of the Catolé-São Julião basin and basement heterogeneity, generating new information that can help in further studies.

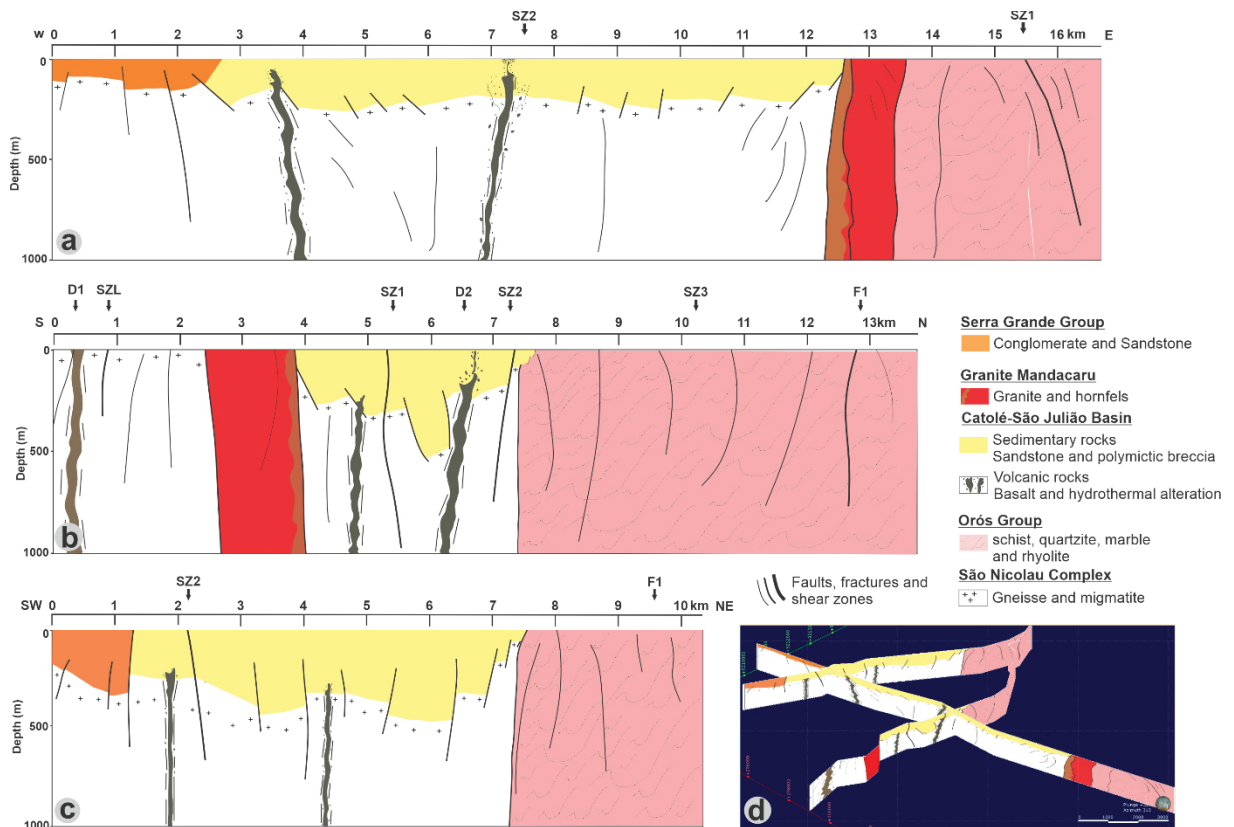


Figure 11 - Geological models obtained from the interpretation of gravity and magnetic data, and geological information. (a) T1, (b) T2, (c) T3, and (d) Perspective view of the three transects. SZ - Shear Zone, D - Dyke, F - Fault.

In general, the Catolé-São Julião basin has a thickness average of about ~250 m and a maximum in the order of 550 m. In these portions, the presence of graben-type structures is noted, as the one along T2 near the 6 km position (Figure 11b), limited by two indiscriminate shear zones and mapped by Gomes et al. (2000), and well-marked by Euler's solutions. Added to this is the presence of shallower

discontinuities, probably related to faults or intrabasinal structures that may reflect reactivations of the Brasiliano shear zones.

The denser rocks in the basement were modeled and interpreted as belonging to the São Nicolau Complex and the Orós Group. They present a very heterogeneous character indicating lithological variations, which is characteristic of these units. In addition, they are marked by important structural discontinuities, which may have a strong relationship with the evolution of the basin. Volcanic dykes were also incorporated into the conceptual models, which may indicate reactivations in the local tectonic regime. In addition, copper mineralization is likely associated with such volcanic pulses.

5. CONCLUSION

The use of potential methods (gravity and magnetic) allowed the recognition of the structural pattern of the study area, and the definition of the internal architecture of the Cambro-Ordovician Catolé-São Julião Basin. The aeromagnetic maps highlighted lineaments with a NE-SW main direction through the entire study area, which coincides with the trends of the previously mapped shear zones. In addition, the interpretations made from the DEM corroborate the results obtained.

Through the maps of the Analytical Signal Amplitude and the Tilt Angle of the Total Horizontal Gradient, it was possible to define four distinct magnetic domains. In general, they display a strong correlation with the geological data, with occasional variations.

The 2D Euler deconvolution of the gravity and magnetic profiles provided the identification of discontinuities with maximum depths in the order of 2.5 km. These lineaments presented a good association with the shear zones already mapped and are well highlighted in the subsurface, with vertical to subvertical aspects, such as the LSZ with a depth in the order of 300 m. The other Brasiliano shear zones, such as SZ1 and SZ2, demarcate a portion of the Catolé-São Julião basin where possible graben-type structures occur.

Through the 2D gravity modeling in the three profiles, it is verified that the thicknesses calculated for the Catolé-São Julião basin is quite compatible. The entire model has a heterogeneous character, with the presence of several blocks, generated by rocks with slight lateral density variations. Volcanic dykes were interpreted, some buried under the sedimentary layers and others outcropping, the latter based on

obtained data from geological mapping (Medeiros and Paula, 2019). In some portions, it is noted that these punctual anomalous zones coincide with regions with bigger gravity.

The results provided important information that can help in future research, such as those aiming to identify the metallogenetic potential of the Catolé-São Julião Basin since the occurrence of hydrothermal alterations and the occurrence of mapped sulfides is already known. Structural lineaments associated with igneous rocks may correspond to significant targets with the presence of mineralization. Rich fluids tend to ascend through conduits (structures) and, due to changes in physicochemical conditions, many metals end up precipitating and concentrating in fractured zones. Several authors associate such occurrences with similar occurrences in IOCG deposits, hence, it is recommended to carry out detailed studies for better recognition of target areas.

ACKNOWLEDGMENTS

This article is part of the first author's master thesis, which received financial support through a scholarship from the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES/DS (Process n.88887.502757/2020-00). The authors are thankful to the Serviço Geológico do Brasil (CPRM) for supplying the aeromagnetic data. We are also grateful to the Laboratório de Geofísica Aplicada (LGA) of Universidade Federal do Pampa (Unipampa) and the Laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto (LGPSR) of Universidade Federal do Ceará for lending, respectively, the Scintrex CG-5 digital gravimeter and the Trimble R10 DGPS for gravity surveying. Thanks to the MSc. Fernando Santos Filho (LGPSR) for comments regarding the initial processing of the gravity data.

6. REFERENCES

- Allmendinger R.W., Cardozo N.C., Fisher D. 2013. *Structural Geology Algorithms: Vectors & Tensors*. Cambridge, Cambridge University Press, 289 p.
- Almeida F.F.M. 1969. Diferenciação Tectônica da Plataforma Brasileira. In: 23^o Congresso Brasileiro de Geologia. Salvador, *Anais*, p. 4-5.

- Almeida F.F.M., Hasui Y., Brito Neves B.B., Fuck R.A. 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews*, **17**:1-29. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(81\)90003-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(81)90003-9)
- Almeida R.P., Janikian L., Fragoso-Cesar A.R.S., Fambrini G.L. 2010. The ediacaran to cambrian rift system of southeastern south America: tectonic implications. *Brazilian Journal of Geology*, **118**:145-161. <https://doi.org/10.1086/649817>
- Arthaud M.H., Caby R., Fuck R.A., Dantas E.L., Parente C.V. 2008. Geology of the Northern Borborema Province, NE Brazil and its correlation with Nigeria, NW Africa. In: Pankhurst R.J., Trouw R.A.J., Brito Neves B.B., de Wit M.J. (eds.). *West Gondwana: Pre-Cenozoic Correlations across the South Atlantic Region*. Geological Society of London Special Publications, 294, London, The Geological Society, p. 49-67.
- ASF DAAC. 2015. Alaska Satellite Facility Distributed Active Archive Center. ALOS PALSAR_Radiometric_Terrain_Corrected_low_res Available at: <https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/about-palsar>. Accessed on: Feb 15, 2021. <https://doi.org/10.5067/JBYK3J6HFSVF>
- Baranov V. 1957. A new method for interpretation of aeromagnetic maps: pseudo-gravimetric anomalies. *Geophysics*, **22**:359-383. <https://doi.org/10.1190/1.1438369>
- Baranov V. and Naudy H. 1964. Numerical Calculation of the Formula of Reduction to the Magnetic Pole. *Geophysics*, **29**:67-79. <https://doi.org/10.1190/1.1439334>
- Barbosa V.C.F. and Silva J.B.C. 2005. Deconvolução de Euler: passado, presente e futuro – um tutorial. *Revista Brasileira de Geofísica*, **23**:243-250. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2005000300004>
- Brito Neves B.B. 1998. The Cambro-Ordovician of the Borborema Province. *Boletim IG USP Série Científica*, **29**:175-193. <http://dx.doi.org/10.11606/issn.2316-8986.v29i0p175-193>
- Brito Neves B.B. and Cordani U.G. 1991. Tectonic evolution of South America during the late proterozoic. *Precambrian Research*, **53**: 23-40. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(91\)90004-T](https://doi.org/10.1016/0301-9268(91)90004-T)
- Brito Neves B.B., Santos E.J., Van Schmus W.R. 2000. The tectonic history of the Borborema Province. In: Cordani U.G., Milani E.J., Thomaz Filho A., Campos D.A. (eds.). *Tectonic Evolution of South America. 31st International Geological Congress*. Rio de Janeiro, p. 151-182.
- Castro D.L. 2011. Gravity and magnetic joint modeling of the Potiguar Rift Basin (NE Brazil): Basement control during Neocomian extension and deformation. *Journal of South American Earth Sciences*, **31**:186-198. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.01.005>

- Castro D.L., Fuck R.A., Phillips J.D., Vidotti R.M., Bezerra F.H.R., Dantas E.L. 2014. Crustal structure beneath the Paleozoic Parnaíba Basin revealed by airborne gravity and magnetic data, Brazil. *Tectonophysics*, **614**:128-145. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2013.12.009>
- Cavalcante J.C. 1999. *Limites e evolução geodinâmica do sistema Jaguaribeano, província Borborema, Nordeste do Brasil*. MS Dissertation, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 192 p.
- Cooper G.R.J. 2002. An improved algorithm for the Euler deconvolution of potential field data. *The Leading Edge*, **21**:1197-1198. <https://doi.org/10.1190/1.1536132>
- CPRM. 2010. Projeto Aerogeofísico Centro-Sudoeste do Ceará: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectométricos. Rio de Janeiro: Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas, 190 p.
- Dantas E.L., Van Schmus W.R., Hackspacher P.C., Fetter A.H., Brito Neves B.B., Cordani U., Nutman A.P., Williams I.S. 2004. The 3.4 e 3.5 Ga São Jose do Campestre massif, NE Brazil: remnants of the oldest crust in South America. *Precambrian Research*, **130**:113-137. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2003.11.002>
- Ferreira F.J., de Souza J., Bongioiolo A.B.S., de Castro L.G. 2013. Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using the tilt angle. *Geophysics*, **78**:33-41. <https://doi.org/10.1190/geo2011-0441.1>
- Ferreira F.J.F., de Souza J., Bongioiolo A.B.S., Castro L.G., Romeiro M.A.T. 2010. Realce do gradiente horizontal total de anomalias magnéticas usando a inclinação do sinal analítico. Parte I – Aplicação a dados sintéticos. In: IV Simpósio Brasileiro de Geofísica. Brasília, *Anais*, 6 p.
- Garcia M.G.M., Parente C.V., Sousa R.R., Albuquerque Júnior, I.F. 2006. Controle estrutural de depósitos tipo IOCG: dados preliminares da Bacia do Jaibaras-CE, Província Borborema. In: 43º Congresso Brasileiro de Geologia. Aracajú, *Anais*, p. 353.
- Geosoft. 2014. *Oasis Montaj how- to Guide. Complete Workflow for Oasis Montaj*. Toronto, Geosoft Incorporated, 260 p.
- Geosoft. 2015. MAGMAP Filtering Guided Learning Path: Defining and Applying Filters and Inverse FFT in MAGMAP. Available at: http://updates.geosoft.com/downloads/files/how-to-guides/Applying_Filters_and_Inverse_FFT_in_MAGMAP.pdf. Accessed on: Sep 12, 2021.
- GM-SYS. 2004. Gravity/magnetic Modeling Software: User's Guide Version 4.9. NGA Inc., 101 p.

- Gomes J.R.C., Vasconcelos A.M. (org.). 2000. *Jaguaribe SW (SB.24-Y)*, Estados do Ceará, Pernambuco e Piauí. Rio de Janeiro, CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 103 p.
- Gomes J.R.C., Vasconcelos A.M., Torres P.F.M. 2000. *Carta Geológica da Folha Jaguaribe SW (SB.24-Y), escala 1:500.000*. Fortaleza, Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - PLGB, Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Minas e Metalurgia, CPRM - Serviço Geológico do Brasil.
- Hasui Y. 2012. Quadro Geral da Evolução Pré-Ordoviciano: A Conexão Brasil-África. In: Hasui Y., Carneiro C.D.R., Almeida F.F.M., Bartorelli A. (org.). *Geologia do Brasil*. São Paulo, Editora Beca, p. 123-130.
- Jacques P.D., Machado R., Oliveira R.G., Ferreira F.J.F., Castro L.G., Nummer A.R. 2014. Correlation of lineaments (magnetic and topographic) and Phanerozoic brittle structures with Precambrian shear zones from the basement of the Paraná Basin, Santa Catarina State, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, **44**:39-54. <https://doi.org/10.5327/Z2317-4889201400010005>
- Maas M.V.R., Oliveira C.G., Pires A.C.B., Moraes R.A.V. 2003. Aplicação da Geofísica aérea na exploração mineral e mapeamento geológico do setor sudoeste do cinturão cuprífero Orós-Jaguaribe. *Revista Brasileira de Geociências*, **33**:279-288. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2003333279288>
- Machado M.A. 2006. *Caracterização descritiva e genética de ocorrências cupro-hematíticas no setor sudoeste do Sistema Orós-Jaguaribe Província Borborema*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 118 p.
- Medeiros J.V.F., Paula R. N. 2019. *Mapeamento geológico da Bacia Catolé-São Julião e suas ocorrências de cobre, Piauí-Brasil*. Bachelor's Dissertation, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 130 p.
- Mendonça J.C.G. and Braga A.P.G. 1987. As faixas Vulcano-sedimentares de Orós e Jaguaribe: um greenstone belt. *Revista Brasileira de Geociências*, **17**:255-241. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1987225241>
- Nabighian M.N. 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, **37**:507-517. <https://doi.org/10.1190/1.1440276>
- Nabighian M.N. 1984. Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: Fundamental relations. *Geophysics*, **49**:780-786. <https://doi.org/10.1190/1.1441706>
- Oliveira K.M.L. 2016. *Integração de dados geofísicos (magnetometria, gravimetria e magnetotélúrico) na borda Nordeste da Bacia do Parnaíba, NW do Ceará, Brasil*. MS Dissertation, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 110 f.

- Oliveira K.M.L., Castro D.L., Castelo Branco R.M.G., Oliveira D.C., Alvite E.N.C., Jucá C.C.A., Castelo Branco J.L. 2018. Architectural framework of the NW border of the onshore Potiguar Basin (NE Brazil): An aeromagnetic and gravity based approach. *Journal of South American Earth Sciences*, **88**:700-714. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.10.002>
- Osako L.S., Castro D.L., Fuck R.A., Castro N.A., Pitombeira J.P.A. 2011. Contribuição de uma seção gravimétrica transversal ao estudo da estruturação litosférica na porção setentrional da Província Borborema, NE do Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*, **29**:309-329. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2011000200008>
- Parente C.V. 1984. *Geologia da Mineralização de Cobre de Mandacaru-PI*. MS Dissertation, Universidade de Brasília, Brasília, 203 p.
- Parente C.V. and Arthaud M. 1995. O Sistema Orós-Jaguaribe no Ceará, NE do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, **25**:197-306. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1995297306>
- Parente C.V. and Fuck R.A. 1987. Geologia da Ocorrência de Cobre de Mandacaru (PI). *Revista Brasileira de Geociências*, **17**:21-32. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.19872132>
- Parente C.V., Filho W.F.S., Almeida A.R. 2004. Bacias do Estágio de Transição do Domínio Setentrional da Província Borborema. In: Mantesso-Neto V., Bartorelli A., Carneiro C.D.R., Brito-Neves B.B. (org.). *Geologia Do Continente Sul Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, São Paulo, Editora Beca, p. 524-536.
- Parente C.V., Fuck R.A., Macambira M.J.B., Provost A. 1986. Características Petroquímicas e Geocronológicas do Granito Mandacaru (PI). *Revista Brasileira de Geociências*, **16**:266-273. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1986266273>
- Pedrosa Jr. N.C., Vidotti R.M., Fuck R.A., Castelo Branco R.M.G., Almeida A.R., Silva N.C.V., Braga L.R.C. 2017. Architecture of the intracontinental Jaibaras Rift, Brazil, based on geophysical data. *Journal of South American Earth Sciences*, **74**:27-40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2016.12.012>
- Pedrosa Jr. N.C., Vidotti R.M., Fuck R.A., Oliveira K.M.L., Castelo Branco R.M.G. 2015. Structural framework of the Jaibaras Rift, Brazil, based on geophysical data. *Journal of South American Earth Sciences*, **58**:318-334. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.07.005>
- Reid A.B., Allsop J.M., Granser H., Millet A.J., Somerton I.W. 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics*, **55**:80-91. <https://doi.org/10.1190/1.1442774>
- Santos Filho F.F.B., Magini C., Chiozza S.G., Castelo Branco R.M.G. 2021. The Architecture of the Eopaleozoic Cococi Basin, northeastern Brasil: 2D

- geological modelling from magnetic and gravimetric data. *Journal of South American Earth Sciences*, **106**:102903. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102903>
- Saraiva C.E.R., Rodrigues T.F. 2018. *Mapeamento geológico e petrografia das ocorrências de cobre da Bacia de Carnaubinha, Plo IX-PI*. Bachelor's Dissertation, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 121 p.
- Sawatzky D.L., Raines G.L., Bonham-Carter G.F., Looney C.G. 2010. Spatial Data Modeller (SDM): ArcMAP 9.3 geoprocessing tools for spatial data modelling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural networks. Available at: <https://www.ige.unicamp.br/sdm/ArcSDM10/source/ReadMe.pdf>. Accessed on: Jun 20, 2022.
- Schobbenhaus C., Brito Neves B.B. 2003. A Geologia do Brasil no Contexto da Plataforma Sul-Americana. In: Bizzi L.A., Schobbenhaus C., Vidotti R.M., Gonçalves J.H. (eds.). *Geologia Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: Texto, Mapas & SIG*. Brasília, CPRM – Serviço Geológico do Brasil, p.5-25.
- Spector A. and Grant F.S. 1970. Statistical methods for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, **35**:293-302. <https://doi.org/10.1190/1.1440092>
- Talwani M., Heirtzler J.R. 1964. Computation of magnetic anomalies caused by two dimensional bodies of arbitrary shape. In: Parks G.A. (ed.). *Computers in the Mineral Industries, Part 1*, 9, California, Stanford University Publications, p. 464-480.
- Talwani M., Worel J.L., Landisman M. 1959. Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone. *Journal of Geophysical Research*, **64**:49-59. <https://doi.org/10.1029/JZ064i001p00049>
- Teixeira A.L. 2000. Análise das bacias da transição Proterozoico-Fanerozoico do Estado de São Paulo e adjacências. PhD Thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo, 201 p.
- Teixeira A.L., Gaucher C., Paim P.S.G., Fonseca M.M., Parente C.V., Silva Filho W.F., Almeida A.R. 2004. Bacias do estágio da transição da Plataforma Sul-Americana. In: Mantesso-Neto V., Bartorelli A., Carneiro C.D.R., Brito-Neves B.B. (org.). *Geologia Do Continente Sul Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, São Paulo, Editora Beca, p. 487-536.
- Telford W.M., Geldart F.E.M., Sheriff R.E. 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge, Cambridge University Press, 790 p.
- Thompson D.T. 1982. EULDPH: A new technique for making computer assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, **47**:31-37. <https://doi.org/10.1190/1.1441278>

- Van Schmus W.R., Brito Neves B.B., Hackspacher P., Babinski M. 1995. U/P band Sm/Nd geochronologic studies of the Eastern Borborema Province, Northeastern Brazil: initial conclusions. *Journal of South American Earth Sciences*, **8**:267-288. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(95\)00013-6](https://doi.org/10.1016/0895-9811(95)00013-6)
- Vasconcellos R.M.D., Metelo M.J., Motta A.C., Gomes R.D. 1994. Geofísica em levantamentos geológicos no Brasil. Rio de Janeiro, CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 172 p.
- Veríssimo C.U.V., Santos R.V., Parente C.V., Oliveira C.G., Cavalcanti J.A.D., Nogueira Neto J.A. 2016. The Itataia phosphate-uranium deposit (Ceará, Brazil) new petrographic, geochemistry and isotope studies. *Journal of South American Earth Sciences*, **70**:115-144. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.05.002>
- Virgens Neto J. 2017. Geologia e recursos minerais da folha Fronteiras: SB.24-Y-C-II,I estados do Piauí, Pernambuco e Ceará. Teresina, CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 79 p.
- Won I.J., Bevis M. 1987. Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon: algorithms and Fortran subroutines. *Geophysics*, **52**:232-238. <https://doi.org/10.1190/1.1442298>

5.2 ARTIGO Nº 2

Não submetido

STRUCTURAL FRAMEWORK OF THE CARNAUBINHA BASIN, BRAZIL, BASED ON GRAVITY AND MAGNETIC DATA

Claudia Estefani Rodrigues Saraiva¹, Maximilian Fries^{1,2}, Karen Maria Leopoldino Oliveira^{3,4}

1 Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Brazil.

2 Associate Professor, Laboratório de Geofísica Aplicada (LGA), Universidade Federal do Pampa (Unipampa), Brazil.

3 Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará (UFC), Brazil

4 Assistant Professor, Laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto (LGPSR), Universidade Federal do Ceará (UFC), Brazil.

ABSTRACT

The cambro-ordovician Carnaubinha basin, northeastern Brazil, along with the other Transition Phase basins of the Borborema Province (BP), is situated on the proximities of shear zones, showing hydrothermal alterations and disseminated sulfides. Such characteristics allowed different authors to compare this mineralization with the world-class Iron-Oxide-Copper-Gold (IOCG) deposits. However, there is no information about the basin's geologic-structural framework. Thus, the present research aimed at the Carnaubinha Basin's subsurface geological characterization, as well as its surroundings, based on the integration of ground gravity and aeromagnetic methods. The main direction of the geophysical lineaments was interpreted as NW-SE, which corroborates with morphostructural lineaments extracted from a Digital Elevation Model (DEM) based on Alos-Palsar imagery. Through the radially averaged power spectrum, 2D and 3D Euler Deconvolution, and the tilt angle method, was possible to estimate the depths of the geophysical source, which are predominantly shallow (approximately 500 m). The application of enhancement methods allowed the division of the area into six Magnetic Domains (MD), which showed a good correlation with the geological data. Lastly, a 2D gravity modelling was made through the T1 transect, which made it possible to obtain information from the basin's internal

geometry and its depth, that reached approximately 520 m. That said, this study brought unprecedented results for the region since no studies focused on the use of geophysics were done in this basin.

Keywords: Potential Methods, Geophysical mapping, Geophysical Lineaments, Euler Deconvolution, gravity modelling

1. INTRODUCTION

In Brazil, northeastern South-American Platform, there is a set of basins formed at the Proterozoic-Fanerozoic transition, a period that marks the stabilization that occurred after the great continental collisions, in which the Borborema and Mantiqueira provinces are situated, as well as the surroundings of the Paraná and Parnaíba basins. The evolution of these environments shows a temporal correlation with the end of the Brasiliano Orogeny, being the Camaquã Basin, at the Sul Rio-Grandense Shield, one of the most important members, in which almost all of the transition phase related stratigraphic succession can be found, as described by Almeida, in 1969 (Teixeira, 2000; Teixeira et al., 2004).

These basins are characterized by immature clastic sequences, derived from proximal source-areas, which may have a special association with acid to intermediate magmatism (Brito Neves, 1998; Teixeira, 2000; Teixeira et al., 2004). In Borborema Province, northeastern Brazil, these environments appear associated with shear zones, which show a strong structural control, and occurrences of disseminated sulfides and hydrothermal alterations (Maas, 2003; Machado, 2006; Huhn et al., 2011; Parente et al., 2011; Saraiva and Rodrigues, 2018; Medeiros and Paula, 2019). Among these basins, Carnaubinha, located in the state of Piauí, Brazil, is the focus of this study (**Figure 1a**).

Despite similarities with Iron-Oxide-Copper-Gold deposits (IOCG), as well as the significant increase in the amount of data in the past few years, many information gaps still exist in some of these environments, like the lack of data about the internal architecture of these basins. In this concern, geophysical methods, especially the ones based on the potential field (magnetic and gravity), which uses contrast in magnetic susceptibility and density, represent an alternative to determine a basin boundary, its basement topography, structural patterns, and thickness variation of the sedimentary layers (Castro and Castelo Branco, 1999; Castro, 2011; Reynolds, 2011; Hinze et al., 2013; Castro et al., 2014; Moro et al., 2018; Pedrosa Junior et al., 2015, 2017; Oliveira

et al., 2018; Pinto and Vidotti, 2019; Santos Filho et al., 2021). Remote sensing tools also help with the interpretation of topography's textural elements and structural patterns definition (Madrucci et al., 2005; Jacques et al., 2014).

In this matter, the present work's goal is to contribute to the studies concerning the geology of Carnaubinha Basin, by mapping the structural features within it and determining sedimentary layers thickness. Aerogeophysical data (magnetic), terrestrial gravity transects, geology information, and remote sensing imagery were the main tools used to do so. Until the present moment, no papers were published regarding the internal architecture and structural framework of this basin.

2. GEOLOGICAL CONTEXT

Carnaubinha Basin is located on the western side of the Borborema Province (BP), northeastern South American Platform (**Figure 1**). BP is made by Archean and Proterozoic terrains, spreading through 450000 km², approximately (Almeida et al., 1977, 1981; Brito Neves et al., 2000), formed by the end of the Brasiliano-Pan African Orogeny, with the continental collision between Amazon, São Luís/West Africa and São Francisco/Congo cratons, which resulted in the Gondwana supercontinent final amalgamation (Brito Neves and Cordani, 1991; Brito Neves et al., 2000).

Due to its complex history, different tectonic divisions were proposed. According to Brito Neves et al. (2000), the province is split by NE-SW oriented regional scale shear zones in five tectonic domains (**Figure 1b**). Carnaubinha Basin lays on the Rio Grande do Norte Domain (RGND), more specifically above the Orós-Jaguaribe System rocks (~1.80 Ga), a NE-SW sigmoid-like system which is limited by two major transcurrent shear zones (**Figure 1c**): Orós, on the west side, and Portalegre, on the east side (Parente and Arthaud, 1995; Arthaud et al., 2008). Its basement is divided into two blocks: Jaguaretama and São Nicolau, the latter the divisor between the metavolcanosedimentary sequences Orós, on the west side, and Jaguaribe, on the east side (Mendonça and Braga, 1987; Parente and Arthaud, 1995).

The Jaguaretama and São Nicolau complexes are represented by diverse, banded and partially migmatized orthogneisses and paraderived rocks. The Orós and Jaguaribe sequences show quartzite, schist, marbles (calcitic, dolomitic, and magnesian), calcsilicate rocks, and carbonate quartzites, as well as bimodal metavolcanic magmatism and metaplutonic rocks, characterized by different orthogneisses (Parente & Arthaud, 1995). Underlying the Orós Sequence's lithotypes,

the paleoproterozoic Serra do Deserto Intrusive Suite outcrops in the study area, composed of granitic augen-gneisses. The Neoproterozoic Riacho do Puiú Granitoid is also included in this context (Cavalcante, 1999; Veríssimo et al., 2014), composed of leucocratic granites, associated to pegmatoid mobilizates.

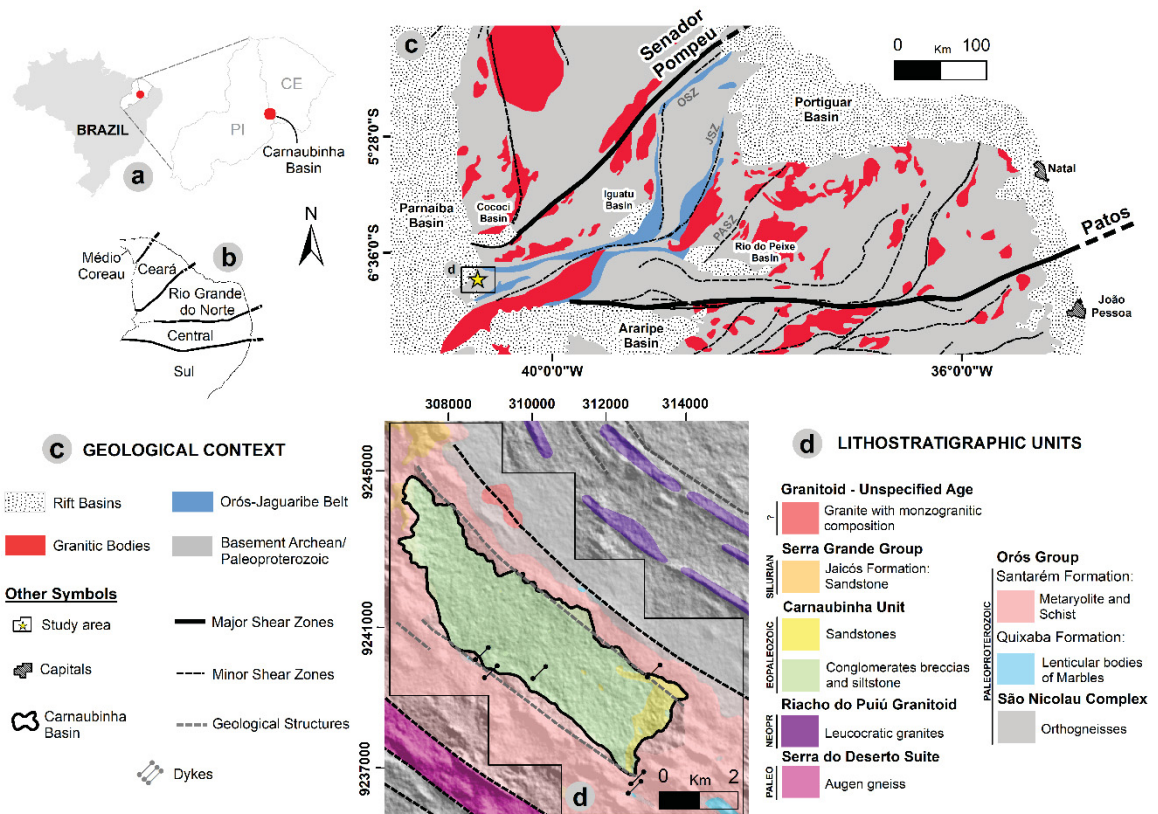


Figure 1 - Carnaubinha Basin geological contextualization. (a) study area localization, (b) BP domains, (c) BP simplified map, highlighting the RGND and the Carnaubinha Basin, and (d) Local geological data integration, on a 1:25000 scale (black square area), 1:100000 and 1:500000. OSZ - Orós Shear Zone; JSZ - Jaguaribe Shear Zone; PASZ - Portalegre Shear Zone. Database: Gomes et al. (2000); Medeiros (2004); Veríssimo et al. (2014); Veríssimo et al. (2016); Saraiva and Rodrigues (2018); Berni et al. (2019).

Formed in the Eopaleozoic, the Carnaubinha Basin shows an area of 17 km² NE-SW oriented, with its origin directly related to the Brasiliano/Pan-African event (**Figure 1d**). It is constituted by an immature clastic sequence formed of polymictic conglomerate, arenite, shale, and siltstone, truncated by acid volcanic dykes. Such lithotypes form the Carnaubinha Unit and are affected by hydrothermalism (Saraiva and Rodrigues, 2018). These rocks are partially superposed by the Serra Grande Group (Jaicós Formation), from the Silurian Parnaíba Basin, which is composed of conglomeratic arenites, which outcrops on the area's northeastern portion, superposing discordantly the Carnaubinha Basin and its basement (Parente et al., 1984; Saraiva and Rodrigues, 2018).

3. MATERIALS AND METHODS

The final results were obtained from aeromagnetic data, remote sensing imagery, ground gravity stations (presented in the form of transects), and pre-existing geology and structural information. The procedures adopted are highlighted in **Figure 2**.

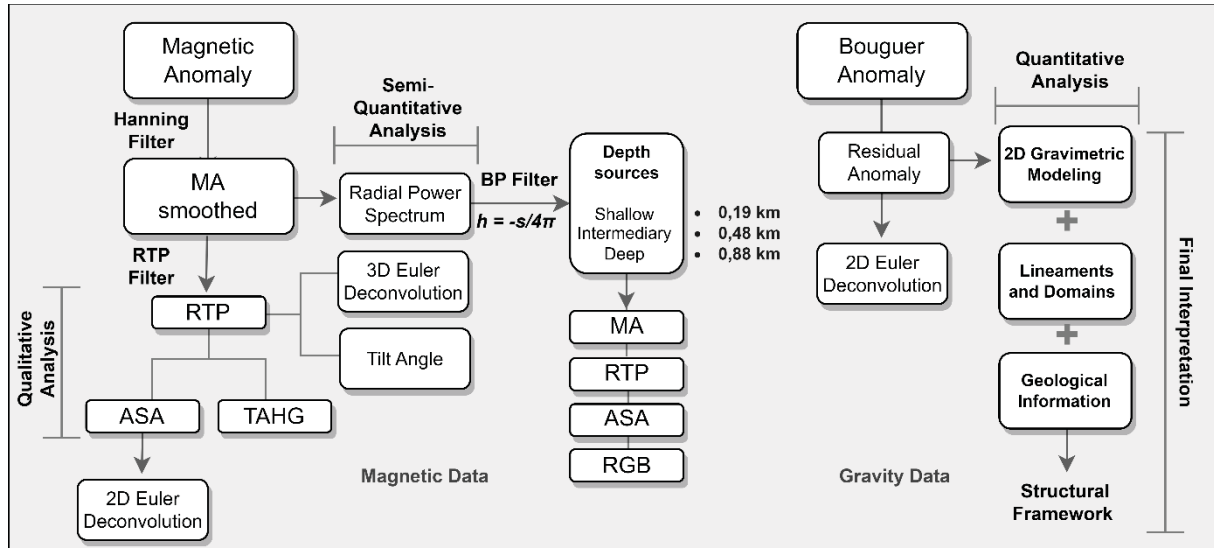


Figure 2 - Magnetic and gravity data processing. The data were integrated with existing geologic-structural information and remote sensing data (morphostructural lineaments). MA – Magnetic Anomalies, RTP – Reduction to the Pole, ASA – Analytic Signal Amplitude, TAHG – Tilt Angle of the Total Horizontal Gradient, RGB – Red/Green/Blue

3.1 Aeromagnetic data

The aerogeophysical data used are from the Centro-Sudoeste do Ceará Project (n° 1101), collected in 2010 by Prospector Aerolevantamentos e Sistemas Ltda, a company hired by Serviço Geológico do Brasil – CPRM. The data acquisition covered a big portion of the Ceará state and some areas of the Pernambuco and Piauí states (**Figure 3a**). The project parameters are shown in **Table 1**.

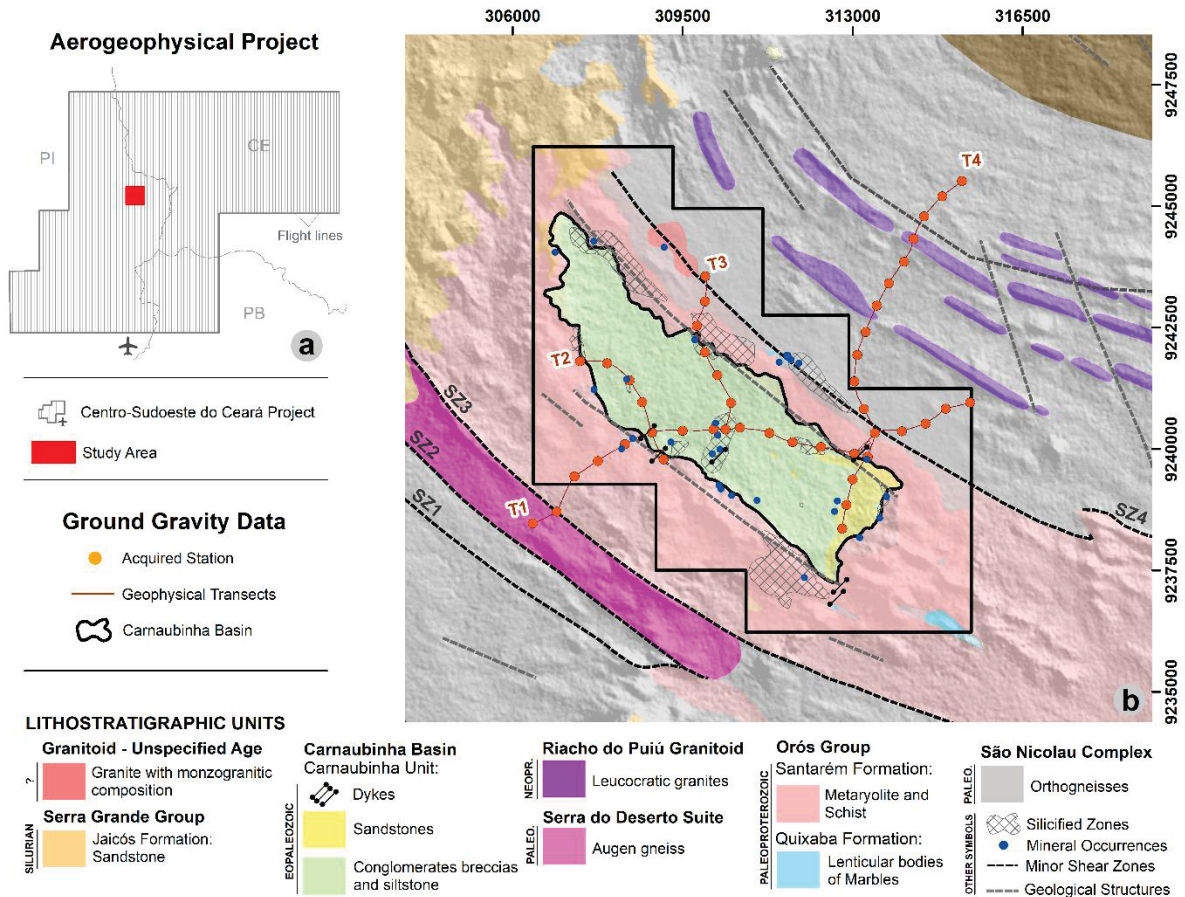


Figure 3 - Geophysical data localization. (a) Centro-Sudoeste do Ceará Project, and (b) Distribution of the gravity stations acquired in the study area. The black square refers to the area with geological information on a 1:25000 scale. SZ - Shear Zone. Database: Gomes et al. (2000); Veríssimo et al. (2014); Saraiva and Rodrigues (2018).

Table 1 - Centro-Sudoeste do Ceará Aerogeophysical Project, according to its technical report (CPRM, 2010).

Parameters	Unit
Flight lines direction	N-S
Flight lines spacing	500 meters
Control lines direction	E-W
Control lines spacing	10 km
Flight height average	100 meters
Geophysical measurement internal	0.1s (magnetometer)

3.1.1 Data processing – qualitative analysis

The corrections, such as the removal of the International Geomagnetic Reference Field – IGRF, were previously executed (CPRM, 2010). The data were interpolated using the bidirectional method (BIGRID – Geosoft, 2014) with a quarter of the flight lines spacing, *i.e.*, 125x125 m, as recommended by Vasconcelos et al. (1994). This procedure allowed the confection of the Magnetic Anomaly (MA), in which was

applied the Hanning filter (3x3 convolution), with two-time smoothing, that removes high frequencies that may be associated with noise.

For the magnetic sources enhancement, many procedures were used, namely:

- i) Reduction to the Pole – RTP (Baranov, 1957; Baranov and Naudy, 1964);
- ii) Analytic Signal Amplitude – ASA (Nabighian, 1972, 1984); and
- iii) Tilt Angle of the Total Horizontal Gradient – TAHG (Ferreira et al., 2010, 2013).

3.1.2 Depth estimate

The depths of the magnetic sources were estimated with the Radially Averaged Power Spectrum, 2D and 3D Euler Deconvolution, and Tilt Depth.

- i) Radially Averaged Power Spectrum (Spector and Grant, 1970);
- ii) 3D Euler Deconvolution (Thompson, 1982; Reid et al., 1990); and
- iii) Tilt Depth Estimate (Salem et al., 2008; Geosoft, 2020).

With the Radially Averaged Power Spectrum was possible to make adjustments in the lines and, with the aid of the band-pass filter, to separate the shallow, intermediate, and deep magnetic sources (Geosoft, 2015). The Tilt Depth Estimate outlined the edges of the causative sources and is less sensitive to noise in the data (Geosoft, 2020). The 3D Euler Deconvolution was applied on the reduced to the pole data, in which the structural index 1 was used, as it was the one that showed the most homogenization. The other parameters were defined by the trial-and-error method, with a window size of 10 (1250 m) and maximum depth tolerance of 7 %.

2D Euler solutions were also generated from the magnetic anomaly applied to the ASA, through the software Euler 1.5 (Cooper, 2002). The profiles were made in the same positions as the collected gravity transects, aiming for an integrated interpretation. To do so, structural indexes from 0.00 to 1.00 were used, which are compatible with the local geology and are represented by linear features, such as fractures and geological contacts (Castro, 2011).

3.2 Gravity data

In this research, 45 gravity stations were surveyed, accounting for 4 transects using the digital gravimeter SCINTREX, model CG-5, with a 0.5 km spacing through

the access ways. A planialtimetric survey was also executed, using a Trimble DGPS (Differential Global Positioning System), R10 model, with millimetric precision. The main objective of the transects was the intersection of the basin in different positions. However, due to the lack of existing access, this was not possible in the T2, T3, and T4 transects, as illustrated in **Figure 3b**.

3.2.1 Gravity data correction and processing

After the survey, the data was compiled and imported for the software Oasis Montaj, using the Gravity module, in which it was submitted to the required corrections, that can be seen in the software's gravity data processing manual Geosoft (2014). For the calculated Bouguer anomalies an average slab density of 2670 kg/m^3 was applied. The last step was the regional-residual separation through Bouguer's radially averaged power spectrum. 2D Euler profiles were also generated using the software Euler 1.5 (Cooper, 2002) for the residual Bouguer anomaly, with 0.00 to 1.00 structural indexes, such as those used on magnetic data.

3.2.2 2D gravity modelling

The gravity models were made using the GM-SYS tool (GM-SYS, 2004), and made use of 2D and 3D Euler Deconvolution and surface geological data from previous works (Gomes et al., 2000; Veríssimo et al., 2014; Saraiva and Rodrigues, 2018). The densities used on the T1 modelling were defined based on existing literature about the main lithostratigraphic unities that occur in the area (Telford et al., 1990), as well as previous works on near/correlate regions (**Table 2**). The modelling was focused only on the crustal portion of the area.

More details about the procedure's principles can be consulted in the following works: Talwani et al. (1959), Talwani and Heirtzler (1964), and Won and Bevis (1987).

Table 2 - Density values used for 2D gravity modelling of the T1 Transect. The adopted values were based on the bibliography

Geologic Unit	Rock parttern	Density (kg/m ³)		Source
		Minimum	Maximum	
São Nicolau Complex	Ortoznaisses	2690	2740	Telford et al. (1990), Osako et al. (2011), and Oliveira et al. (2018)
Oros Group	Meta-ryolite, Schist and Marble	2640	2780	Oliveira et al. (2018) and Telford et al (1990)
Carnaubinha Basin	Polymictic Breccias, Sandstone, Volcanic rocks and Hydrothermal Zones	2540	2880	Pedrosa Junior et al. (2017, 2019) and Santos Filho et al. (2021)
Serra do Deserto Suite	Augen Gneiss	2675	2690	Telford et al. (1990)

3.3 Structural configuration

Alos Palsar imagery (12.5 m resolution), provided by Alaska Satellite Facility, was used to generate a digital elevation model (DEM), through which the morphostructural lineaments were extracted. With the DEM, the hillshade was made using 45° solar elevation and different lighting azimuths (0°, 45°, 90°, 135°). The positive and negative features (hills and valleys) were manually marked on a 1:80000 scale, and their orientations were determined by the Arc-SDM extension (Spatial Data Modeller for ArcGIS) (Sawatzky et al., 2009). The rosette diagrams were generated with the software Stereonet, version 8.8.6.

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1 Magnetic-structural configuration

On the magnetic anomaly maps and reduced to the pole, it is possible to see a NW-SE trend, ranging from 163.35 to 112.01 nT and -74.01 and 246.91 nT, respectively (**Figures 4a** and **4b**). In this project, the ASA was used as the main product, and it is possible to observe regions with high magnetic values, mainly in the northeastern portion of the area and near the basin, reaching 0.85 nT/m (**Figure 4c**). Through the TAHG method, 95 magnetic lineaments were defined, which can be related to failures, geological contacts, and dykes, that emphasize the NW main trend, with a N290°W orientation (**Figures 4d, e, and g**).

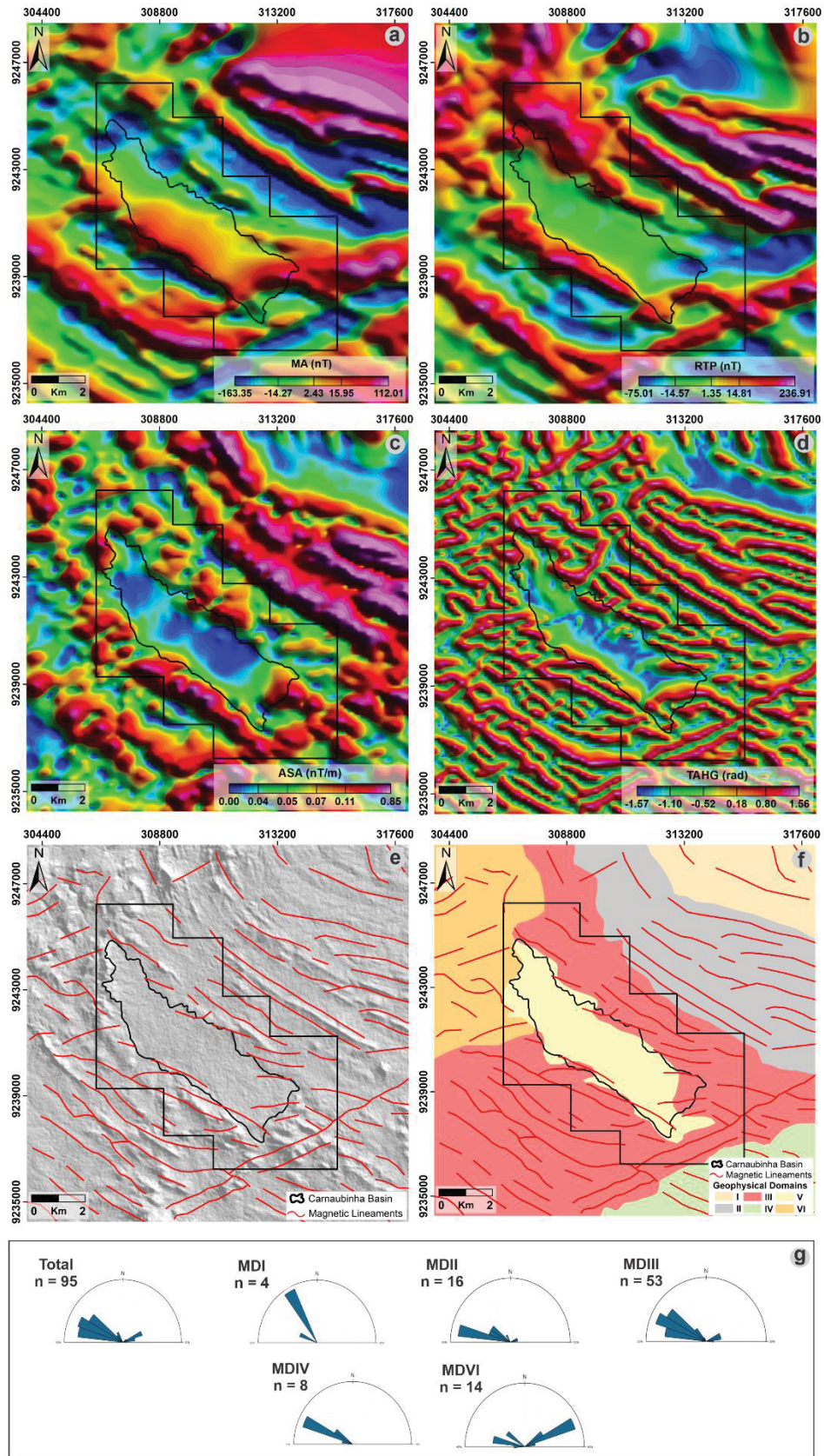


Figure 4 - Aeromagnetic products and interpretations generated. (a) Magnetic Anomaly map; (b) Reduction to the Pole (RTP); (c) Analytic Signal Amplitude - RTP; (d) Tilt Angle of the Total Horizontal Gradient - RTP; (e) Interpreted Magnetic lineaments; (f) Interpreted Magnetic Domains; and (g) Rosette Diagrams calculated for the magnetic lineaments, in general, and by domains. The black square refers to the area with geological information on a 1:25000 scale, as presented in Fig. 1d and 3b.

4.1.1 Magnetic domains and lineaments

The Magnetic Domains (MD) were outlined using the lineaments interpreted by the TAHG, considering the main direction, medium length and density, and the local magnetic array. It was possible to distinguish six magnetic domains (**Figure 4f**).

The Magnetic Domain I (MDI), on the far-northeastern portion of the area, is characterized by low values of analytic signal amplitude predominancy (< 0.04 nT/m). There is also a lack of magnetic lineaments, showing a medium orientation of N318°W and around 1 km in length. The Euler solutions emphasize a NW/N trend, indicating strong similarity with the marked lineaments (**Figures 4e** and **5a**). Magnetic sources vary from shallow to intermediate (200-1000 m, with values predominantly around 500 m). Such domain was not mapped by Saraiva and Rodrigues (2018), however, Veríssimo et al. (2014), which mapped the region with a scale of 1:100000, shows that it is composed by the São Nicolau Complex's orthogneisses.

The Magnetic Domain II (MDII), also on the northeastern part of the area, next to MDI, shows a predominancy of magnetic highs (reaching maximum values of 0.85 nT/m) (**Figure 4c**). The lineaments have N°280W main direction, great lengths (higher than 2 km, reaching up to 7 km), and moderate density. The Euler solutions and tilt derivative method (**Figure 5**) show a shallow/intermediate pattern (< 500 m). Such domain comprises the São Nicolau Complex (orthogneiss), as well as the Riacho do Puiú granite, both described by Veríssimo et al. (2014).

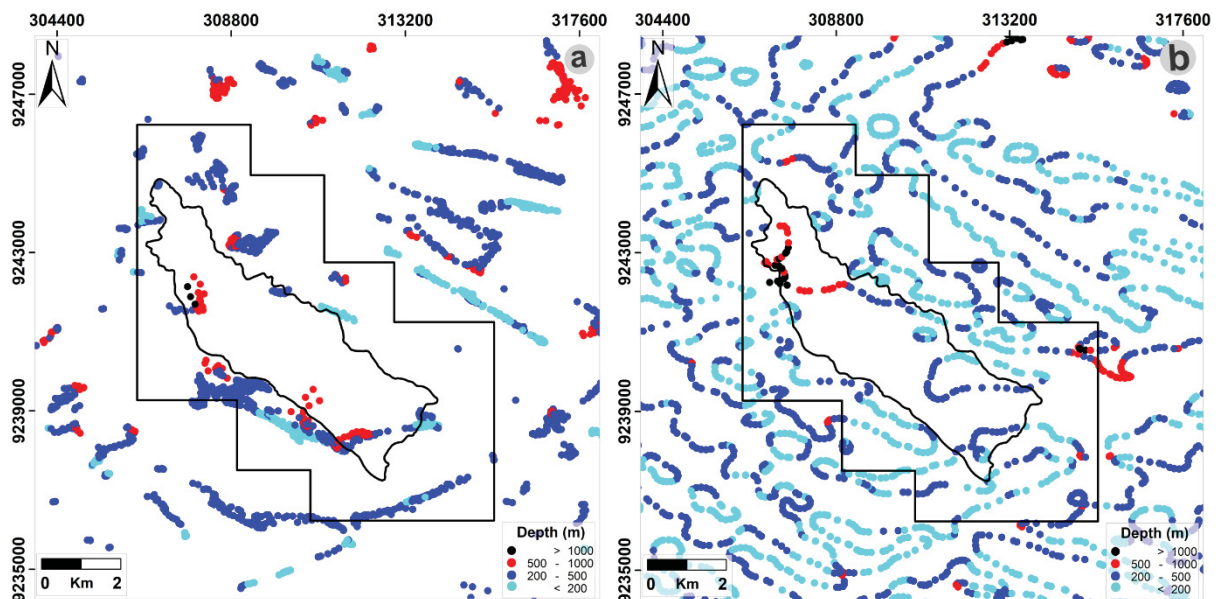


Figure 5 - Depth estimates of the magnetic sources. (a) 3D Euler Deconvolution, and (b) Tilt angle. The depths (colored circles) were classified at the same intervals. The black square refers to the area with geological information, on a 1:25000 scale, as presented in Fig. 1d and 3b.

The Magnetic Domain III (MDIII) appears on the northern, central and far-southwestern portions of the study area, being the largest domain, and showing a heterogeneous pattern, with low values predominancy ($< \sim 0.04$ nT/m). The magnetic lineaments have diverse lengths (ranging from 0.5 km to 8.4 km), with a main direction of N296°W, as well as predominancy of shallow to intermediate Euler solutions (up to 500 m), with deeper and localized sources being found sporadically (**Figure 5a**). This pattern is corroborated by the tilt derivative method (**Figure 5b**). Magnetic highs associated with great extension lineaments are featured and mapped by the Euler solutions and TAHG. According to Saraiva and Rodrigues (2018), this domain comprises the metarhyolites from the Orós Group (Santarém Formation), part of the São Nicolau Complex (orthogneisses), as well as a granitoid. The same work also indicates that the latter outcrops on a small region, however, observing the TAHG (**Figure 4d**), an apparently circular-shaped anomaly is shown, allowing us to infer that it is wider on the subsurface. On the far-southwestern portion of the area, which was not mapped by Saraiva and Rodrigues (2018), Veríssimo et al. (2014) show that the domain also comprises rocks from the Serra do Deserto Intrusive Suite, which is strongly highlighted by intermediate to high values. A NE-SW oriented lineament also appears on the far-southwestern portion of the domain, marked by TAHG and Euler solutions, partially coinciding with basic dykes described by Veríssimo et al. (2014), indicating that such features may represent a single body that also extends downwards (depths up to 500 m), a fact that is corroborated by the continuity and homogeneity of the anomaly. Moreover, high values are shown around the basin, along with a higher density of Euler clouds. According to Saraiva and Rodrigues (2018), these regions comprise rocks that were strongly altered by hydrothermalism (mainly silicification), showing an association with sulfides, copper carbonates (malachite and azurite), and magnetite.

The Magnetic Domain IV (MDIV), on the far-southeastern portion of the study area (**Figure 4f**), is characterized by a heterogeneous pattern, with predominancy of low/intermediate values (< 0.10 nT/m), few Euler solutions (maximum depths of 500 m), lineaments with orientations of N290°W, mainly, and intermediate density and lengths (~ 1.5 km). Such domain comprises rocks from the Orós Group, represented by metarhyolites (Santarém Formation), as well as marble lenses (Quixaba Formation).

The Magnetic Domain V (MDV), on the central portion of the area, shows low magnetic values (average of 0.020 nT/m) and the absence of magnetic lineaments (**Figures 4c** and **4d**). Linear features appear near its boundaries, which are interpreted as extensions of the surrounding domains, or even geological contacts. Localized Euler solutions occur, with predominant values of about 1000 m, reaching a maximum of 1229 m. The tilt derivative method also shows deep sources in the same position, confirming the previous method. Such domain is composed of the sedimentary rocks from the Carnaubinha Basin, along with a small portion of the Orós Group.

The Magnetic Domain VI (MDVI), on the northwestern part of the area (**Figure 4f**), is characterized by low density of lineaments, with extensions ranging from 0.90 to 2.65 km, a main direction of N70°E and a secondary direction of N280°W. There are few and shallow Euler solutions (predominantly around 200 m). The tilt derivative method shows that the causative sources are only composed of shallow sources. According to Veríssimo et al. (2014) and Saraiva and Rodrigues (2018), a small portion of this region is composed of metarhyolites from the Orós Group, while the rest is represented by the Serra Grande Group (Jaicós Formation) from the Parnaíba Basin.

Despite Borborema Province's NE-SW main trend, the study area shows a structural pattern with NW-SE directions (**Figure 4g**), due to a drag fold that took place in the region (Maas, 2003). After the development of the folding, the rocks of the Serra Grande Group followed the province pattern, which justifies the orientation divergence of this domain in comparison with the others.

4.1.2 Structural pattern from the Digital Model Elevation (DEM)

From the DEM product, 518 morphostructural lineaments were marked, mainly on the NW quadrant, with a preferential direction around N310°W, highlighted on the rosette diagram, and a N-S secondary direction (**Figure 6**).

The extracted features were classified based on the magnetic domains previously shown (MDI to MDVI). Of all the domains, the MDV (represented by the Carnaubinha Basin) is the one that shows the smallest amount of lineaments. In general, the structures confirmed the interpreted pattern from the aeromagnetic data, except for the MDVI, which shows a main direction of around N320°W and a secondary direction of N80°E.

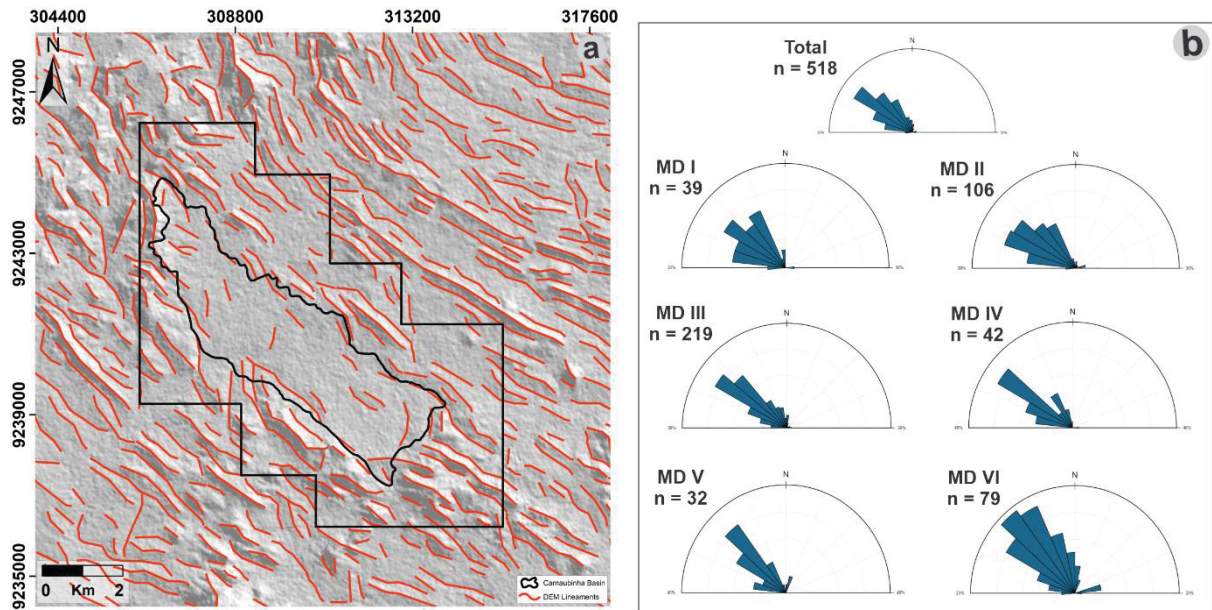


Figure 6 - Distribution of the morphostructural lineaments (a) Extracted from the Alos Palsar's DEM, (b) Rosette diagrams calculated for the morphostructural lineaments, general and separated according to the magnetic domains (MD) previously interpreted. The black square refers to the area with geological information, on a 1:25000 scale, as presented in Fig. 1d and 3b.

4.2 Depth Estimation

4.2.1 Radially Averaged Power Spectrum

The characteristics of the magnetic sources were analyzed from the decomposition of the radially averaged power spectrum in diverse depth intervals (maximum and minimum cutoff values). Three lines were adjusted allowing the identification of the following features: *i*) shallow features, with depths ranging from 191 to 480 m and wavelength from 0.89 to 1.31 km; *ii*) intermediate features, depths ranging between 480 and 878 m and wavelength of 1.31 to 4.00 km; and *iii*) deep features, with a depth greater than 878 m and wavelength with more than 4.00 km (**Figure 7**). The 3D Euler solutions reached a maximum depth of approximately 1229 m (**Figure 5a**).

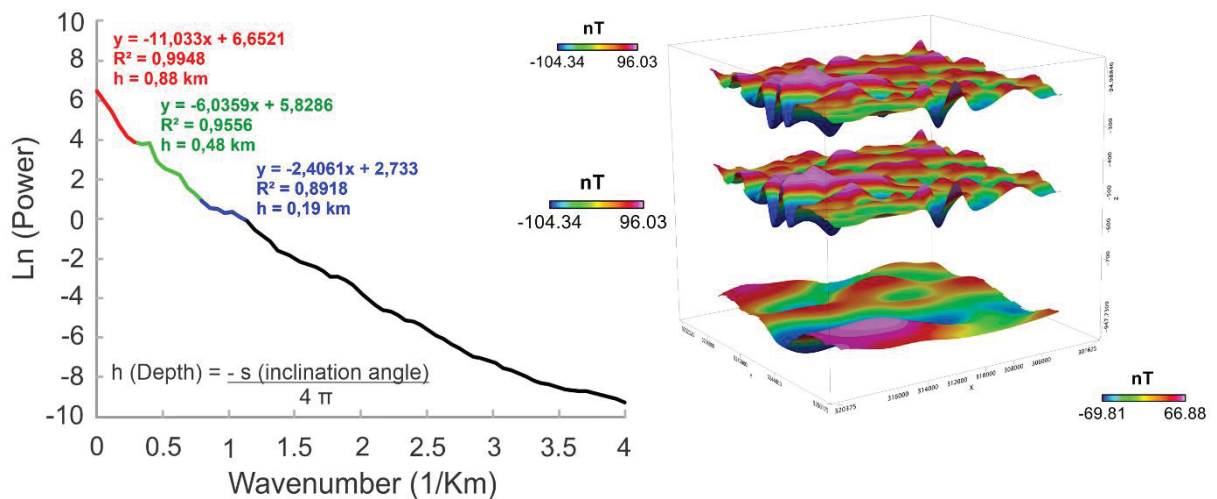


Figure 7 - Radially averaged power spectrum of the magnetic anomaly. Each colored segment represents a different depth interval of the magnetic source's top, which is highlighted by the MA product. The various colored equations refer to the linear regression used for each segment, where R^2 is the determination coefficient. The closer to 1, the better the linear regression fit.

Analyzing the anomalies from the decomposed ASA, it is possible to see that the shallow (**Figure 8a**) and intermediate (**Figure 8b**) levels show a higher gradient, indicating that the total ASA is more influenced by these levels. On the deepest level, it is seen that the midwest sector, composed by the Carnaubinha and Parnaíba (Serra Grande Group) basins, and part of the Orós Group, shows low magnetization (**Figure 8c**). However, the northeastern portion has a higher intensity (São Nicolau Complex, Riacho do Puiú Granite, and part of the Orós Group), along with part of the far west, with the latter coinciding with the interpreted extension of the mafic dyke.

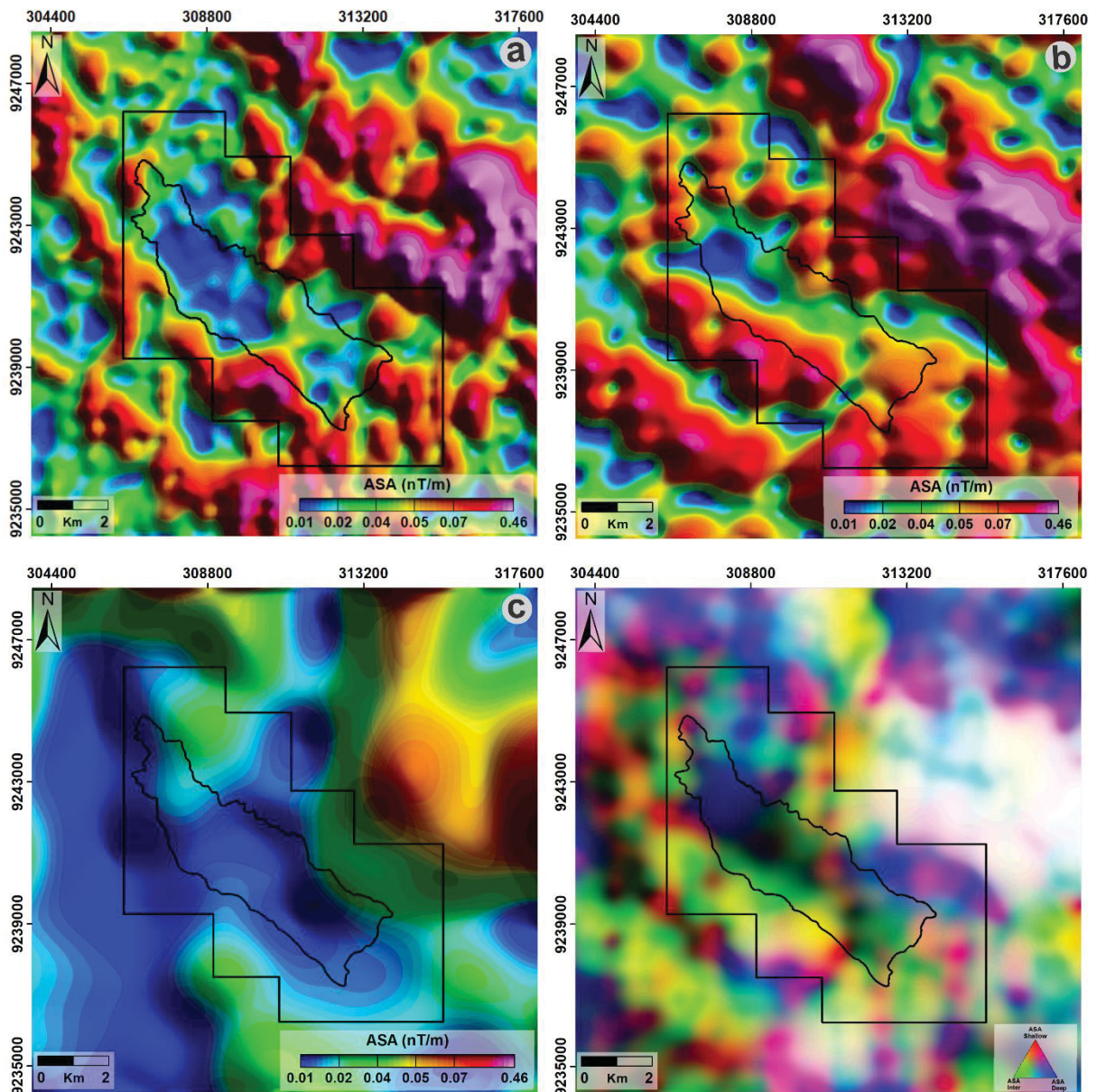


Figure 8 - Analytic Signal Amplitude maps of the data in Figure 7. (a) Shallow, (b) Intermediate, (c) Deep, and (d) Ternary composition of the data in (a), (b) and (c). The black square refers to an area with geological information presented on a 1:25000 scale, in Fig. 1d and 3b.

Through the ternary image (**Figure 8d**) it is observed that the regions with high magnetizations in all three levels correspond, especially, to the São Nicolau Complex and the Riacho do Puiú Granitic Suite (MDII). The linear features with intermediate depths (green color) are notorious, reflecting a NW-SE orientation, being associated with the Orós Group and São Nicolau Complex. The predominance of deep sources in the northern portion of the area is also noted, inside the Carnaubinha Basin and on its edges, as well as the intermediate environments.

4.2.2 2D Euler Deconvolution

The 2D Euler Deconvolution, made with the residual Bouguer and ASA anomalies, identified a very consistent pattern through the surface information available in the literature. Generally, a predominance of the shallow solutions (around 0.6 km) is noted, with a maximum of 1.5 km (**Figures 9 and 10**).

In the T1, the solutions reached maximum depths of 1.5 km, with a higher density on depths of up to 0.8 km (**Figure 9a**). According to the surface information from Gomes et al. (2000), Veríssimo et al. (2014), and Saraiva and Rodrigues (2018), the transect passes through a very complex area, with the presence of diverse geological structures, such as dextral shear zones (without names) and failures, as well as hydrothermally altered zones and with sulfides and copper carbonates (malachite). It is observed that SZ3 and SZ4 appear very clearly on the subsurface, with depths of over 0.70 km and 0.90 km, respectively. The former is also characterized by 3D Euler with depths that range from 0.50 km to 1.00 km, showing a good correlation. A deep structure is also verified on the subsurface, at the vicinity of the 2.20 km position, that exceeds 1km, being associated with a well-marked gravity low.

The Carnaubinha Basin's boundaries are well highlighted on the profile, which begins being marked by dense gravity solutions, with maximum depths of 0.6 km, and ends with clouds from magnetic data, with maximum depths of 1.3 km, that may correspond to boundary failures of the rift or even dykes. The deepest features have a subvertical aspect and are localized on the basin's interior, which may represent discontinuities, as the region is marked by strong hydrothermal alterations, as well as disseminated sulfides. Through these structures, the element-rich fluids may have risen up to the surface, precipitating the sulfides mapped by Saraiva and Rodrigues (2018). The other solutions may indicate the boundaries between the different lithotypes, as well as significant compositional variation.

The T2 has a low length (< 2.9 km) and encompasses, predominantly, the Carnaubinha Base and a small portion of the Orós Group (**Figure 9b**). The deeper features occur on depths of up to 0.70 km, marked, especially, by the gravity solutions. According to Saraiva and Rodrigues (2018), at the beginning of the profile there is a dyke, mapped near the contact between the basin and its basement rocks, and this region is marked by a predominancy of solutions from the magnetic data. The T3 shows a similar behavior, characterized by depths of up to 1.0 km, denser and deeper,

in the boundary between the basin and its basement (**Figure 9c**). Such portion is also marked by hydrothermally altered rocks and the presence of sulfides.

In T4, the solutions reached maximum depths of 1.5 km, concentrating around 0.6 km (**Figure 10**). Veríssimo et al. (2014) mapped a failure near the boundary of the basin, which extends through 1.10 km, based on the geophysical data. Around the position of 2.7 km, a subvertical structure is verified, representing the deepest that is depicted on the profile, which may also indicate an extension of the SZ4. The contact marked on surface levels between the basin and the Orós Group is also highlighted by a discontinuity of up to 1.10 km depth. After the 4.0 km position, the presence of significant variations in the magnetic and gravity data is notorious, which corresponds to the positions where the Riacho do Puiú suite cut the São Nicolau Complex, with the presence of well-marked features at maximum depths of 0.90 km, that may indicate fractured regions.

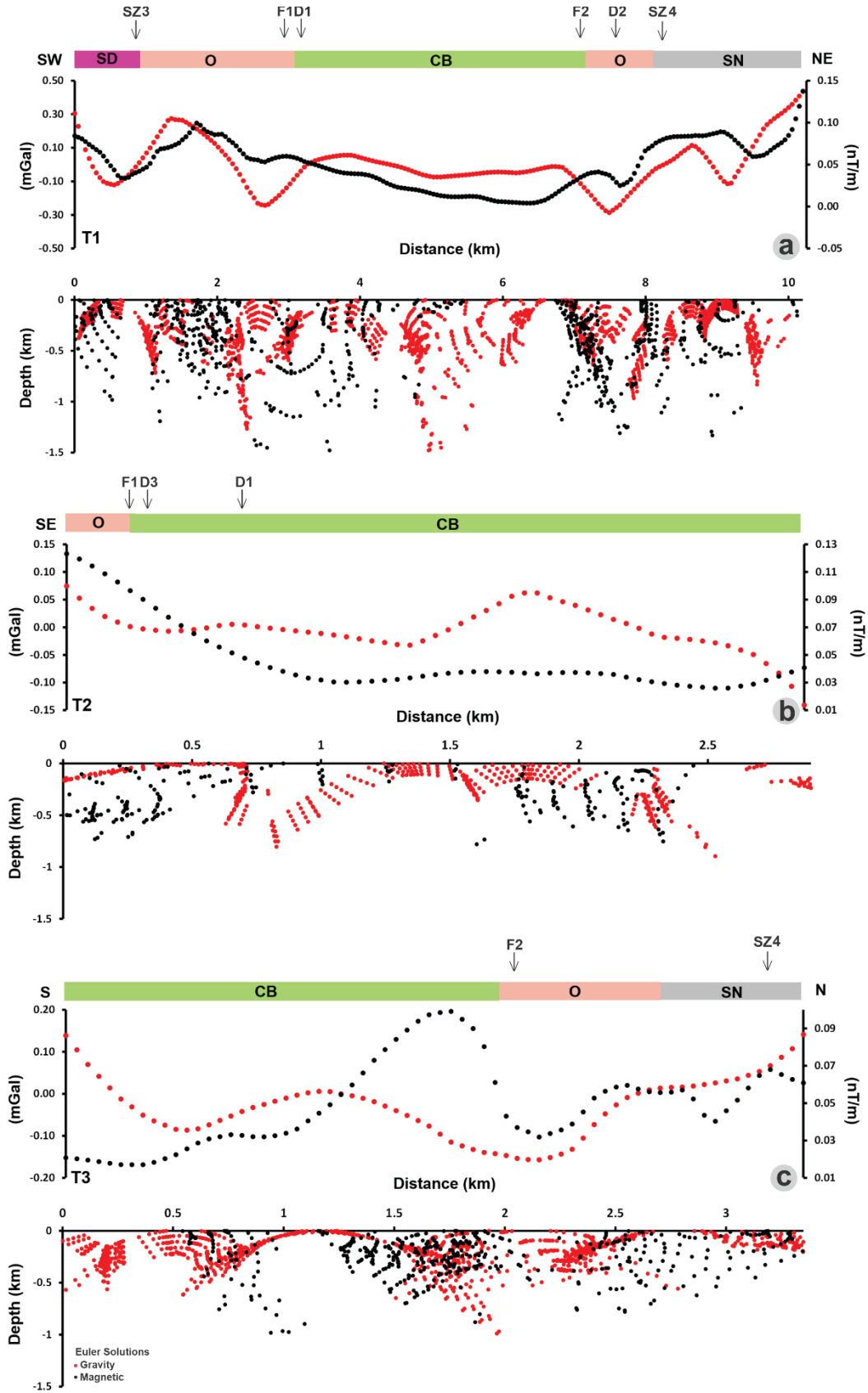


Figure 9 - 2D Euler profiles obtained from the Analytic Signal Amplitude (black) and data from the residual Gravity (red). (a) T1 Transect, (b) T2 Transect, (c) T3 Transect. The information on top refers to the geological information and existing structures. See profile localizations in Fig. 3b. SD - Serra do Deserto, O - Orós, CB - Carnaubinha Basin, SN - São Nicolau, SZ - Shear Zone, D - Dyke, F - Fault.

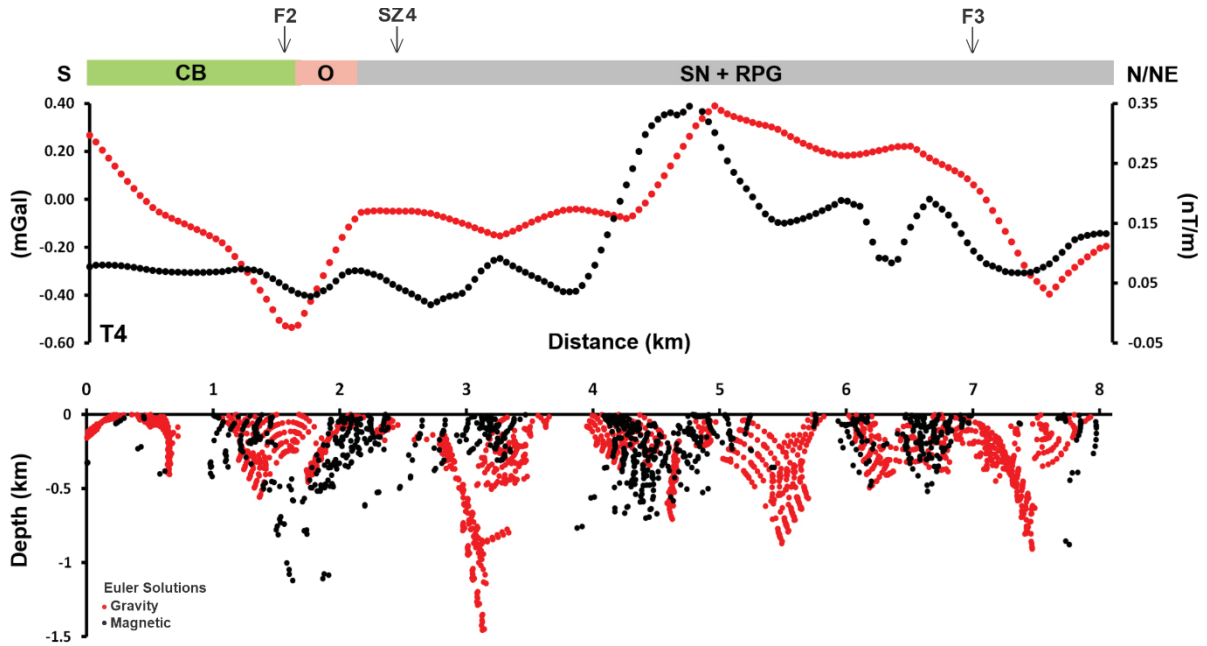


Figure 10 - Profile T4 Euler 2D obtained through the Analytic Signal Amplitude (black) and residual gravity data (red). The information on top refers to the geological information and existing structures. See profile localizations in Fig. 3b. CB - Carnaubinha Basin, O - Orós, SN + RPG - São Nicolau and Riacho do Puiú Granite, SZ - Shear Zone, D - Dyke, F - Fault.

4.3 2D gravity modelling

The gravity modelling was made on the T1 transect, which intersects all of the basin in both boundaries, and was based on the Euler solutions and surface geological information (**Figure 11**). Due to the absence of direct information of the region, such as deep wells with available geological information on the Brazilian Geological Survey's – CPRM – database, the final model represents, especially, the density of the rocks in the study area, which was obtained from different works. The lack of information in the scientific literature concerning possible depths of the basin is also noteworthy. The observed and calculated anomalies showed a good fit, which is corroborated by the RMS values of 0.020.

The T1 residual gravity anomaly shows minimum and maximum values of -0.355 and 0.454 mGal, respectively (**Figure 11a**). Generally, little variations, that may indicate compositional and/or layer thickness contrasts, are observed. The profile's initial segment is marked by moderate density blocks, in comparison with the local background (**Figure 11b**), which corresponds to the Serra do Deserto intrusive suite and part of the Orós Group. Such boundaries were delineated with the aid of 2D Euler solutions, with the presence of well-marked subvertical features.

The Carnaubinha Basin shows discreet oscillations, with portions with higher values that may represent basement highs, as well as dykes. The profile pass through various hydrothermally altered environments that shows the presence or not of sulfides, which makes it possible to infer the presence of associated dykes, as they may serve as metal-rich fluid conducts. Moreover, Saraiva and Rodrigues (2018) mapped dykes near this region (**Figures 1d** and **3b**). This portion is underlain by higher density rocks, which compose the Orós Group. It is noteworthy that it is characterized by different lithotypes that show hydrothermal alterations, which may cause little lateral variations in density. The final profile shows an ascendent character, which corresponds to the São Nicolau Complex's orthogneisses.

Lastly, an integration of all the existing information was made, making possible the elaboration of a geologic model for T1 (**Figure 11c**). It shows that the Carnaubinha Basin has a small thickness, reaching up to 520 m. Features such as dykes, which are well-marked on the Euler solutions but not always outcrop, grabens, as well as the features described by Veríssimo et al. (2014), were interpreted. Moreover, the presence of shallow discontinuities within the basin may indicate reactivations of the surrounding shear zones.

The São Nicolau Complex and Orós Group correspond to higher density rocks, which show significant compositional variations, since they are composed of different lithotypes and hydrothermal alterations, that may obliterate the real characteristics of such rocks. Moreover, diverse volcanic dykes occur, which show a strong correlation with the interpreted discontinuities. The presence of the volcanic dykes may indicate tectonic reactivations in the region, or also be the trigger for the mineralizations and alterations observed in the region, within the basin and its basement.

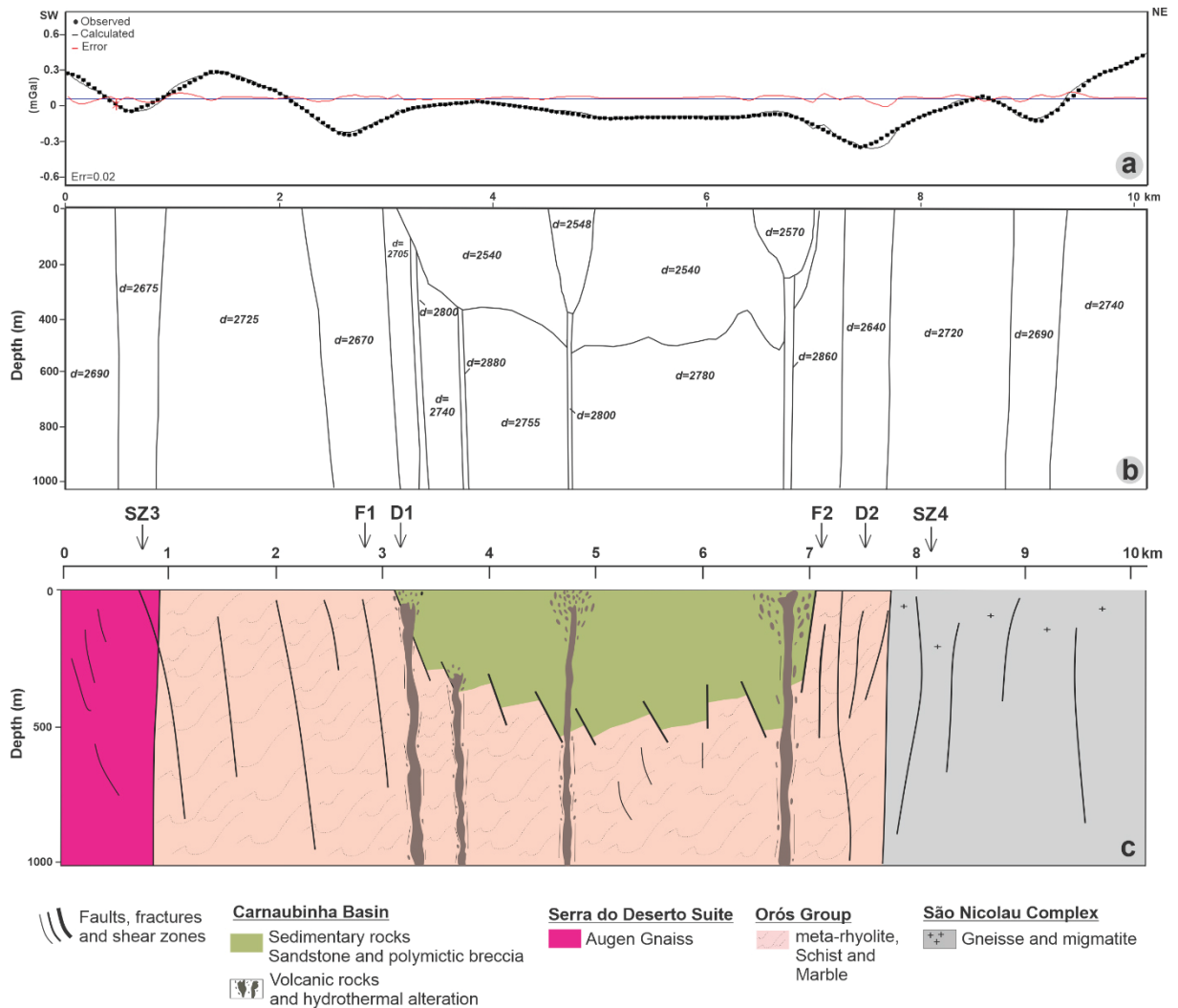


Figure 11 - T1 Transect. (a, b) 2D gravity modelling, and (c) Geological model obtained from the gravity data interpretation and magnetic and geological information. SZ - Shear Zone, D - Dyke, F - Fault.

5. CONCLUSIONS

The potential field methods (ground gravity and aeromagnetic) aided the definition of the study area's structural pattern, as well as the determination of the eopaleozoic Carnaubinha Basin's basement topography. Through the aeromagnetic data, it was possible to define lineaments with a main direction of NW-SE, similar to the shear zones and other structures described by Veríssimo et al. (2014). It is noteworthy that the study area shows a different pattern from the Borborema Province due to the presence of great drag folds, formed from dextral structures to the south (near Fronteiras, Piauí) and sinistral to the north (near Pio IX, Piauí) during the Brasiliano Cycle (Maas, 2003). The morphostructural lineaments also rectify the obtained results.

The Analytic Signal Amplitude and the Tilt Angle of the Total Horizontal Gradient were fundamental to the delimitation of the six magnetic domains, which showed, partially, a good correlation with the surface geological data. The estimated depths by Euler 3D and tilt angle methods showed a good correlation with each other, highlighting the predominancy of shallow and intermediate sources (< 500 m).

The 2D Euler Deconvolution profiles identified discontinuities with maximum depths of 1.5 km, which showed a good correlation with the structures mapped on the surface. The modelling made on T1 made it possible to calculate the basin's sedimentary layer thickness, which reached maximum depths of 520 m. It is noteworthy that such profile showed a heterogeneous aspect, due to little lateral variations of density. Volcanic dykes were added to the conceptual model, based on data obtained from geological mapping (Saraiva and Rodrigues, 2018), which may be outcropping or not.

The integration of these results generated important and unprecedented information, since it represents the first geophysical work focusing on the Carnaubinha Basin, which may aid future researches, due to the strong presence of structural control and hydrothermal alterations that may or not be associated with disseminated sulfides.

ACKNOWLEDGMENTS

This article is part of the first author's master thesis, which received financial support through a scholarship from the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES/DS (Process n.88887.502757/2020-00). The authors are thankful to the Serviço Geológico do Brasil (CPRM) for supplying the aeromagnetic data. We are also grateful to the Laboratório de Geofísica Aplicada (LGA) of Universidade Federal do Pampa (Unipampa) and the Laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto (LGPSR) of Universidade Federal do Ceará for lending, respectively, the Scintrex CG-5 digital gravimeter and the Trimble R10 DGPS for gravity surveying.

6. REFERENCES

Almeida F.F.M. 1969. Diferenciação Tectônica da Plataforma Brasileira. In: 23º Congresso Brasileiro de Geologia. Salvador, *Anais*, p. 4-5.

- Almeida F.F.M., Hasui Y., Brito Neves B.B. 1977. Províncias Estruturais brasileiras. In: VII Simpósio de Geologia do Nordeste, *Atas*, p. 363-391.
- Almeida F.F.M., Hasui Y., Brito Neves B.B., Fuck R.A. 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews*, **17**:1-29. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(81\)90003-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(81)90003-9)
- Arthaud M.H., Caby R., Fuck R.A., Dantas E.L., Parente C.V. 2008. Geology of the Northern Borborema Province, NE Brazil and its correlation with Nigeria, NW Africa. In: Pankhurst R.J., Trouw R.A.J., Brito Neves B.B., de Wit M.J. (eds.). *West Gondwana: Pre-Cenozoic Correlations across the South Atlantic Region*. Geological Society of London Special Publications, 294, London, The Geological Society, p. 49-67.
- ASF DAAC. 2015. Alaska Satellite Facility Distributed Active Archive Center. ALOS PALSAR_Radiometric_Terrain_Corrected_low_res Available at: <https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/about-palsar>. Accessed on: Apr 17, 2021. <https://doi.org/10.5067/JBYK3J6HFSVF>
- Baranov V. 1957. A new method for interpretation of aeromagnetic maps: pseudo-gravimetric anomalies. *Geophysics*, **22**:359-383. <https://doi.org/10.1190/1.1438369>
- Baranov V. and Naudy H. 1964. Numerical Calculation of the Formula of Reduction to the Magnetic Pole. *Geophysics*, **29**:67-79. <https://doi.org/10.1190/1.1439334>
- Berni, G.V., Parente, C.V., Lobato, L.M., Sampaio, C.C.F.T., Hagemann, F. 2019. The Metallogeny of Iron, copper and gold in the Borborema Province. *11th Inter-Guiana Conference focusing on the Tectonics & Resource Potential of NE South America*, Paramaribo, Suriname, p. 31-34.
- Brito Neves B.B. 1998. The Cambro-Ordovician of the Borborema Province. *Boletim IG USP Série Científica*, **29**:175-193. <http://dx.doi.org/10.11606/issn.2316-8986.v29i0p175-193>
- Brito Neves B.B. and Cordani U.G. 1991. Tectonic evolution of South America during the late proterozoic. *Precambrian Research*, **53**: 23-40. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(91\)90004-T](https://doi.org/10.1016/0301-9268(91)90004-T)
- Brito Neves B.B., Santos E.J., Van Schmus W.R. 2000. The tectonic history of the Borborema Province. In: Cordani U.G., Milani E.J., Thomaz Filho A., Campos D.A. (eds.). *Tectonic Evolution of South America. 31st International Geological Congress*. Rio de Janeiro, p. 151-182.
- Castro D.L. 2011. Gravity and magnetic joint modeling of the Potiguar Rift Basin (NE Brazil): Basement control during Neocomian extension and deformation. *Journal of South American Earth Sciences*, **31**:186-198. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.01.005>

- Castro D.L. and Castelo Branco R.M.G. 1999. Caracterização da arquitetura interna das bacias do Vale do Cariri (NE do Brasil) com base em modelagem gravimétrica 3-D. *Revista Brasileira de Geofísica*, **17**:130-144. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X1999000200003>
- Castro D.L., Fuck R.A., Phillips J.D., Vidotti R.M., Bezerra F.H.R., Dantas E.L. 2014. Crustal structure beneath the Paleozoic Parnaíba Basin revealed by airborne gravity and magnetic data, Brazil. *Tectonophysics*, **614**:128-145. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2013.12.009>
- Cavalcante J.C. 1999. *Limites e evolução geodinâmica do sistema Jaguaribeano, província Borborema, Nordeste do Brasil*. MS Dissertation, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 192 p.
- Cooper G.R.J. 2002. An improved algorithm for the Euler deconvolution of potential field data. *The Leading Edge*, **21**:1197-1198. <https://doi.org/10.1190/1.1536132>
- CPRM. 2010. Projeto Aerogeofísico Centro-Sudoeste do Ceará: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectométricos. Rio de Janeiro: Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas, 190 p.
- Ferreira F.J., de Souza J., Bongioiolo A.B.S., de Castro L.G. 2013. Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using the tilt angle. *Geophysics*, **78**:33-41. <https://doi.org/10.1190/geo2011-0441.1>
- Ferreira F.J.F., de Souza J., Bongioiolo A.B.S., Castro L.G., Romeiro M.A.T. 2010. Realce do gradiente horizontal total de anomalias magnéticas usando a inclinação do sinal analítico. Parte I – Aplicação a dados sintéticos. In: IV Simpósio Brasileiro de Geofísica. Brasília, *Anais*, 6 p.
- Geosoft. 2014. *Oasis Montaj how- to Guide. Complete Workflow for Oasis Montaj*. Toronto, Geosoft Incorporated, 260 p.
- Geosoft. 2015. MAGMAP Filtering Guided Learning Path: Defining and Applying Filters and Inverse FFT in MAGMAP. Available at: http://updates.geosoft.com/downloads/files/how-to-guides/Applying_Filters_and_Inverse_FFT_in_MAGMAP.pdf. Accessed on: Sep 12, 2021.
- Geosoft. 2020. Tilt Derivative. Available at: https://help.seequent.com/Oasis-montaj/9.9/en/Content/gxhelp/t/tiltdrv_gx.htm. Accessed on: Jan 09, 2022.
- GM-SYS. 2004. Gravity/magnetic Modeling Software: User's Guide Version 4.9. NGA Inc., 101 p.
- Gomes J.R.C., Vasconcelos A.M., Torres P.F.M. 2000. *Carta Geológica da Folha Jaguaribe SW (SB.24-Y), escala 1:500.000*. Fortaleza, Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - PLGB, Ministério de Minas e

Energia, Secretaria de Minas e Metalurgia, CPRM - Serviço Geológico do Brasil.

- Hinze W.J., Von Frese R.R.B., Saad A.H. 2013. *Gravity and Magnetic Exploration – Principles, Practices and Applications*. Cambridge, Cambridge University Press, 512 p.
- Huhn S.R.B., Justo A.P., Souza Filho C.R., Monteiro L.V.S. 2011. Caracterização geológica do Prospecto de óxido de ferro-cobre-ouro (IOCG), Aurora, Ceará, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, **41**:525-538. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2011413525538>
- Jacques P.D., Machado R., Oliveira R.G., Ferreira F.J.F., Castro L.G., Nummer A.R. 2014. Correlation of lineaments (magnetic and topographic) and Phanerozoic brittle structures with Precambrian shear zones from the basement of the Paraná Basin, Santa Catarina State, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, **44**:39-54. <https://doi.org/10.5327/Z2317-4889201400010005>
- Maas M.V.R. 2003. *Integração de dados de geofísica aérea e geologia aplicada a exploração mineral no setor sudoeste do cinturão cuprífero Orós-Jaguaribe – Província Borborema*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 77 f.
- Machado M.A. 2006. *Caracterização descritiva e genética de ocorrências cupro-hematíticas no setor sudoeste do Sistema Orós-Jaguaribe Província Borborema*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 118 p.
- Madrucci, V., Taioli, F., Araújo, C. C. 2015. Análise integrada de dados de sensoriamento remoto, geologia e geofísica no estudo de aquífero fraturado, Lindóia - SP. *Revista Brasileira de Geofísica* **23**:437-451. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2005000400007>
- Medeiros J.V.F., Paula R. N. 2019. *Mapeamento geológico da Bacia Catolé-São Julião e suas ocorrências de cobre, Piauí-Brasil*. Bachelor's Dissertation, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 130 p.
- Medeiros V.C. 2004. *Evolução Geodinâmica e Condicionamento Estrutural dos Terrenos Piancó-Alto Brígida e Alto Pajeú, Domínio da Zona Transversal, NE do Brasil*. PhD Thesis, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 200 p.
- Mendonça J.C.G. and Braga A.P.G. 1987. As faixas Vulcano-sedimentares de Orós e Jaguaribe: um greenstone belt. *Revista Brasileira de Geociências*, **17**:255-241. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1987225241>
- Moro, P.S., Vidotti, R.M., Dantas, E.L. 2018. Structural framework from gravity and magnetic data in the paleo/mesoproterozoic Araí rift-sag Basin, Central Brazil. *Geophysics*, **83**:B195-B207. <https://doi.org/10.1190/geo2017-0627.1>

- Nabighian M.N. 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, **37**:507-517. <https://doi.org/10.1190/1.1440276>
- Nabighian M.N. 1984. Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: Fundamental relations. *Geophysics*, **49**:780-786. <https://doi.org/10.1190/1.1441706>
- Oliveira K.M.L., Castro D.L., Castelo Branco R.M.G., Oliveira D.C., Alvite E.N.C., Jucá C.C.A., Castelo Branco J.L. 2018. Architectural framework of the NW border of the onshore Potiguar Basin (NE Brazil): An aeromagnetic and gravity based approach. *Journal of South American Earth Sciences*, **88**:700-714. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.10.002>
- Osako L.S., Castro D.L., Fuck R.A., Castro N.A., Pitombeira J.P.A. 2011. Contribuição de uma seção gravimétrica transversal ao estudo da estruturação litosférica na porção setentrional da Província Borborema, NE do Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*, **29**:309-329. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2011000200008>
- Parente C.V. 1984. *Geologia da Mineralização de Cobre de Mandacaru-PI*. MS Dissertation, Universidade de Brasília, Brasília, 203 p.
- Parente C.V. and Arthaud M. 1995. O Sistema Orós-Jaguaribe no Ceará, NE do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, **25**:197-306. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1995297306>
- Parente C.V., Botelho N.F., Santos R.V., Garcia M.G.M., Oliveira C.G., Veríssimo C.U.V. 2011. Contexto geológico, tipológico e geoquímico isotópico das brechas hidrotermalizadas de ferro e cobre tipo IOCG associadas à bacia Eo-paleozóica Jaibaras, da província Borborema, Brasil. In: Frants J.C., Marques J.C., Hardy J. (eds.). *Contribuições à Metalogenia do Brasil*, Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 175-197.
- Pedrosa Jr. N.C., Vidotti R.M., Fuck R.A., Castelo Branco R.M.G., Almeida A.R., Silva N.C.V., Braga L.R.C. 2017. Architecture of the intracontinental Jaibaras Rift, Brazil, based on geophysical data. *Journal of South American Earth Sciences*, **74**:27-40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2016.12.012>
- Pedrosa Jr. N.C., Vidotti R.M., Fuck R.A., Oliveira K.M.L., Castelo Branco R.M.G. 2015. Structural framework of the Jaibaras Rift, Brazil, based on geophysical data. *Journal of South American Earth Sciences*, **58**:318-334. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.07.005>
- Pinto M.L. and Vidotti R.M. 2019. Tectonic framework of the Paraná basin unveiled from gravity and magnetic data. *Journal of South American Earth Sciences*, **90**:216–232. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.12.006>

- Reid A.B., Allsop J.M., Granser H., Millet A.J., Somerton I.W. 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics*, **55**:80-91. <https://doi.org/10.1190/1.1442774>
- Reynolds J.M. 2011. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. West Sussex, John Wiley & Sons, 710 p.
- Salem, A., Williams, S., Fairhead, D., Smith, R., Ravat, D. 2008. Interpretation of magnetic data using tilt-angle derivatives. *Geophysics*, **73**(1):L1-L10. <https://doi.org/10.1190/1.2799992>
- Santos Filho F.F.B., Magini C., Chiozza S.G., Castelo Branco R.M.G. 2021. The Architecture of the Eopaleozoic Cococi Basin, northeastern Brasil: 2D geological modelling from magnetic and gravimetric data. *Journal of South American Earth Sciences*, **106**:102903. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102903>
- Saraiva C.E.R., Rodrigues T.F. 2018. *Mapeamento geológico e petrografia das ocorrências de cobre da Bacia de Carnaubinha, Pio IX-PI*. Bachelor's Dissertation, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 121 p.
- Sawatzky D.L., Raines G.L., Bonham-Carter G.F., Looney C.G. 2010. Spatial Data Modeller (SDM): ArcMAP 9.3 geoprocessing tools for spatial data modelling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural networks. Available at: <https://www.ige.unicamp.br/sdm/ArcSDM10/source/ReadMe.pdf>. Accessed on: Jun 20, 2022.
- Spector A. and Grant F.S. 1970. Statistical methods for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, **35**:293-302. <https://doi.org/10.1190/1.1440092>
- Talwani M., Heirtzler J.R. 1964. Computation of magnetic anomalies caused by two dimensional bodies of arbitrary shape. In: Parks G.A. (ed.). *Computers in the Mineral Industries, Part 1*, 9, California, Stanford University Publications, p. 464-480.
- Talwani M., Worel J.L., Landisman M. 1959. Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone. *Journal of Geophysical Research*, **64**:49-59. <https://doi.org/10.1029/JZ064i001p00049>
- Teixeira A.L. 2000. Análise das bacias da transição Proterozoico-Fanerozoico do Estado de São Paulo e adjacências. PhD Thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo, 201 p.
- Teixeira A.L., Gaucher C., Paim P.S.G., Fonseca M.M., Parente C.V., Silva Filho W.F., Almeida A.R. 2004. Bacias do estágio da transição da Plataforma Sul-Americana. In: Mantesso-Neto V., Bartorelli A., Carneiro C.D.R., Brito-Neves B.B. (org.). *Geologia Do Continente Sul Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, São Paulo, Editora Beca, p. 487-536.

- Telford W.M., Geldart F.E.M., Sheriff R.E. 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge, Cambridge University Press, 790 p.
- Thompson D.T. 1982. EULDPH: A new technique for making computer assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, **47**:31-37. <https://doi.org/10.1190/1.1441278>
- Vasconcellos R.M.D., Metelo M.J., Motta A.C., Gomes R.D. 1994. Geofísica em levantamentos geológicos no Brasil. Rio de Janeiro, CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 172 p.
- Veríssimo C.U.V., Parente, C., V., Melo, O. O., Silva Filho, W., F. 2014. Carta Geológica: folha Pio IX: DB.24-Y-A-VI. CPRM – Serviço Geológico do Brasil.
- Veríssimo C.U.V., Santos R.V., Parente C.V., Oliveira C.G., Cavalcanti J.A.D., Nogueira Neto J.A. 2016. The Itataia phosphate-uranium deposit (Ceará, Brazil) new petrographic, geochemistry and isotope studies. *Journal of South American Earth Sciences*, **70**:115-144. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.05.002>
- Won I.J., Bevis M. 1987. Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon: algorithms and Fortran subroutines. *Geophysics*, **52**:232-238. <https://doi.org/10.1190/1.1442298>

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da presente pesquisa foi possível realizar uma caracterização geral da geologia de subsuperfície das áreas de estudo a partir de dados gravimétricos terrestres e aeromagnéticos, possibilitando, assim, definir os seguintes aspectos:

- Para a Bacia Catolé-São Julião e adjacências, foi possível destacar lineamentos com direção principal NE-SW ao longo de toda a área de estudo, os quais coincidem com as tendências das zonas de cisalhamento previamente mapeadas. Enquanto que para a Bacia de Carnaubinha e adjacências, verificou-se um padrão NW-SE. Tais resultados foram corroborados pelos produtos gerados a partir dos Modelos Digitais de Elevação (MDE);
- Com base nos produtos magnéticos ASA e, em especial, ISA-GHT, realizou-se a extração de feições lineares magnéticas que podem ser associadas com falhas, contatos geológicos, bem como diques. Posteriormente, baseando-se na distribuição magnética, refletida pelas anomalias submetidas a ASA e o padrão dos lineamentos magnéticos interpretados pelo ISA-GHT, considerando densidade, direcionamento preferencial e comprimento médio, as áreas de estudo foram divididas em Domínios Magnéticos (DM). Dentre os principais resultados, mencionam-se *i*) área I (Catolé-São Julião e adjacências) - foi extraído um total de 162 lineamentos. Em seguida, realizou-se a divisão da área de trabalho em quatro domínios magnéticos; *ii*) área II (Carnaubinha e adjacências) - nesta, foram interpretados 95 lineamentos magnéticos, bem como seis domínios magnéticos. Soma-se o fato que as respostas magnéticas das bacias são bastante divergentes entre si, uma vez que a Bacia de Carnaubinha não possui sinal magnético (apenas em suas bordas), ao contrário da Bacia Catolé-São Julião, o que possibilita inferir, por exemplo, que os processos de formação destas sejam diferentes;
- Visando analisar os lineamentos e as características magnéticas em diferentes profundidades crustais, utilizou-se o espectro de potência radial obtido a partir do CMA. Para as duas áreas, ajustaram-se três retas, as quais possibilitaram decompor o CMA através do filtro passa-banda em produtos com distintos intervalos de profundidade (valores máximos e mínimos de corte), definindo feições rasas, intermediárias e profundas. Em adição, também foram geradas

as soluções de Euler 3D do dado aeromagnético. No geral, obteve-se: *i*) área I (Catolé-São Julião e adjacências) - feições rasas que exprimem comprimentos de onda (λ) de 1,11 a 2,56 km e profundidades de 364 a 602 m; intermediárias, com λ de 2,56 a 6,25 km e profundidades de 602 a 1520 m; e profundas, com λ acima de 6,25 km e profundidade superior a 1520 m. Ressalta-se que a profundidade máxima interpretada pelas soluções de Euler 3D foi em torno de 1697 m, o que corrobora os resultados obtidos; *ii*) área II (Carnaubinha e adjacências) - as fontes rasas situam-se de 191 a 480 m, com λ de 0,89 a 1,31 km; intermediárias de 480 a 878 m e λ variando de 1,31 a 4,00 km; e profundas, acima de 878 metros e λ superior a 4,00 km. Já as soluções de Euler 3D alcançaram o máximo em torno de 1229 m. Apenas para essa última área também se realizou a estimativa de profundidade através do método *Tilt*, no qual nota-se uma forte correlação no padrão de profundidades das fontes magnéticas, com predominância de fontes rasas/intermediárias (< 500 m);

- As Deconvoluções de Euler 2D dos dados gravimétricos e magnéticos possibilitaram identificar discontinuidades com profundidades máximas na ordem de 2,5 km para a área I (Catolé-São Julião e adjacências) e 1,5 km para a área II (Carnaubinha e adjacências). Tais feições apresentaram uma boa correlação com as informações já existentes, bem como possibilitou o mapeamento de novas feições e suas respectivas profundidades;
- Através das modelagens gravimétricas 2D nos três perfis da Bacia Catolé-São Julião, verifica-se que as espessuras calculadas para cada perfil são bastante compatíveis, com médias na ordem de 300 metros e máximos de 550 metros, enquanto que para a bacia de Carnaubinha os valores chegaram à ordem de 520 metros. Todavia, ao comparar as duas bacias, é notório que a Bacia Catolé-São Julião apresenta uma espessura média inferior à de Carnaubinha, visto que esta última possui um caráter mais uniforme (em termos de profundidade). Destaca-se que os valores apresentam uma certa semelhança entre si, o que pode ser inferido como uma forma de validação dos resultados. A Bacia de Cococi, que é correlata e de maior porte, situada nas proximidades, alcançou profundidades máximas de 1 km (de acordo com Santos Filho et al., 2021).

Os resultados proporcionaram informações importantes, as quais podem auxiliar em pesquisas futuras, tais como àquelas objetivando identificar o potencial

metalogênico das bacias e adjacências, visto que a ocorrência de alterações hidrotermais e de sulfetos já é conhecida, bem como àquelas com viés acadêmico (evolutivo). Para uma maior caracterização da região, sugere-se que em pesquisas futuras seja realizado um adensamento de estações gravimétricas, possibilitando, assim, mapear as bacias como um todo.

REFERÊNCIAS

- Allmendinger, R.W., Cardozo, N.C., Fisher, D., 2013. *Structural Geology Algorithms: Vectors & Tensors*: Cambridge, England, Cambridge University Press, 289 p.
- Almeida, F.F.M., 1969. Diferenciação Tectônica da Plataforma Brasileira. In: *Resumo das Conferências e das Comunicações*. Congresso Brasileiro de Geologia, Salvador, Bahia. Sociedade Brasileira de Geologia (SBG), Brasil, p. 4-5.
- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B.B., 1977. Províncias Estruturais brasileiras. In: *Atas do VII Simpósio de Geologia do Nordeste*, Campina Grande. Sociedade Brasileira de Geologia (SBG), Brasil, p. 363–391.
- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B.B., Fuck, R.A., 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth Sci. Rev.* 17, p. 1-29.
- Almeida, R.P., Janikian, L., Fragoso-Cesar, A.R.S., Fambrini, G.L., 2010. The ediacaran to cambrian rift system of southeastern south America: tectonic implications. *J. Geol.* 118, p. 145-161.
- ASF DAAC. 2015. Alaska Satellite Facility Distributed Active Archive Center. ALOS PALSAR_Radiometric_Terrain_Corrected_low_res Disponível em: <https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/about-palsar>. Acesso: 15 de fevereiro de 2021. <https://doi.org/10.5067/JBYK3J6HFSVF>
- Araújo, J. B. S. Lisboa, L. H. D. Mapeamento geológico da porção SW do município de Pio IX, Piauí e caracterização das ocorrências de cobre na Bacia Molássica de Carnaubinha. 2010. 150 p. Monografia (Graduação em Geologia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.
- Arthaud, M. H. Evolução Neoproterozóica do Grupo Ceará (Domínio Ceará Central, NE Brasil), da sedimentação à colisão continental brasileira. 2007. 170f. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 2007.
- Arthaud, M.H., Caby, R., Fuck, R.A., Dantas, E.L., Parente, C.V., 2008. Geology of the Northern Borborema Province, NE Brazil and its correlation with Nigeria, NW Africa. In: Pankhurst, R.J., Trouw, R.A.J., Brito Neves, B.B., de Wit, M.J. (Eds.), *West Gondwana: Pre-Cenozoic Correlations across the South Atlantic Region*, vol. 294. Geological Society of London, Special Publications, p. 49-67.
- Baranov, V. 1957. A new method for interpretation of aeromagnetic maps: pseudo-gravimetric anomalies. *Geophysics*, 22, p. 359-383. <https://doi.org/10.1190/1.1438369>
- Baranov, V., Naudy H. 1964. Numerical Calculation of the Formula of Reduction to the Magnetic Pole. *Geophysics*, 29, p. 67-79. <https://doi.org/10.1190/1.1439334>
- Barbosa, V.C.F., Silva, J.B.C., 2005, Deconvolução de Euler: passado, presente e futuro – um tutorial: *Revista Brasileira de Geofísica*, 23(3), p. 243-250.

Blakely, R.J. 1996. Potential theory in gravity and magnetic applications. Cambridge University Press, Cambridge, 441 p.

Brandão, R. L., Freitas, L. C. B. (Org.). Geodiversidade do estado do Ceará. Fortaleza: CPRM, 2014. 174 p. Programa Geologia do Brasil. Levantamento da Geodiversidade.

Berni, G.V., Parente, C.V., Lobato, L.M., Sampaio, C.C.F.T., Hagemann, F. 2019. The Metallogeny of Iron, copper and gold in the Borborema Province. 11th Inter-Guiana Conference focusing on the Tectonics & Resource Potential of NE South America, Paramaribo, Suriname, p. 31-34.

Blum, M.L.B., 1999. Processamento e interpretação de dados de geofísica aérea no Brasil Central e sua aplicação à geologia regional e à prospecção mineral. Tese, Instituto de Geociência, Universidade de Brasília, Brasília, 229 p.

Brito Neves, B.B., 1998. The Cambro-Ordovician of the Borborema Province. Boletim IG USP, Série Científica, 29, p. 175-193.

Brito Neves, B.B., Cordani, U.G., 1991. Tectonic evolution of South America during the late proterozoic. In: Stern, R.J., Van Schmus, W.R. (Eds.), Crustal Evolution in the Late Proterozoic, Precambrian Research, 53, p. 23-40.

Brito Neves, B. B., Schmus, W. R. V., Fetter, A. H. 2001. Noroeste da África – Nordeste do Brasil (Província Borborema) Ensaio comparativo e problemas de correlação. Revista do Instituto de Geociências – USP, v.1, p.59-78.

Brito Neves, B.B., Santos, E.J., Van Schmus, W.R., 2000. The tectonic history of the Borborema Province. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, D.A. (Eds.), International Geological Congress, Rio de Janeiro, Tectonic Evolution of South America, 31, p. 151-182.

Castro, D.L., Castelo Branco, R.M.G., 1999. Caracterização da arquitetura interna das bacias do Vale do Cariri (NE do Brasil) com base em modelagem gravimétrica 3-D. Revista Brasileira de Geofísica. 17 (2-3), p. 130-144.
<https://doi.org/10.1590/S0102-261X1999000200003>.

Castro, D.L. 2011. Gravity and magnetic joint modeling of the Potiguar Rift Basin (NE Brazil): Basement control during Neocomian extension and deformation. Journal of South American Earth Sciences, 31, p. 186-198.
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.01.005>

Castro, D.L., Fuck R.A., Phillips J.D., Vidotti R.M., Bezerra F.H.R., Dantas E.L. 2014. Crustal structure beneath the Paleozoic Parnaíba Basin revealed by airborne gravity and magnetic data, Brazil. Tectonophysics, 614, p. 128-145.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2013.12.009>

Cavalcante, J.C., 1999. Limites e evolução geodinâmica do sistema Jaguaribeano, província Borborema, Nordeste do Brasil. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 192 p.

Castro, D. L., 2005. Modelagem gravimétrica 3-d de corpos graníticos e bacias sedimentares com embasamento estrutural de densidade variável. *Revista Brasileira de Geofísica*, Rio de Janeiro/RJ, 23: n° 3, p. 295-308.

Cooper, G.R.J., 2002. An improved algorithm for the Euler deconvolution of potential field data. *The Leading Edge*, 21, p. 1197-1198. <https://doi.org/10.1190/1.1536132>

CPRM. 2010. Projeto Aerogeofísico Centro-Sudoeste do Ceará: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectométricos. Rio de Janeiro: Prospectors Aerolevantamentos e Sistemas, 190 p.

Dantas, E.L., Van Schmus, W.R., Hackspacher, P.C., Fetter, A.H., Brito Neves, B.B., Cordani, U., Nutman, A.P., Williams, I.S., 2004. The 3.4 e 3.5 Ga São Jose do Campestre massif, NE Brazil: remnants of the oldest crust in South America. *Precambrian Res.* 130, p. 113-137.

Delgado, I. M. et al. Geotectônica do Escudo Atlântico. In: BIZZI, L. A. et al. *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: Textos, Mapas & SIG*. Brasília: CPRM, 2003. p. 227-334.

Dentith M., Mudge S. 2014. *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*. Cambridge University Press, United Kingdom, 516 p. ISBN 978-0-521-80951-1

De Wit, M. J., Brito Neves, B. B., Trouw, R. A. J., Pankhurst, R.J., 2008. Pre-Cenozoic correlations across the South Atlantic region: the ties that bind. In: Pankhurst, R. J., Trouw, R. A. J., Brito Neves, B. B., De Wit, M. J. (Eds.), *West Gondwana: Pre-Cenozoic Correlations Across the Atlanti Region*. Geological Society, London, Special Publications 294, p. 1–8.

Ferreira, F.J.F., de Souza, J., Bongioiolo, A.B.S., Castro, L.G., Romeiro, M.A.T., 2010. Realce do gradiente horizontal total de anomalias magnéticas usando a inclinação do sinal analítico. Parte I – Aplicação a dados sintéticos. IV Simpósio Brasileiro de Geofísica.

Ferreira, F.J., de Souza, J., Bongioiolo, A.B.S., de Castro, L.G., 2013. Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using the tilt angle. *Geophysics* 78 (3), p. J33–J41. <https://doi.org/10.1190/geo2011-0441.1>.

Figueiredo, A.M., Raja-Gabaglia, G.P. 1986. Sistema classificatório aplicado às bacias sedimentares brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, 16(4): 350-369.

Garcia M.G.M., Parente C.V., Sousa R.R., Albuquerque Júnior, I.F. 2006. Controle estrutural de depósitos tipo IOCG: dados preliminares da Bacia do Jaibaras-CE, Província Borborema. In: 43º Congresso Brasileiro de Geologia. Aracajú, *Anais*, p. 353.

Geosoft, 2010. Filtragem montaj MAGMAP. Processamento de dados de campos potenciais no domínio da frequência. Extensão para o Oasis Montaj, v. 7.1. Tutorial e guia do usuário. Toronto, ON Canadá, 77 p.

Geosoft, 2013. Oasis Montaj 7.5 Mapping and Processing System. In: Quick Start Tutorials. Geosoft Incorporated, 258 p.

Geosoft. 2014. Oasis Montaj how- to Guide. Complete Workflow for Oasis Montaj. Toronto, Geosoft Incorporated, 260 p.

Geosoft. 2015. MAGMAP Filtering Guided Learning Path: Defining and Applying Filters and Inverse FFT in MAGMAP. Disponível em: http://updates.geosoft.com/downloads/files/how-to-guides/Applying_Filters_and_Inverse_FFT_in_MAGMAP.pdf. Acesso: 12 de setembro de 2021.

Geosoft. 2020. Tilt Derivative. Disponível em: https://help.seequent.com/Oasis-montaj/9.9/en/Content/gxhelp/t/tiltdrv_gx.htm. Acesso: 09 de janeiro de 2022.

GM-SYS. 2004. Gravity/magnetic Modeling Software: User's Guide Version 4.9. NGA Inc., 101 p.

Góes, A. M. O., Feijó, F. J., 1994. Bacia do Parnaíba. Boletim de Geociências da Petrobras, 8: p. 57-67.

Gomes J.R.C., Vasconcelos A.M. (org.). 2000. Jaguaribe SW (SB.24-Y), Estados do Ceará, Pernambuco e Piauí. Rio de Janeiro, CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 103 p.

Gomes J.R.C., Vasconcelos A.M., Torres P.F.M. 2000. Carta Geológica da Folha Jaguaribe SW (SB.24-Y), escala 1:500.000. Fortaleza, Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - PLGB, Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Minas e Metalurgia, CPRM - Serviço Geológico do Brasil.

Hasui, Y., 2012. Quadro Geral da Evolução Pré-Ordoviciano: A Conexão Brasil-África. In: Geologia do Brasil. Editora Beca, São Paulo, Brasil, p. 123-130.

Hinze W.J., Von Frese R.R.B., Saad A.H. 2013. Gravity and Magnetic Exploration – Principles, Practices and Applications. Cambridge, Cambridge University Press, 512 p.

Huhn, S.R.B., Justo, A.P., Souza Filho, C.R., Monteiro, L.V.S. 2011. Caracterização geológica do Prospecto de óxido de ferro-cobre-ouro (IOCG), Aurora, Ceará, Brasil. Revista Brasileira de Geociências. 41(3), p. 525-538.

Isles, D.J., Rankin, L.R. 2013. Geological Interpretation of Aeromagnetic Data. Austrália, Australian Society of Exploration Geophysicists, 357 p.

Jacques, P.D., Machado R., Oliveira R.G., Ferreira F.J.F., Castro L.G., Nummer A.R. 2014. Correlation of lineaments (magnetic and topographic) and Phanerozoic brittle structures with Precambrian shear zones from the basement of the Paraná Basin,

Santa Catarina State, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 44, p. 39-54.
<https://doi.org/10.5327/Z2317-4889201400010005>

Kearey P., Brooks M., Hill I. 2009. *Geofísica de Exploração. Oficina de Textos*, São Paulo, 438 p. ISBN 978-858623891-8

Leandro R., Cury L.F., Pierin A.R.H., Mancini F. 2011. Sensoriamento remoto aplicado a análise estrutural da faixa Araguaia – região de Guaraí-TO. In: *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Curitiba, p.3589-3596.

Luiz, J.G., Silva, L.M.C. 1995. *Geofísica de prospecção*. Universidade Federal do Pará. Belém, Editora Universitária, 311 p.

Maas, M.V.R., Oliveira, C.G., Pires, A.C.B., Moraes, R.A.V. 2003. Aplicação da Geofísica aérea na exploração mineral e mapeamento geológico do setor sudoeste do cinturão cuprífero Orós-Jaguaribe. *Revista Brasileira de Geociências*, 33(3), p. 279-288.

Maas, M. V. R. Integração de dados de geofísica aérea e geologia aplicada a exploração mineral no setor sudoeste do cinturão cuprífero Orós-Jaguaribe – Província Borborema. 2003. 77 f. Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

Mabessone, J. M. 2002. História Geológica da Província Borborema (NE Brasil). *Revista de Geologia da UFC*, v.15, p. 119-129.

Machado, M. A. 2006. Caracterização descritiva e genética de ocorrências cupro-hematíticas no setor sudoeste do Sistema Orós-Jaguaribe Província Borborema. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, 118 p.

Madrucci, V., Taioli, F., Araújo, C. C. 2015. Análise integrada de dados de sensoriamento remoto, geologia e geofísica no estudo de aquífero fraturado, Lindóia - SP. *Revista Brasileira de Geofísica* 23, p. 437-451. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2005000400007>

Marinho, F.A.V. Projeto Cobre Mandacaru: Polarização Induzida na Área de Mandacaru, PI. Rio de Janeiro: CPRM, 1981a.

Marinho, F.A.V. Projeto Cobre Mandacaru: Relatório de Magnetometria. Rio de Janeiro: CPRM, 1981b.

Martins Neto, M. A. 2006. Classificação de Bacias sedimentares: uma revisão comentada. *Revista Brasileira de Geociências*, 36(1), p. 165-179.

Medeiros, V.C. Evolução Geodinâmica e Condicionamento Estrutural dos Terrenos Piancó-Alto Brígida e Alto Pajeú, Domínio da Zona Transversal, NE do Brasil. 2004. Tese de Doutorado, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 200 p.

- Medeiros, J.V.F., Paula, R. N. 2019. Mapeamento geológico da Bacia Catolé-São Julião e suas ocorrências de cobre, Piauí-Brasil. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 130 p.
- Mendonça, J.C.G., Braga A.P.G. 1987. As faixas Vulcano-sedimentares de Orós e Jaguaribe: um greenstone belt. *Revista Brasileira de Geociências*, 17(3), p. 255-241. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1987225241>
- Moro, P.S., Vidotti, R.M., Dantas, E.L. 2018. Structural framework from gravity and magnetic data in the paleo/mesoproterozoic Araí rift-sag Basin, Central Brazil. *Geophysics*, 83, p. B195-B207. <https://doi.org/10.1190/geo2017-0627.1>
- Musset, A.E., Khan, M.A. (2000) *Looking into the Earth: An Introduction to Geological Geophysics*. Cambridge University Press, London, p. 139-198. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511810305>
- Nabighian, M.N., 1972. The analytical signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics* 37, p. 507-517.
- Nabighian, M.N. 1984. Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: Fundamental relations. *Geophysics*, 49, p. 780-786. <https://doi.org/10.1190/1.1441706>
- Oliveira, R. G. de. 2008. Arcabouço geofísico, isostasia e causas do magmatismo cenozóico da Província Borborema e de sua margem continental (Nordeste do Brasil). Tese de Doutorado - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 415 p.
- Oliveira, K.M.L. 2016. Integração de dados geofísicos (magnetometria, gravimetria e magnetotelúrico) na borda Nordeste da Bacia do Parnaíba, NW do Ceará, Brasil. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 110 p.
- Oliveira, K.M.L., Castro D.L., Castelo Branco R.M.G., Oliveira D.C., Alvite E.N.C., Jucá C.C.A., Castelo Branco J.L. 2018. Architectural framework of the NW border of the onshore Potiguar Basin (NE Brazil): An aeromagnetic and gravity based approach. *Journal of South American Earth Sciences*, 88, p. 700-714. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.10.002>
- Osako, L.S., Castro D.L., Fuck R.A., Castro N.A., Pitombeira J.P.A. 2011. Contribuição de uma seção gravimétrica transversal ao estudo da estruturação litosférica na porção setentrional da Província Borborema, NE do Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*, 29, p. 309-329. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2011000200008>
- Parente, C.V., 1984. Geologia da Mineralização de Cobre de Mandacaru-PI. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, 203 p.

- Parente, C.V., Arthaud M. 1995. O Sistema Orós-Jaguaribe no Ceará, NE do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 25, p. 197-306. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1995297306>
- Parente C.V., Fuck R.A. 1987. Geologia da Ocorrência de Cobre de Mandacaru (PI). *Revista Brasileira de Geociências*, 17, p. 21-32. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.19872132>
- Parente, C.V., Fuck R.A., Macambira M.J.B., Provost A. 1986. Características Petroquímicas e Geocronológicas do Granito Mandacaru (PI). *Revista Brasileira de Geociências*, 16, p. 266-273. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1986266273>
- Parente, C.V., Filho, W.F.S., Almeida, A.R., 2004. Bacias do Estágio de Transição do Domínio Setentrional da Província Borborema. In: *Geologia Do Continente Sul Americano. Evolução da Obra de Fernando F. M. Almeida*, Cap, vol. XXIX. Editora Beca, São Paulo, Brasil, pp. 524-536.
- Parente, C.V., Botelho N.F., Santos R.V., Garcia M.G.M., Oliveira C.G., Veríssimo C.U.V. 2011. Contexto geológico, tipológico e geoquímico isotópico das brechas hidrotermalizadas de ferro e cobre tipo IOCG associadas à bacia Eo-paleozóica Jaibaras, da província Borborema, Brasil. In: Frants J.C., Marques J.C., Hardy J. (eds.). *Contribuições à Metalogenia do Brasil*, Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 175-197
- Pedrosa, Jr, N.C., Vidotti, R.M., Fuck, R.A., Oliveira, K.M.L., Branco, R.M.G.C., 2015. Structural framework of the Jaibaras Rift, Brazil, based on geophysical data. *Journal of South American Earth Sciences*, 58, p. 318-334. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.07.005>
- Pedrosa, Jr. N.C., Vidotti R.M., Fuck R.A., Castelo Branco R.M.G., Almeida A.R., Silva N.C.V., Braga L.R.C. 2017. Architecture of the intracontinental Jaibaras Rift, Brazil, based on geophysical data. *Journal of South American Earth Sciences*, 74, p. 27-40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2016.12.012>
- Pfaltzgraff, P. A. S., Torres, F. S. M., Brandão, R. L. Geodiversidade do estado do Piauí. Recife: CPRM, 2010. 136 p. Programa Geologia do Brasil. Levantamento da Geodiversidade.
- Pinto M.L., Vidotti R.M. 2019. Tectonic framework of the Paraná basin unveiled from gravity and magnetic data. *Journal of South American Earth Sciences*, 90, p. 216–232. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.12.006>
- Rao, B. N, Ramakrishna, P., Markandeyulu, A., 1995. GMINV: A computer program for gravity or magnetic data inversion. *Computers e Geosciences*, 21(2), 301-319.
- Reeves, C. 2005. *Aeromagnetic Surveys: Principles, Practice & Interpretation*. Delft, Geosoft, 155 p.

Reid, A.B., Allsop, J.M., Granser, H., Millet, A.J., Somerton, I.W., 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics* 55, p. 80-91

Reynolds, J.M. 2011. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. West Sussex, John Wiley & Sons, 710 p.

Ribeiro, F.B., Molina, E.C. 2018. *Geofísica: Uma breve introdução*. Editora da Universidade de São Paulo – Edusp, São Paulo, 320 p. ISBN 8531416833.

Salem, A., Williams, S., Fairhead, D., Smith, R., Ravat, D. 2008. Interpretation of magnetic data using tilt-angle derivatives. *Geophysics*, 73(1): p. L1-L10. <https://doi.org/10.1190/1.2799992>

Santos, T. J. S. et al. 2004. Structural and geochronological studies of the Médio Coreau Domain, NE Brazil: Constraints on Brasiliano/Pan-African tectonic evolution in the NW part of the Borborema Province. *Journal of the Virtual Explorer*, v.17, n. 9, p. 9.

Santos Filho, F.F.B., Magini C., Chiozza S.G., Castelo Branco R.M.G. 2021. The Architecture of the Eopaleozoic Cococi Basin, northeastern Brazil: 2D geological modelling from magnetic and gravimetric data. *Journal of South American Earth Sciences*, 106:102903. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102903>

Saraiva, C.E.R., Rodrigues T.F. 2018. *Mapeamento geológico e petrografia das ocorrências de cobre da Bacia de Carnaubinha, Pio IX-PI. Trabalho de Conclusão de Curso*, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 121 p.

Sawatzky, D.L., Raines, G.L., Bonham-Carter, G.F., and Looney, C.G., 2010, *Spatial Data Modeller (SDM): ArcMAP 9.3 geoprocessing tools for spatial data modelling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural networks*.

Schobbenhaus, C., Brito Neves, B.B., *A Geologia do Brasil no Contexto da Plataforma Sul-Americana*. In: *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: Texto, Mapas & Gis*. Bizzi, L.A., Schobbenhaus, C., Vidotti, R.M., Gonçalves, J.H. Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, v.1, p. 5-25, 2003. ISBN 85-230-0790-3.

Schobbenhaus, C; Campos, D. A. 1984. *A evolução da Plataforma SulAmericana no Brasil e suas principais concentrações minerais*. In: Schobbenhaus C., Campos, D.A., Derze, G.R. & Asmus, H.E. (eds) *Geologia do Brasil*. Ministério das Minas e Energia/Departamento Nacional da Produção Mineral, Brasília, p. 9-53.

Spector, A., Grant, F.S., 1970. Statistical methods for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics* 35 (2), p. 293–302. <https://doi.org/10.1190/1.1440092>.

Silva, A. J. P., Lopes, R. C., Vasconcelos, A. M., Bahia, B. C. *Bacias Sedimentares Paleozóicas e Meso-Cenozóicas Interiores*. In: *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: Texto, Mapas & Gis*. Bizzi, L.A., Schobbenhaus, C., Vidotti, R.M., Gonçalves, J.H. Brasília: CPRM, 2003. p. 55-85.

Talwani M., Heirtzler J.R. 1964. Computation of magnetic anomalies caused by two dimensional bodies of arbitrary shape. In: Parks G.A. (ed.). Computers in the Mineral Industries, Part 1, 9, California, Stanford University Publications, p. 464-480.

Talwani M., Worel J.L., Landisman M. 1959. Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone. *Journal of Geophysical Research*, 64, p. 49-59.
<https://doi.org/10.1029/JZ064i001p00049>

Teixeira, A.L., 2000. Análise das bacias da transição Proterozoico-Fanerozoico do Estado de São Paulo e adjacências. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo. 158 p.

Teixeira, A.L., Gaucher, C., Paim, P.S.G., Fonseca, M.M., Parente, C.V., Silva Filho, W.F., Almeida, A.R., 2004. Bacias do estágio da transição da Plataforma Sul-Americana. In: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C.D.R., Brito-Neves, B.B.B. (Eds.), *Geologia do Continente Sul-Americano. Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, p. 487-536.

Telford, W.M., Geldart, F.E.M., Sheriff, R.E., 1990. *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, USA, 2 (3), p. 62-64.

Thompson D.T. 1982. EULDPH: A new technique for making computer assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, 47, p. 31-37.
<https://doi.org/10.1190/1.1441278>

Trompette, R. 1994. *Geology of Western Gondwana (2000 - 500Ma). PanAfrican-Brasiliano aggregation of South America and Africa*. Rotterdam:Balkema. p. 350.

Uchoa, E.B. 2016. Integração de Dados Multifonte com base em Lógica Fuzzy na modelagem prospectiva do depósito de ferro de Quiterianópolis/CE. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 118 p.

Van Schmus, W.R., Brito Neves, B.B., Hackspacher, P., Babinski, M. 1995. U/P band Sm/Nd geochronologic studies of the Eastern Borborema Province, Northeastern Brazil: initial conclusions. *Journal of South American Earth Sciences*, 8, p. 267-288.

Vaz, P. T. et al. 2007. Rio de Janeiro, *Boletim de Geociências da Petrobrás*, v. 15, n.1, p. 253-263.

Vasconcellos, R. M. D., Metelo, M. J., Motta, A. C., Gomes, R. D. 1994. *Geofísica em levantamentos geológicos no Brasil*. CPRM, Rio de Janeiro. 172 p.

Veríssimo C.U.V., Parente, C., V., Melo, O. O., Silva Filho, W., F. 2014. Carta Geológica: folha Pio IX: DB.24-Y-A-VI. CPRM – Serviço Geológico do Brasil.

Veríssimo C.U.V., Santos R.V., Parente C.V., Oliveira C.G., Cavalcanti J.A.D., Nogueira Neto J.A. 2016. The Itataia phosphate-uranium deposit (Ceará, Brazil) new petrographic, geochemistry and isotope studies. *Journal of South American Earth Sciences*, 70, p. 115-144. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.05.002>

Virgens Neto, J., 2017. Geologia e recursos minerais da folha Fronteiras: SB.24-Y-C-II,I estados do Piauí, Pernambuco e Ceará. Teresina: CPRM. Escala 1:100.000.

Won I.J., Bevis M. 1987. Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon: algorithms and Fortran subroutines. *Geophysics*, 52, p. 232-238.
<https://doi.org/10.1190/1.1442298>

APÊNDICE A – LISTA DE FIGURAS DOS ARTIGOS

ARTIGO 1

Figure 1 - General characterization of the Catolé-São Julião Basin. (a) Location of the study area, (b) Simplified map of BP, highlighting the RGND and the study area, (c) Geology 1:25,000 scale of the Catolé-São Julião Basin and surroundings. OSZ - Orós Shear Zone; JSZ - Jaguaribe Shear Zone; PASZ - Portalegre Shear Zone. Source from: Gomes et al., (2000); Veríssimo et al., (2016); Virgens Neto (2017); Medeiros e Paula (2019)..... 52

Figure 2 - Processing of magnetic and gravity data. Highlight for the integration of results with information from remote sensing and geology. MA - Magnetic Anomaly, RTP - Reduction to the Pole, ASA - Analytic Signal Amplitude, TAHG - Tilt Angle of the Total Horizontal Gradient, RGB - Red/Green/Blue.....54

Figure 3 - Geophysical data used. (a) Location of the Centro-Sudoeste do Ceará project, and (b) Distribution of the gravity stations.55

Figure 4 - Aeromagnetic products and interpretations. (a) Magnetic anomaly map, (b) Reduction to the Pole, (c) Analytic Signal Amplitude - RTP, (d) Tilt Angle of the Total Horizontal Gradient - RTP, (e) Magnetic Lineament interpretation, (f) Magnetic Domain interpretation, and (g) Rose diagrams calculated for the magnetic lineaments, general and by domain. The black square polygon refers to the area with geological information presented in Fig.1c.....60

Figure 5 - Correlation between 3D Euler solutions and geological data. (a) Euler solutions with estimated depths, and (b) Compilation of previous geological structures (Gomes et al., 2000; Virgens Neto, 2017). The black square polygon refers to the area with geological information presented in Fig.1c.....61

Figure 6 - Morphostructural lineaments (a) Extracted from DEM-Alos Palsar; e b) Rose diagrams calculated for the morphostructural lineaments, total and by previously interpreted magnetic domains (MD). The black square polygon refers to the area with geological information presented in Fig.1c.....63

Figure 7 - Radially Average Power Spectrum of the magnetic anomaly. Each segment marked with a color represents a distinct depth from the top of the magnetic causative sources, highlighted by the MA product. The equations in different colors refer to the linear regressions used for each line, where R^2 is the coefficient of determination. The closer to one, the better the linear regression.65

Figure 8 - Analytic Signal Amplitude maps of the data in Figure 7. (a) Shallow, (b) Intermediate, (c) Deep, and d) Ternary composition of the data in (a), (b) and (c). The black square polygon refers to the area with geological information presented in Fig.1c.....66

Figure 9 - 2D Euler solutions obtained through Analytical Signal Amplitude (black) and residual gravity data (red). (a) Transect T1, (b) Transect T2, and (c) Transect T3. The

information at the top refers to the geological interpretations executed, along with information from existing structures.68

Figure 10 - 2D gravity modeling. (a) Transects T1, (b) T2, and (c) T3. See the location of the profiles in Fig 3b.70

Figure 11 – Geological models obtained from the interpretation of gravity and magnetic data, and geological information. (a) T1, (b) T2, (c) T3, and (d) Perspective view of the three transects.72

ARTIGO 2

Figure 1 - Carnaubinha Basin geological contextualization. (a) study area localization, (b) BP domains, (c) BP simplified map, highlighting the RGND and the Carnaubinha Basin, (d) Local geological data integration, on a 1:25000 scale (black square area), 1:100000 and 1:500000. OSZ - Orós Shear Zone; JSZ - Jaguaribe Shear Zone; PASZ - Portalegre Shear Zone. Database: Gomes et al. (2000); Medeiros, 2004; Veríssimo et al. (2014); Veríssimo et al. (2016); Saraiva and Rodrigues (2018); Berni et al. (2019).84

Figure 2 - Magnetic and gravity data processing. The data were integrated with existing geologic-structural information and remote sensing data (morphostructural lineaments). MA – Magnetic Anomalies, RTP – Reduction to the Pole, ASA – Analytic Signal Amplitude, TAHG – Tilt Angle of the Total Horizontal Gradient, RGB – Red/Green/Blue.....85

Figure 3 - Geophysical data localization. (a) Centro-Sudoeste do Ceará Project and (b) Distribution of the gravity stations acquired in the study area. The black square refers to the area with geological information on a 1:25000 scale. SZ - Shear Zone. Database: Gomes et al. (2000); Veríssimo et al. (2014); Saraiva and Rodrigues (2018).86

Figure 4 - Aeromagnetic products and interpretations generated. (a) Magnetic Anomaly map; (b) Reduction to the Pole (RTP); (c) Analytic Signal Amplitude - RTP; (d) Tilt Angle of the Total Horizontal Gradient - RTP; (e) Interpreted Magnetic lineaments; (f) Interpreted Magnetic Domains; and (g) Rosette Diagrams calculated for the magnetic lineaments, in general, and by domains. The black square refers to the area with geological information on a 1:25000 scale, as presented in Fig. 1d and 3b.....90

Figure 5 - Depth estimates of the magnetic sources. (a) 3D Euler Deconvolution, and (b) Tilt angle. The depths (colored circles) were classified at the same intervals. The black square refers to the area with geological information, on a 1:25000 scale, as presented in Fig. 1d and 3b.....91

Figure 6 - Distribution of the morphostructural lineaments (a) Extracted from the Alos Palsar's DEM (b) Rosette diagrams calculated for the morphostructural lineaments, general and separated according to the magnetic domains (MD) previously interpreted.

- The black square refers to the area with geological information, on a 1:25000 scale, as presented in Fig. 1d and 3b.94
- Figure 7 - Radially averaged power spectrum of the magnetic anomaly. Each colored segment represents a different depth interval of the magnetic source's top, which is highlighted by the MA product. The various colored equations refer to the linear regression used for each segment, where R^2 is the determination coefficient. The closer to 1, the better the linear regression fit.....95
- Figure 8 - Analytic Signal Amplitude maps of the data in Figure 7. (a) Shallow, (b) Intermediate, (c) Deep, and (d) Ternary composition of the data in (a), (b) and (c). The black square refers to an area with geological information presented on a 1:25000 scale, in Fig. 1d and 3b.....96
- Figure 9 - 2D Euler profiles obtained from the Analytic Signal Amplitude (black) and data from the residual Gravity (red). (a) T1 Transect, (b) T2 Transect, (c) T3 Transect. The information on top refers to the geological information and existing structures. See profile localizations in Fig. 3b.99
- Figure 10 - Profile T4 Euler 2D obtained through the Analytic Signal Amplitude (black) and residual gravity data (red). The information on top refers to the geological information and existing structures. See profile localizations in Fig. 3b.....100
- Figure 11 - T1 Transect. (a, b) 2D gravity modelling, and (c) Geological model obtained from the gravity data interpretation and magnetic and geological information.....102

APÊNDICE B – LISTA DE TABELAS DOS ARTIGOS**ARTIGO 1**

Table 1 - Density values used for 2D gravity modeling. The values were chosen based on the bibliography.....58

ARTIGO 2

Table 1 - Centro-Sudoeste do Ceará Aerogeophysical Project, according to its technical report (CPRM, 2010).....86

Table 2 - Density values used for 2D gravity modelling of the T1 Transect. The adopted values were based on the bibliography89

ANEXO A – RELATÓRIO DE PROCESSAMENTO DOS DADOS PLANIALTIMÉTRICOS (PPP - IBGE)



Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Relatório do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP)

Sumário do Processamento do marco: pt12

Início: AAAA/MM/DD HH:MM:SS,SS	2021/10/24 17:00:56,00
Fim: AAAA/MM/DD HH:MM:SS,SS	2021/10/24 17:11:27,40
Modo de Operação do Usuário:	ESTÁTICO
Observação processada:	CÓDIGO & FASE
Modelo da Antena:	TRMR10 NONE
Órbitas dos satélites: ¹	FINAL
Frequência processada:	L3
Intervalo do processamento(s):	0,20
Sigma² da pseudodistância(m):	5,000
Sigma da portadora(m):	0,010
Altura da Antena³(m):	2,000
Ângulo de Elevação(graus):	10,000
Resíduos da pseudodistância(m):	1,10 GPS 1,80 GLONASS
Resíduos da fase da portadora(cm):	0,75 GPS 0,89 GLONASS

Coordenadas SIRGAS

	Latitude(gms)	Longitude(gms)	Alt. Geo.(m)	UTM N(m)	UTM E(m)	MC
Em 2000.4 (É a que deve ser usada) ⁴	-7° 04' 13,0309"	-40° 50' 32,7858"	370,75	9218078.366	296496.914	-39
Na data do levantamento ⁵	-7° 04' 13,0228"	-40° 50' 32,7882"	370,75	9218078.614	296496.840	-39
Sigma(95%)⁶ (m)	0,017	0,050	0,043			

Coordenada Altimétrica

Modelo:	hgeoHNOR_IMBITUBA	
Fator para Conversão (m):	-12,52	Incerteza (m): 0,08
Altitude Normal (m):	383,27	

Precisão esperada para um levantamento estático (metros)

Tipo de Receptor	Uma frequência		Duas frequências	
	Planimétrico	Altimétrico	Planimétrico	Altimétrico
Após 1 hora	0,700	0,600	0,040	0,040
Após 2 horas	0,330	0,330	0,017	0,018
Após 4 horas	0,170	0,220	0,009	0,010
Após 6 horas	0,120	0,180	0,005	0,008

¹ Órbitas obtidas do International GNSS Service (IGS) ou do Natural Resources of Canada (NRCAN).

² O termo "Sigma" é referente ao desvio-padrão.

³ Distância Vertical do Marco ao Plano de Referência da Antena (PRA).

⁴ A coordenada oficial na data de referência do Sistema SIRGAS, ou seja, 2000.4. A redução de velocidade foi feita na data do levantamento utilizando o modelo VEMOS em 2000.4.

⁵ A data de levantamento considerada é a data de início da sessão.

⁶ Este desvio-padrão representa a confiabilidade interna do processamento e não a exatidão da coordenada.

Os resultados apresentados neste relatório dependem da qualidade dos dados enviados e do correto preenchimento das informações por parte do usuário. Em caso de dúvidas, críticas ou sugestões contate: ibge@ibge.gov.br ou pelo telefone 0800-7218181. Este serviço de posicionamento faz uso do aplicativo de processamento CSRS-PPP desenvolvido pelo Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada (NRCAN).

Processamento autorizado para uso do IBGE.

ANEXO B – PUBLICAÇÕES RELACIONADAS COM A PRESENTE PESQUISA



Preliminary Interpretation of the Structural Framework of the Catolé-São Julião Basin, Piauí, Brazil.

Claudia Estefani Rodrigues Saraiva¹, Maximilian Fries^{1,2} e Karen Maria Leopoldino Oliveira³

¹ Universidade Federal do Paraná – UFPR; ² Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA; ³ Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN

Copyright 2021, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica.

This paper was prepared for presentation during the 17th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 16-19 August 2021. Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 17th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

Sedimentary basins have great economic importance once they have presented favorable conditions for the concentration of mineral resources. In the Borborema Province (BP), Northeastern Brazil, there are several basins of Cambro-Ordovician age. They are characterized by presenting a strong structural control, an intense hydrothermal alteration, as well as the presence of disseminated sulfides, leading different authors to classify such mineralization as similar to a world-class IOCG deposits. However, despite the seeming importance, many of these basins do not have information regarding the geological-structural framework. The aim of this work is to contribute to the knowledge of the subsurface geology of the Catolé-São Julião Basin based on information from aeromagnetic data. This Basin is located in the Rio Grande do Norte Domain, close to the Parnaíba Basin. The magnetic data used in this work is related to the Center-Southwestern of Ceará project (Code No. 1101), made available by the Geological Survey of Brazil - CPRM. Initially, the data were organized and interpolated into regular square meshes with a 125-meter cell using the bi-directional method to produce the map of magnetic anomalies (MA). Then, enhancement techniques were applied, enabling a qualitative analysis, as well as Euler's Deconvolution, aiming to estimate the depth of the magnetic sources (quantitative analysis). The magnetic lineaments were interpreted through the Tilt Angle of the Total Horizontal Derivative (TAHG), reflecting a main NE-SW direction. Based on these lineaments and the magnetic variation presented by the Analytic Signal Amplitude (ASA) it was possible to divide the area into four Magnetic Domains (MDs). The MD1 is located in the N-NE portion of the area and is represented by lineaments of main direction N68°E, high values of amplitude, and predominance of Euler's solutions of up to 500m. This domain is defined by the rocks of the Orós Group. MD2 is located in the center-west portion of the area and shows a predominance of low to intermediate magnetic values (<~ 0.50 nT/m), with no significant variations, lineaments oriented to N80°E, and scarce Euler's solutions with low depth (<500m). They correspond, in particular, to Granite Mandacaru. MD3 is in the southeastern portion of the area and has a heterogeneous character, with intermediate values (<~ 0.80 nT/m), lineaments in the N55°E direction, and low depth for Euler's solutions (in the order of 200m). This domain is associated with gneissic rocks of the São Nicolau Complex. MD4 occurs in the western portion of the area, with a predominance of low values (<~ 0.040 nT/m), lineaments in the N70°E direction, and Euler's solutions with high depth (maximum in the order of 1,580 m). In this domain, there are rocks of the Serra Grande Group (Parnaíba Basin), the sedimentary units of the Catolé-São Julião Basin, and a small portion of the Mandacaru Granite. The use of magnetic data was fundamental for a preliminary recognition of the geological-structural framework of the study area and as a basis for the next stage, which consists of terrestrial gravimetric profiles acquisition.

Keywords: Magnetometry; Euler Deconvolution; Lineaments; Catolé-São Julião Basin.

Journal of Applied Geophysics
CONTRIBUTION TO THE KNOWLEDGE OF THE STRUCTURAL FRAMEWORK OF
THE CATOLÉ-SÃO JULIÃO BASIN, BRAZIL, BASED ON GRAVITY AND MAGNETIC
DATA
 --Manuscript Draft--

Manuscript Number:	APPGEO-D-22-00570
Article Type:	Research Paper
Section/Category:	Potential field methods, gravity and magnetic models
Keywords:	Potential methods; Geophysical Mapping; Geophysical Lineaments; Euler Deconvolution; Gravity Modeling; Transitional-Stage Basins
Corresponding Author:	Claudia Estefani Rodrigues Saraiva, Geologist Federal University of Parana Curitiba, Parana BRAZIL
First Author:	Claudia Estefani Rodrigues Saraiva, Geologist
Order of Authors:	Claudia Estefani Rodrigues Saraiva, Geologist Maximilian Fries, Doctor, Geophysicist, Associate professor Karen Maria Leopoldino Oliveira, Doctor, Geologist, Assistant Professor
Abstract:	<p>The Catolé-São Julião basin, northeast of Brazil, has a temporal relationship with the end of the Brasiliano Orogeny. During the Ediacaran and the Ordovician ages, there was the formation of several intracontinental rifts, called Transitional-stage Basins. In the Borborema Province (BP), these basins are characterized by having a solid structural control, being located close to the shear zones, an intense hydrothermal alteration, and the presence of disseminated sulfides leading different authors to classify such mineralizations as similar to Iron-Oxide-Copper-Gold (IOCG) deposits. However, despite the apparent importance, many of these basins do not have information regarding the geological-structural framework. Therefore, from the integration of aeromagnetic and terrestrial gravity methods, it was possible to perform a characterization of the subsurface geology of the Catolé-São Julião basin and its surroundings. Geophysical lineaments with the main direction of NE-SW were interpreted, supported by morphostructural features extracted from the DEM image. Through 2D and 3D Euler deconvolution, the depth of geophysical sources was identified, helping to define geological contacts and extension of discontinuities. The area was divided into four distinct Magnetic Domains (MDs), which showed a good correlation with the geological data. In addition, a 2D gravity modeling was carried out along three transects, which allowed the analysis of the internal geometry of the basin and its depth, which reached maximums in the order of 550 meters. Thus, the study provided the generation of new results, since there are no geophysical works published focusing on the basin, which can help in future research.</p>