



Universidade de Brasília

Instituto de Geociências

Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica

Modelo Geofísico-Geológico do Bloco Crustal Cavalcante-Natividade e Região Limítrofe: Porção Nordeste da Província Tocantins e Margem Ocidental do Cráton do São Francisco

Arthur Chornobay

Dissertação de Mestrado

Nº 221

Orientadora: Prof. Dra. Adriana Chatack Carmelo (UnB)

Coorientador: Prof. Dr. José Eduardo Pereira Soares (UnB)

Dezembro de 2023



Universidade de Brasília

Instituto de Geociências

Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica

Modelo Geofísico-Geológico do Bloco Crustal Cavalcante-Natividade e Região Limítrofe: Porção Nordeste da Província Tocantins e Margem Ocidental do Cráton do São Francisco

Arthur Chornobay

Dissertação de Mestrado

Nº 221

Banca Examinadora: Prof. Dr. José Elói Guimarães Campos (UnB)

Dra. Loiane Gomes de Moraes (Serviço Geológico do Brasil)

Prof. Dr. Reinhardt Adolfo Fuck (UnB) - Suplente

Dezembro de 2023

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

CC551m Chornobay, Arthur
Modelo Geofísico-Geológico do Bloco Crustal
Cavalcante-Natividade e Região Limítrofe: Porção Nordeste da
Província Tocantins e Margem Ocidental do Cráton do São
Francisco / Arthur Chornobay; orientador Adriana Chatack
Carmelo; co-orientador José Eduardo Pereira Soares. --
Brasília, 2023.
82 p.

Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) --
Universidade de Brasília, 2023.

1. Bloco Cavalcante-Natividade. 2. Gravimetria Terrestre.
3. Aeromagnetometria. 4. Inversão de Dados Potenciais 3D. 5.
Petrofísica. I. Carmelo, Adriana Chatack, orient. II.
Soares, José Eduardo Pereira, co-orient. III. Título.

Referência Bibliográfica

Chornobay, A. Modelo Geofísico-Geológico do Bloco Crustal Cavalcante-Natividade e Região Limítrofe: Porção Nordeste da Província Tocantins e Margem Ocidental do Cráton do São Francisco. 2023. 82p. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas e Geodinâmica) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.

Cessão de direitos

NOME DO AUTOR: Arthur Chornobay

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Modelo Geofísico-Geológico do Bloco Crustal Cavalcante-Natividade e Região Limítrofe: Porção Nordeste da Província Tocantins e Margem Ocidental do Cráton do São Francisco.

Autorizo a Universidade de Brasília a reprodução parcial ou total desta dissertação de mestrado por meio eletrônico, impressão e/ou *download*, para fins de pesquisa e produção científica brasileira.

Com obrigatoriedade de citação da obra.

Grau: Mestre Ano: 2023.

*“Só se pode alcançar um grande êxito
Quando nos mantemos fiéis a nós mesmos”*

(Friedrich Nietzsche)

Agradecimentos

Gostaria primeiramente de agradecer minha família que sempre me apoiou e incentivou a fazer o mestrado.

Agradeço imensamente minha orientadora Profa. Dra. Adriana Chatack Carmelo, que me convidou a fazer o mestrado. Quando não consegui o primeiro ingresso no Programa de Pós-Graduação ela me deu forças e acreditou que seria possível. Tivemos uma jornada difícil durante a realização desta pesquisa, mas quando mais precisei ela me estendeu a mão e me reergueu. Hoje vejo que construímos um trabalho incrível juntos.

Também agradeço meu coorientador Prof. Dr. José Eduardo Pereira Soares, que me recebeu de braços abertos como aluno no primeiro semestre da Pós-Graduação. Sempre estive disposto a me ajudar a discutir os produtos e acrescentar informações relevantes na pesquisa.

Nesta história também temos “semi-coorientadores” que ajudaram muito no desenvolvimento desta Dissertação, e meu agradecimento eterno vai para: Darby Pereira Dantas de Lima, que é um amigo o qual admiro muito, tu é o cara! Sempre estive disposto a ajudar e sanar dúvidas; Alice Louzada Costa Carvalhêdo, que é uma amiga e “contemporânea” deste semestre da Pós, que também sempre me ajudou imensamente; Renato Borges Bernardes, um amigo também, que nunca tinha tempo ruim para me ajudar a resolver os problemas que apareciam. Gostaria de agradecer o Prof. Dr. José Elói Guimarães Campos, que me acompanhou em uma das saídas de campo para coleta de amostra, serei eternamente grato; o Prof. Dr. Nilson Francisquini Botelho, que sempre estive disposto a ajudar e elucidar informações acerca da geologia da área de estudo.

Não poderia faltar um agradecimento especial para pessoas que são especiais e importantíssimas pra mim. Obrigado, Gabriela; Piemonte; Gustavo; Caio; Macedo; Bauer; e muitos outros que poderia ficar aqui citando até...

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica pelo crescimento profissional e pessoal. Obrigado CAPES/CNPq por fornecer bolsa de estudo permitindo a realização desta pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Fica meu “Muito Obrigado” para quem me ajudou nesta árdua jornada.

Resumo

Esta dissertação utiliza dados geofísicos potenciais, gravimétricos e magnetométricos, e dados petrofísicos, densidade e susceptibilidade magnética, para a caracterização geofísico-geológica do Bloco Cavalcante-Natividade. O bloco está localizado na Porção Centro-Norte da Província Tocantins, mais especificamente na Porção Nordeste da Faixa Brasília Setentrional. A região limítrofe é compreendida como Faixa Brasília Externa, Cráton do São Francisco, Maciço de Goiás, Arco Magmático de Mara Rosa e Bacia do Parnaíba. A área de estudo apresenta relevante interesse econômico e compreender a geotectônica da região é importante. A geofísica é uma importante ferramenta para a compreensão da geotectônica, uma vez que utiliza métodos indiretos de investigação em subsuperfície. Os levantamentos gravimétricos e magnetométricos, de natureza terrestre e aérea, respectivamente, fornecem dados da crosta terrestre a partir das respostas de densidade e susceptibilidade magnética. O principal objetivo desta pesquisa foi caracterizar o Bloco Cavalcante-Natividade com modelos 3D de densidade e susceptibilidade magnética oriundos dos dados gravimétricos e magnetométricos, respectivamente. Para validação dos dados, foram analisadas e discutidas assinaturas petrofísicas de rochas representativas da região coletadas em trabalhos de campo. Com isso, esta pesquisa mostra a correlação das assinaturas geofísicas com as geológicas, com a interpretação de zonas de sutura nos limites de unidades geotectônicas, apresentação de sistemas de falhas e/ou zonas de cisalhamento e proposição de corpos não aflorantes. Assim a integração das informações geológicas e petrofísicas aos modelos de inversão 3D, contribui com o conhecimento do arcabouço geotectônico e dos processos tectono-magmáticos da litosfera na região.

Palavras-chave:

Bloco Cavalcante-Natividade, Gravimetria Terrestre, Aeromagnetometria, Inversão de Dados Potenciais 3D, Densidade, Susceptibilidade Magnética.

Abstract

This dissertation uses potential, gravimetric and magnetometric data, and petrophysical data, density and magnetic susceptibility, for the geophysical-geological characterization of the Cavalcante-Natividade Block. The block is located in the Central-North portion of the Tocantins Province, more specifically in the Northeast portion of the Northern Brasília Belt. The bordering region is understood as the São Francisco Craton, Goiás Massif, Mara Rosa Magmatic Arc, External Brasília Belt and Parnaíba Basin. The study area is of relevant economic interest and understanding the geotectonics of the region is important. Geophysics is an important tool to help understand geotectonics, since it uses indirect subsurface research models. The gravimetric and magnetometric data, terrestrial and aerial, respectively, provide the signature of the earth's crust from the density and magnetic susceptibility responses. The main objective of this research is to characterize the Cavalcante-Natividade Block with 3D models of density and magnetic susceptibility from gravimetric and magnetometric data, respectively. For data validation, on the surface, the petrophysical signatures of the rocks collected in field work are displayed. Thus, this research shows the dynamics of geophysical signatures with geological ones, with the definition of suture zones at the limits of geotectonic units, presentation of fault systems and/or shear zones and proposition of non-outcropping bodies. Thus, this dissertation, with the integration of geological and petrophysical information to the 3D inversion models, aims to contribute to the knowledge of the geotectonic framework and tectono-magmatic processes of the lithosphere in the region.

Keywords

Cavalcante-Natividade Block, Terrestrial Gravimetry, Aeromagnetometry, 3D Potential Data Inversion, Density, Magnetic Susceptibility.

Sumário

1. Introdução	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Localização da Área de Estudo	3
2. Contextos Geológico e Geofísico Regionais	4
2.1 Geologia	4
2.1.1 Província Tocantins	5
2.1.2 Cráton do São Francisco	11
2.2 Geofísica Regional	12
2.2.1 Província Tocantins	14
2.2.2 Cráton do São Francisco	19
3. Fundamentação Teórica	21
3.1 Método Magnetométrico	21
3.2 Método Gravimétrico	25
4. Natureza dos Dados e Metodologia	28
4.1 Natureza dos Dados	28
4.1.1 Dados Aéreos	28
4.1.2 Dados Terrestres	30
4.1.3 Dados Petrofísicos	30
4.2 Pré e Processamento dos Dados	33
4.2.1 Dados Aéreos	33
4.2.2 Dados Terrestres	40
4.2.3 Dados Petrofísicos	43
5. Discussão dos Resultados	44
5.1 Regional	44
5.2 Bloco Crustal Cavalcante-Natividade	56
5.3 Modelo Geofísico-Geológico 3D	65
6. Conclusões	75
Referências Bibliográficas	77

Lista de Figuras e Tabelas

Figura 1.1: Localização da área de estudos sob o Modelo Digital de Elevação: SRTM (Fonte: banco de dados aerogeofísicos integrados).

Figura 2.1: Subdivisão tectônica da América do Sul, mostrando a plataforma da América do Sul e sua expressão na superfície terrestre (Almeida et al. 1981). Fonte: Heilbron et al. 2017).

Figura 2.2: Crátons e sistemas orogênicos Brasileiro/Pan-africano do continente Gondwana Ocidental (América do Sul e África) e o arcabouço geotectônico do território brasileiro, que abrange quase todo o núcleo pré-cambriano da América do Sul (Alkmim & Martins-Neto 2005). Fonte: Heilbron et al. (2017).

Figura 2.3: Mapa da parte central da Província do Tocantins: i) AR: Faixa Araguaia; ii) PA: Faixa Paraguai; iii) GO: Arco Magmático Goiás; iv) NC: Bloco Natividade-Cavalcante; v) BR: Faixa Brasília; vi) CX: terreno granito-greenstone Crixás (Cordani & Teixeira 2007). Fonte: Fuck et al. (2017).

Figura 2.4: Mapa das principais unidades da Província Tocantins, em destaque: i) Bloco Crustal Cavalcante-Natividade (CN); ii) Lineamento Sintaxe Pirineus (PL); iii) Lineamento Transbrasiliano (TBL); iv) Falha Rio dos Bois e Falha Rio Maranhão. Fonte: Adaptado de Fuck et al. (2014)

Figura 2.5: Mapa geológico da Faixa Araguaia modificado após Alvarenga et al. (2000). A Serra do Quatipuru (SDQ), o Morro do Agostinho (MDA) e a Serra do Tapa (SDT). SL refere-se ao Cráton São Luiz, SF refere-se ao Cráton do São Francisco, cobertura fanerozóica refere-se à cobertura sedimentar fanerozóica e PB refere-se à bacia do Paranaíba. Fonte: Hodel et al. (2019).

Figura 2.6: Divisão geotectônica da Faixa Brasília Norte. Modificado de: Sabóia et al. 2020a, 2020b.

Figura 2.7: Mapa geológico esquemático da porção Norte do Bloco Cavalcante-Natividade. Fonte: Sabóia et al. (2020a).

Figura 2.8: Mapa geológico do Bloco Cavalcante-Natividade e regiões limítrofes. Fonte: Cuadros et al. (2017a).

Figura 2.9: Mapa geológico simplificado do Cráton do São Francisco, com realce para a Bacia São Francisco (linha vermelha tracejada). No canto superior direito, o mapa de Anomalia Bouguer mostra as principais estruturas presentes na Bacia. Fonte: Reis et al. (2011).

Figura 2.10: Mapas de Anomalia Ar-Livre (a direita) e Anomalia Bouguer (a esquerda). Fonte: Lima et al. (2023).

Figura 2.11: Espessura Crustal 3D para as porções onshore e offshore da área de estudo apresentando a posição dos perfis A-A', B-B', C-C', D-D', E-E' e F-F'. Fonte: Lima et al. (2023)

Figura 2.12: Perfil A-A'. Linha pontilhada amarela (MOHO_G), linha pontilhada verde (Superfície Curie, 580 °C), linha sólida vermelha (MOHO_S), linha sólida preta (MOHO_T), linha sólida roxa (Litosfera-Astenosfera Boundary) e linhas pretas pontilhadas (isotermas de 550 °C, 700 °C, 900 °C e 1300 °C). Fonte: Lima et al. (2023).

Figura 2.13: Modelo 2D da crosta e manto superior obtido a partir de modelagem de traçado de raio e resultados da função de receptor de Cavalcante, sob as linhas de refração profunda de Porangatu e Cavalcante. Fonte: Soares et al. (2006).

Figura 2.14: a) Mapa gravimétrico transformado para derivada vertical de primeira ordem. A transformação visa realçar as feições geológicas rasas sem introduzir ruídos. b) Mapa de interpretações gravimétricas. Fonte: Melo (2006).

Figura 2.15: a) Produto Sinal Analítico, A - Lineamento Transbrasiliano; B - Domínio Cavalcante-Araíças; C - Domínio Almas-Conceição do Tocantins; b) Produto Inclinação do Sinal Analítico (ISA ou TILT). Fonte: Praxedes (2015).

Figura 2.16: Produto Sinal Analítico (ASA). Fonte: Sousa et al. (2016).

Figura 2.17: Interpretação dos dados magnetométricos. a) Produto ISA com destaque aos lineamentos e a faixa de textura magnética mais lisa; b) Interpretação magnetométrica da área em domínios magnetométricos, com base em lineamentos e feições com forma de sigmóide. Fonte: Serafim (2017).

Figura 2.18. a) mapa de anomalia Bouguer (GOCE) mostrando as assinaturas gravimétricas ao longo dos limites, ocidental e oriental, do Cráton do São Francisco; b) Modelo 2D de espessura crustal na parte central do Cráton do São Francisco. Fonte: Assumpção et al. (2017).

Figura 2.19: a) Anomalia Bouguer, b) Anomalia Bouguer com remoção do efeito gravimétricos dos sedimentos e os números indicam os principais domínios interpretados. c) Campo Magnético Anômalo; d) Espectro de Potências; e) Empilhamento dos produtos do matched filter gravimétricos; f) Empilhamento dos produtos do matched filter magnéticos. Fonte: Lima et al. (2020).

Figura 3.1: O fluxo magnético ao redor de uma barra magnética. Fonte: Kearey (2009).

Figura 3.2: O intervalo aproximado de valores de resistividade dos tipos comuns de rochas. Fonte: Kearey (2009).

Figura 3.3: Esquema simplificado de equipamento para medição de resistividade de testemunhos. Fonte: Telford (1990).

Figura 4.1: Mapa dos aerolevantamentos geofísicos magnetométricos utilizados na integralização dos grids. Legenda dos aerolevantamentos.

Figura 4.2: Mapa das estações gravimétricas.. Em amarelo os pontos são provenientes do banco de dados do LabLitos - UnB / IBGE e em vermelho os pontos do banco de dados da ANP.

Figura 4.3: Mapa de localização dos pontos (em branco) de coleta de amostras de rocha.

Figura 4.4: Fotografia de aquisição de dados do equipamento MPP-EM2S+ da GDD Instrumentation. Fonte: <https://www.gddinstrumentation.com/mpp-probe>.

Figura 4.5: Fotografias das medições de densidade realizada na amostra 30.

Figura 4.6: Produto Campo Magnético Anômalo (CMA).

Figura 4.7: Produto Magnético Derivada Vertical (DZ).

Figura 4.8: Produto Magnético Gradiente Horizontal Total (GHT).

Figura 4.9: Produto Magnético do Gradiente Total (GT).

Figura 4.10: Produto Magnético do Tilt Derivative.

Figura 4.11: Produto Soluções de Euler sob o Tilt.

Figura 4.12: a) Ajuste da curva do espectro de potências (azul); b) Filtros passa-banda determinados a partir da inclinação do espectro radial de potência.

Figura 4.13: Produtos do Matched Filtering em 4 profundidades.

Figura 4.14: Produto Anomalia Bouguer.

Figura 4.15: Produto Anomalia Bouguer Residual (ou Bouguer Residual).

Figura 5.1: Produto Campo Magnético Anômalo com os Domínios traçados.

Figura 5.2: Produto Gradiente Total com os Domínios traçados.

Figura 5.3: Produto Inclinação do Sinal Analítico (Tilt) com os Domínios traçados.

Figura 5.4: Produto Tilt com lineamentos magnetométricos e com os Domínios traçados.

Figura 5.5: Produto Anomalia Bouguer com os Domínios traçados.

Figura 5.6: Área Alvo 1 - Arco Magmático de Goiás.

Figura 5.7: Área Alvo 2 - Maciço de Goiás.

Figura 5.8: Área Alvo 3 - Cráton do São Francisco.

Figura 5.9: Área Alvo 4 - Bacia do Parnaíba.

Figura 5.10: a) Produto Campo Magnético Anômalo; b) Produto Gradiente Total.

Figura 5.11: a) Produto Inclinação do Sinal Analítico; b) Produto Soluções de Euler sob o Tilt.

Figura 5.12: a) Produto Inclinação do Sinal Analítico com os lineamentos magnetométricos.

Figura 5.13: a) Produto Anomalia Bouguer; b) Produto Anomalia Bouguer Residual.

Figura 5.14: a) Domínio Norte do Bloco Cavalcante-Natividade;

Figura 5.15: Domínio Centro-Sul do Bloco Cavalcante-Natividade.

Figura 5.16: Mapa de detalhe da divisão geofísica do Bloco Cavalcante-Natividade.

Figura 5.17: Mapa de localização dos perfis A-A', B-B' e C-C'.

Figura 5.18: Perfil A-A' de susceptibilidade magnética e densidade.

Figura 5.19: Perfil B-B' de susceptibilidade magnética e densidade.

Figura 5.20: Perfil C-C' de susceptibilidade magnética e densidade.

Tabela 3.1: Suscetibilidade magnética de rochas e minerais. Fonte: Adaptado de Telford (1990).

Tabela 3.2: Densidade de Rochas. Fonte: Adaptado de Telford (1990).

Tabela 4.1: Características dos Aerolevantamentos magnetométricos.

Tabela 5.1: Caracterização magnética das unidades da Província Tocantins, Cráton do São Francisco (CSF) e da Bacia do Parnaíba, conforme Valeriano et al. (2008), Dardenne e Botelho (2014), Fuck et al. (2014) e Reis et al. (2011).

Tabela 5.2: Caracterização das assinaturas geofísicas do Bloco Cavalcante-Natividade, focando em sua subdivisão em porções norte e sul.

Tabela 5.3: Amostras de rocha coletadas em trabalho de campo no Bloco Cavalcante-Natividade.

1. Introdução

A geofísica e a geologia são áreas do conhecimento da geociências que estudam os processos de formação da Terra (Telford 1990). A geofísica fornece informações de subsuperfície a partir da compreensão da resposta oriunda das propriedades físicas do meio, pelo conhecimento indireto desse (Kearey 2009). A geologia estuda principalmente a superfície, como as regiões aflorantes, de maneira direta, para a obtenção de informações validadas àquelas impressas nas rochas.

Os métodos geofísicos potenciais, gravimetria e magnetometria, mostram assinaturas geofísicas relacionadas a determinado ambiente geológico a partir das propriedades físicas (i.e., densidade e susceptibilidade magnética, respectivamente), o que possibilita a indicação e a discriminação de feições e estruturas geológicas presentes na crosta e no manto litosférico (Telford 1990). Produtos derivados dos métodos geofísicos podem indicar relevantes contrastes laterais (/horizontais) das fontes gravimétricas e magnetométricas em diferentes profundidades da litosfera (Hinze 2013). Assim, podem-se delimitar corpos e contatos em profundidade.

O Bloco Cavalcante-Natividade é uma importante unidade de idade (principalmente) paleoproterozóica inserida na Província Tocantins, uma vez que constitui parte do embasamento do Orógeno Brasília Norte (Dardenne & Botelho 2014). Esse orógeno é resultado do processo de amálgama tectônica ocasionado pela colisão entre os crátons do São Francisco e Amazônico no Neoproterozoico (Pimentel 2016). A região do Bloco Crustal Cavalcante-Natividade e suas adjacências é alvo importante para estudos geotectônicos multidisciplinares, uma vez que há pouca informação disponível que relacione sua geologia de superfície às assinaturas geofísicas, bem como na delimitação espacial (modelos 3D) desse bloco e nas relações de contato entre ele, o Cráton do São Francisco e as demais unidades constituintes do Orógeno Brasília (Fuck et al. 2014, 2017). Desse modo, a caracterização geofísica-geológica do Bloco Cavalcante-Natividade e de suas adjacências possibilitará melhor entendimento da evolução tectônica da porção centro-leste da Província Tocantins e das demais unidades tectônicas de seu entorno (i.e., Cráton do São Francisco, Arco Magmático de Goiás, Maciço de Goiás e Bacia do Parnaíba).

Neste trabalho propõe-se a utilização de dados magnetométricos aéreos e gravimétricos terrestres com a finalidade de detalhar e expandir as observações e os resultados obtidos por estudos anteriores, alcançados com o uso de dados de satélite que abrangeram a área de estudo (Lima et al. 2020, 2023). Os dados geofísicos aéreos e terrestres

possuem maior resolução para observar fontes rasas (de até aproximadamente 20 km de profundidade) e que podem estar associadas às características provenientes da crosta superior. Para a validação das observações geofísicas, foram obtidas e estudadas amostras de rochas coletadas em campanhas de campo na região compreendida pelo Bloco Cavalcante-Natividade, Orógeno Brasília Norte, possibilitando, assim, a caracterização petrofísica dessa região.

1.1 Objetivos

O cerne desta pesquisa é agregar informações ao conhecimento geológico em subsuperfície com base nas fontes geofísicas da região onde está localizado o Bloco Crustal Cavalcante-Natividade. Além disso, a área da pesquisa abrange a porção centro-leste da Província Tocantins e regiões limítrofes: margem ocidental do Cráton do São Francisco e porção sul da Bacia do Parnaíba. Propõe-se um modelo 3D da crosta/litosfera oriundo da inversão de assinaturas obtidas a partir das propriedades físicas de densidade e susceptibilidade magnética, validado com informações geológicas obtidas na amostragem realizada em trabalho de campo.

A área alvo é o Bloco Crustal Cavalcante-Natividade que se apresenta como um domínio do Paleoproterozóico que possui pouca informação disponível que relacione a geologia e suas assinaturas geofísicas, bem como sua delimitação espacial (modelo 3D) e relações de contato com a placa do São Francisco e os terrenos constituintes da Faixa Brasília (Fuck et al. 2014, 2017; Brito Neves et al. 2021).

Propõe-se utilizar dados gravimétricos terrestres e dados magnetométricos aéreos para a caracterização da assinatura geofísica do Bloco Crustal Cavalcante-Natividade e seus limites. As propriedades petrofísicas, densidade e susceptibilidade magnética, serão obtidas a partir das amostras de rocha representativas dos principais domínios e ambientes geológicos da área de estudo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i) Caracterização geofísica-geológica do Bloco Crustal Cavalcante-Natividade, com base em sua assinatura geofísica na crosta/litosfera, sua delimitação espacial (modelo 3D) e relações de contato com a placa do São Francisco e terrenos constituintes da Faixa Brasília; e
- ii) Construção do banco de dados petrofísicos (densidade e susceptibilidade magnética) para caracterização dos padrões/assinaturas dos domínios geofísicos de ambientes e terrenos importantes da Província Tocantins e do Cráton do São Francisco;

1.2 Localização da Área de Estudo

A área de estudo localiza-se na porção central do Brasil, abrangendo parte dos estados de Goiás, Tocantins, Bahia, Minas Gerais e o Distrito Federal, com cerca de 632.000 km² (Figura 1.1). As coordenadas geográficas dos vértices da diagonal principal do polígono são 10°S e 51°W e 16°S e 42°W.

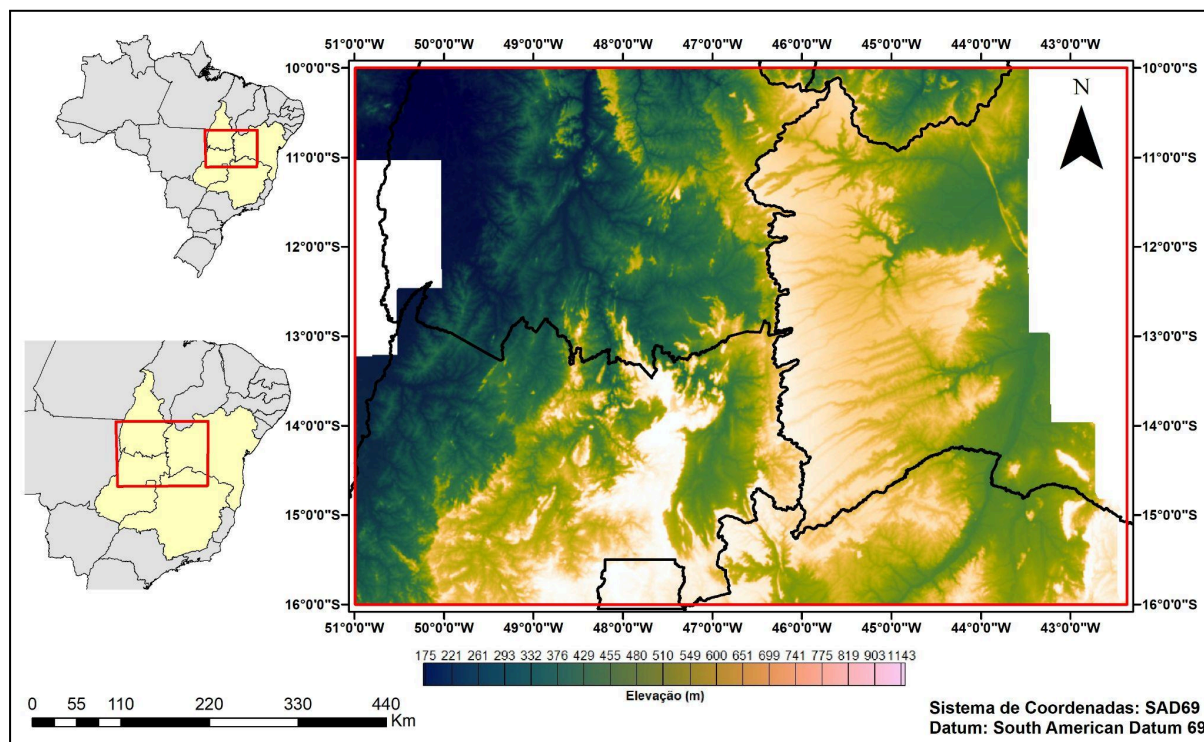


Figura 1.1: Localização da área de estudos sobre o Modelo Digital de Elevação: SRTM (Fonte: banco de dados aerogeofísicos integrados).

2. Contextos Geológico e Geofísico Regionais

2.1 Geologia

O Continente Sul-Americano é constituído de uma região central pré-cambriana, denominada de Plataforma Sul-Americana, em contato com duas províncias fanerozóicas: Plataforma da Patagônia, ao sul e Cadeia Andina, a oeste. O embasamento pré-cambriano é formado pelos escudos: 1) Das Guianas; 2) Brasil Central; e 3) Atlântico (Figura 2.1). O Escudo Brasileiro compreende a área dos três escudos, citados anteriormente, e são constituídos em crátons e sistemas orogênicos brasileiros, resultantes da convergência/colisão entre as paleoplasacas e amalgamação dos escudos, com a formação da Plataforma Sul-Americana (Almeida et al. 1981; Brito-Neves et al. 1999; Alckmin et al. 2001; Heilbron et al. 2017).

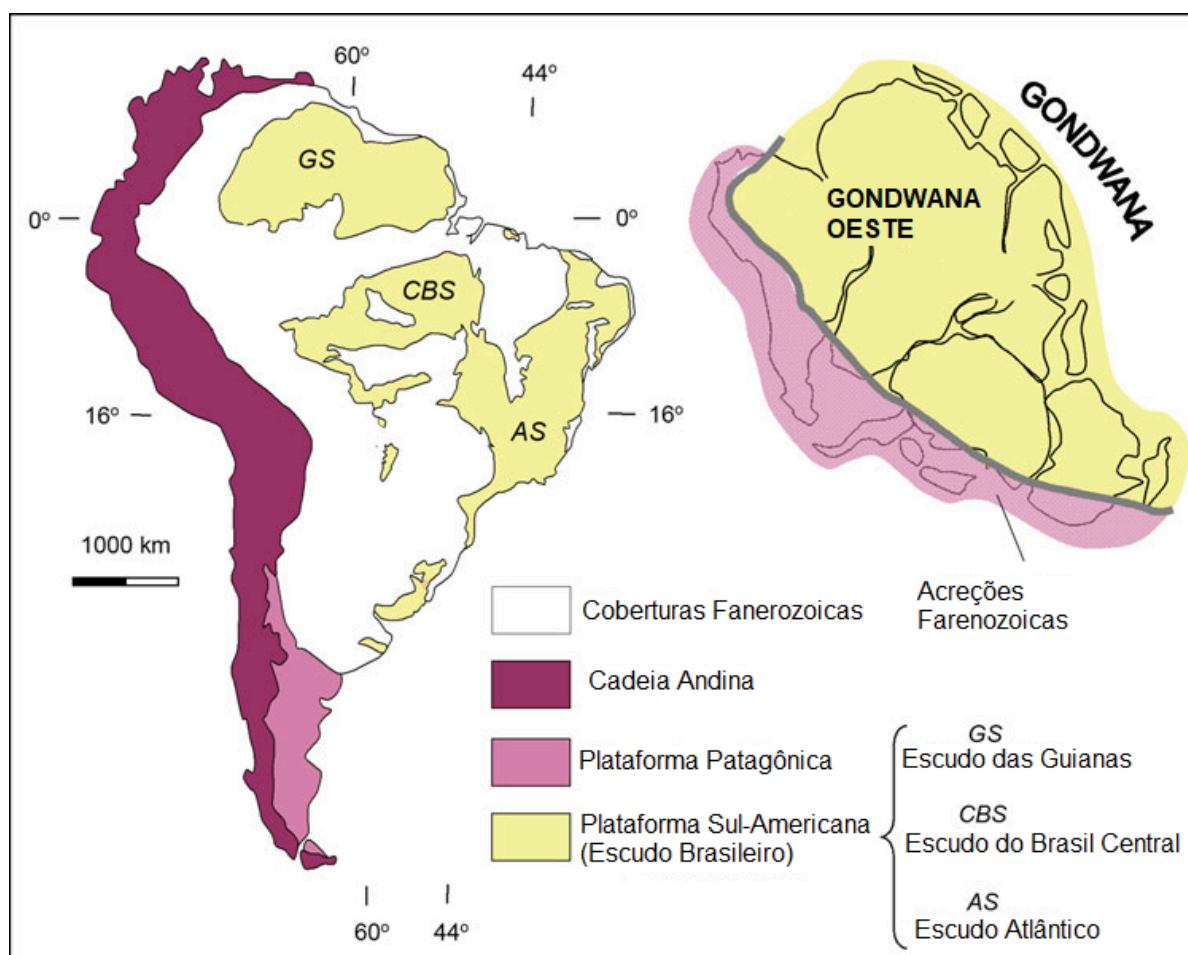


Figura 2.1: Subdivisão tectônica da América do Sul, mostrando a plataforma da América do Sul e sua expressão na superfície terrestre (Almeida et al. 1981). Fonte: Heilbron et al. (2017).

Crátons são definidos tradicionalmente como porções de continentes que atingiram e mantiveram a estabilidade tectônica desde o início do Fanerozóico. São terrenos constituídos

por crosta continental que não foram envolvidos nos processos orogênicos fanerozóicos (Alkmim & Martins-Neto 2005, Heilbron et al. 2017). Na Plataforma Sul-americana são reconhecidos cinco crátons : i) Amazônico), ii) São Luís, iii) do São Francisco, iv) Paranapanema, e v) Rio de la Plata (Figura 2.2).

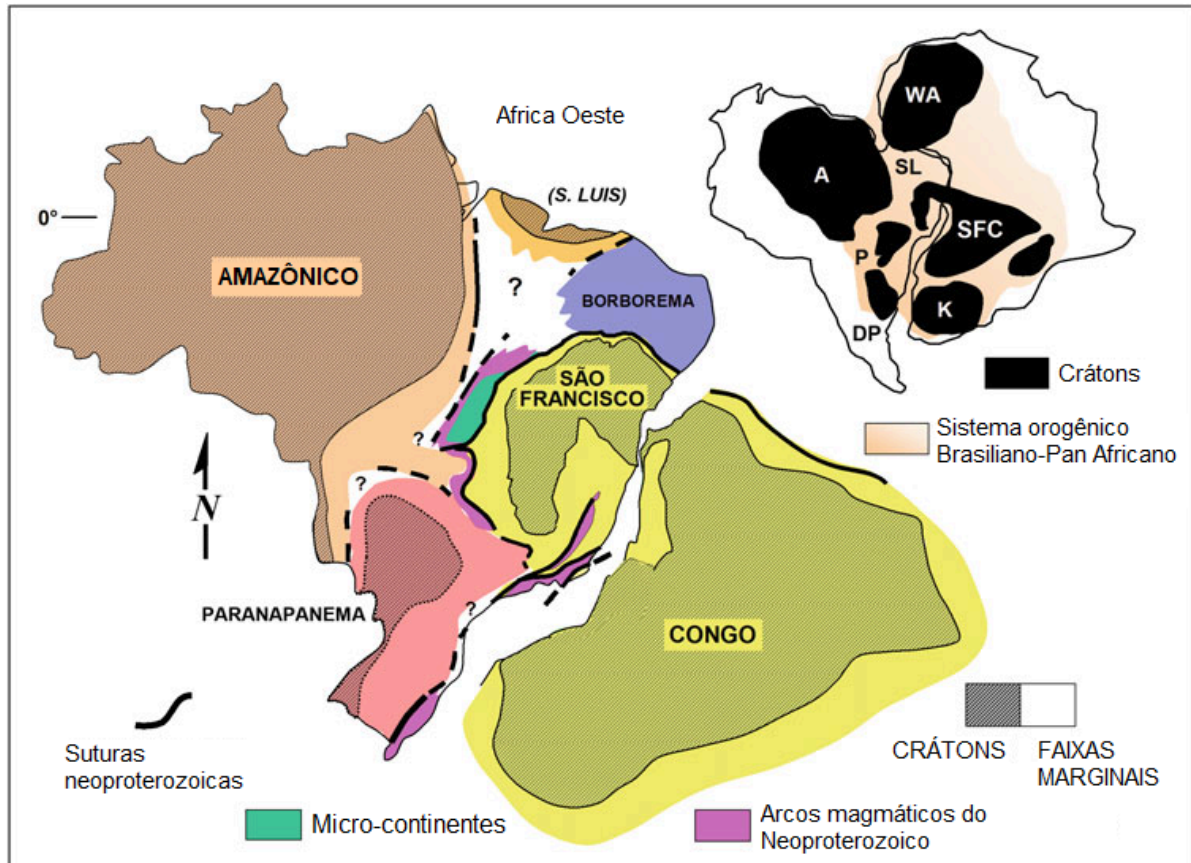


Figura 2.2: Crátons e sistemas orogênicos Brasiliano/Pan-africano do continente Gondwana Ocidental (América do Sul e África) e o arcabouço geotectônico do território brasileiro, que abrange quase todo o núcleo pré-cambriano da América do Sul (Alkmim & Martins-Neto 2005). Fonte: Heilbron et al. (2017).

Os sistemas orogênicos do Brasiliano estão localizados às margens das placas e micro-continentes e arcos magmáticos (Almeida et al. 1981). As rochas constituintes dos cinturões e dos crátons exibem características pré- e pós-colisionais. Assim, pode-se compreender melhor a história dinâmica e evolutiva da Terra a partir das informações impressas nas formações rochosas (Heilbron et al. 2017).

2.1.1 Província Tocantins

A Província Tocantins é um extenso sistema orogenético neoproterozóico que se localiza à margem oeste do Cráton do São Francisco e ao leste/sudeste do Cráton Amazônico (Almeida et al. 1981). A localização da província resulta da convergência e colisão dos paleocontinentes Amazônico e do São Francisco durante a Orogenia Brasileira (Figura 2.3).

As bacias do Parnaíba e do Paraná cobrem porções da província ao norte e ao sul, respectivamente, com rochas sedimentares faneróicas (Cordani & Teixeira 2007; Fuck et al. 2017). Inicialmente, Almeida et al. (1981) dividiram a Província Tocantins em: 1) Faixas Araguaia e Paraguai (a oeste); 2) Maciço de Goiás; 3) Faixas Uruaçu e Brasília (a leste). Posteriormente Fuck et al. (1994) subdividiram, de oeste para leste, a Província Tocantins em: 1) Faixas Araguaia (AR) e Paraguai (PA); 2) Arco Magmático de Goiás (GO); e 3) Faixa Brasília (BR), com a inclusão do Maciço de Goiás (Figura 2.3).

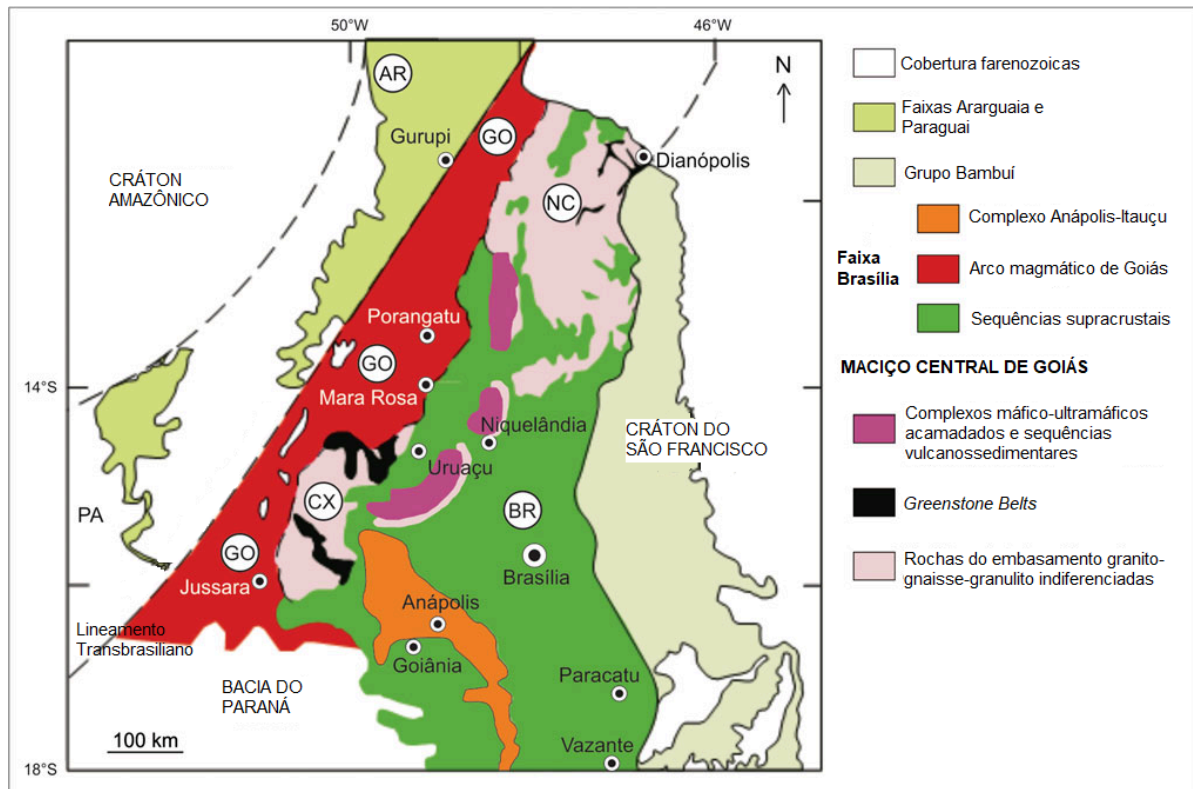


Figura 2.3: Mapa da parte central da Província do Tocantins: i) AR: Faixa Araguaia; ii) PA: Faixa Paraguai; iii) GO: Arco Magmático Goiás; iv) NC: Bloco Natividade-Cavalcante; v) BR: Faixa Brasília; vi) CX: terreno granito-greenstone Crixás (Cordani & Teixeira 2007). Fonte: Fuck et al. (2017).

A Faixa de Dobramentos Brasília se estende por cerca de 1.100 km na direção N-S e é caracterizada por duas direções preferenciais de compartimentação tectônica, N-S e E-W. A direção N-S é composta pelos segmentos Setentrional e Meridional, ambos separados pela Sintaxe dos Pirineus (Araújo Filho 2000). Os segmentos com direção E-W são denominados em zonas: Cratônica, Interna e Externa, e pelas unidades geotectônicas do Arco Magmático de Goiás e Maciço de Goiás (Figura 2.4) (Fuck et al. 1993).

Segundo Fuck et al. (2014), a Falha Rio Maranhão é o limite entre as zonas Interna e Externa da Faixa Brasília (Figura 2.4). A Zona Externa é formada principalmente por uma pilha espessa de sequências sedimentares deformadas contra a margem oeste do Cráton do

São Francisco e por extensas exposições de seu embasamento siálico (Fuck et al. 2017). A Zona Interna é dividida em três domínios tectônicos: i) Arco Magmático de Goiás; ii) Maciço do Goiás; e iii) Núcleo Metamórfico (Fuck et al. 2014; 2017).

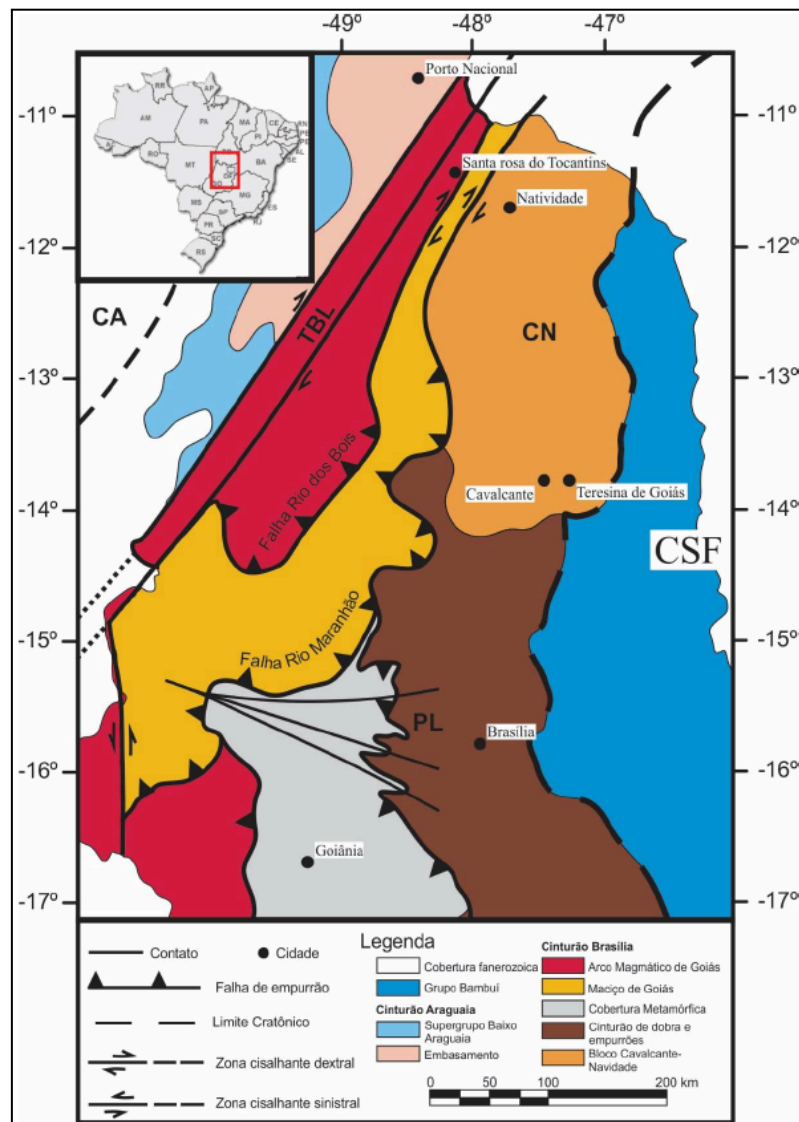


Figura 2.4: Mapa das principais unidades da Província Tocantins, em destaque: i) Bloco Crustal Cavalcante-Natividade (CN); ii) Lineamento Sintaxe Pirineus (PL); iii) Lineamento Transbrasiliano (TBL); iv) Falha Rio dos Bois e Falha Rio Maranhão. Fonte: Adaptado de Fuck et al. (2014).

A Faixa Araguaia bordejia a porção leste do Cráton Amazônico por cerca de 1.200 km de extensão e 150 km de largura (Figura 2.5) (Almeida et al., 1981; Hodel et al. 2019). É um cinturão neoproterozoico resultante da orogenia colisional Brasiliana/Pan-africana ocorrida entre os paleocontinentes Amazônia, África Ocidental/São Luís e São Francisco-Congo e o bloco Parnaíba (Daly et al. 2014).

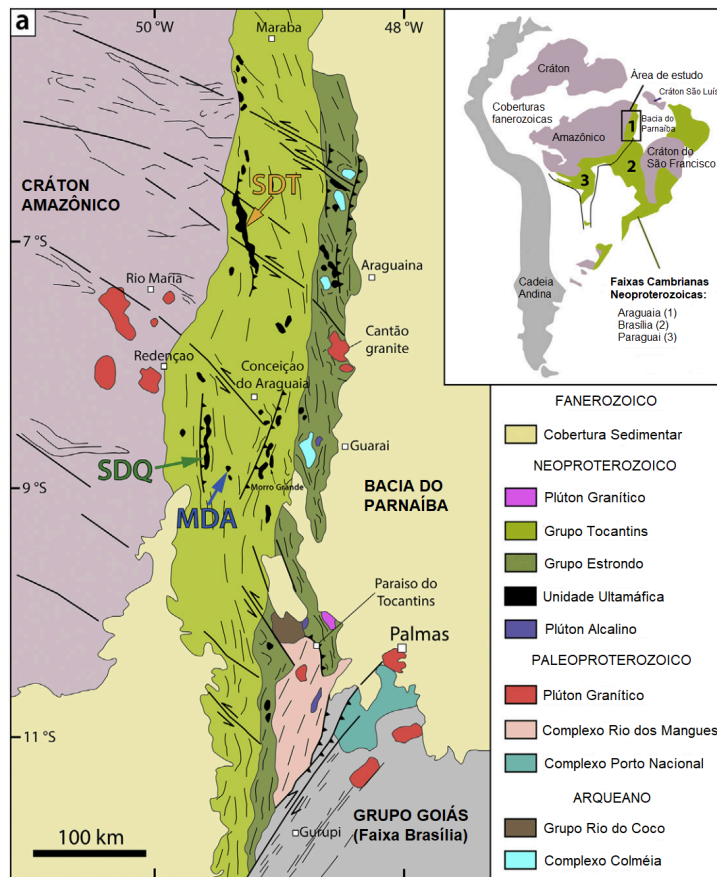


Figura 2.5: Mapa geológico da Faixa Araguaia modificado após Alvarenga et al. (2000). A Serra do Quatipuru (SDQ), o Morro do Agostinho (MDA) e a Serra do Tapa (SDT). SL refere-se ao Cráton São Luiz, SF refere-se ao Cráton do São Francisco, cobertura fanerozoica refere-se à cobertura sedimentar fanerozoica e PB refere-se à bacia do Paranaíba. Fonte: Hodel et al. (2019).

2.1.1.1 Bloco Cavalcante-Natividade

Em contexto local, a norte, o embasamento da Faixa Brasília está exposto em uma área conhecida como bloco Natividade-Cavalcante (Figura 2.6). Esse terreno é formado por complexos de granito-gnaisses e sequências metavulcanossedimentares do Arqueano/Paleoproterozoico, pelos granitos da Suíte Aurumina e pelas formações Ticunzal e Riachão (Valeriano et al. 2008; Dardenne & Botelho 2014; Fuck et al. 2014; Sabóia et al. 2020a, 2020b). Essas unidades estão encobertas por rochas da fase rifte do Grupo Araí (idade 1,77 Ga). Em superfície, a porção leste do bloco é limitada pelas rochas do Grupo Bambuí e, a sul, pelas rochas do Grupo Araí, em contato discordante às do Grupo Paranoá (Valeriano et al. 2008; Fuck et al. 2014).

Segundo Brito Neves et al. (2021), do ponto de vista tectônico o Bloco Cavalcante-Natividade apresenta afinidade com o Maciço de Goiás e Cráton do São Francisco. Segundo a deformação apresentada pelo bloco entende-se que esse terreno foi um promotório do paleocontinente do São Francisco, de idade criogeniana.

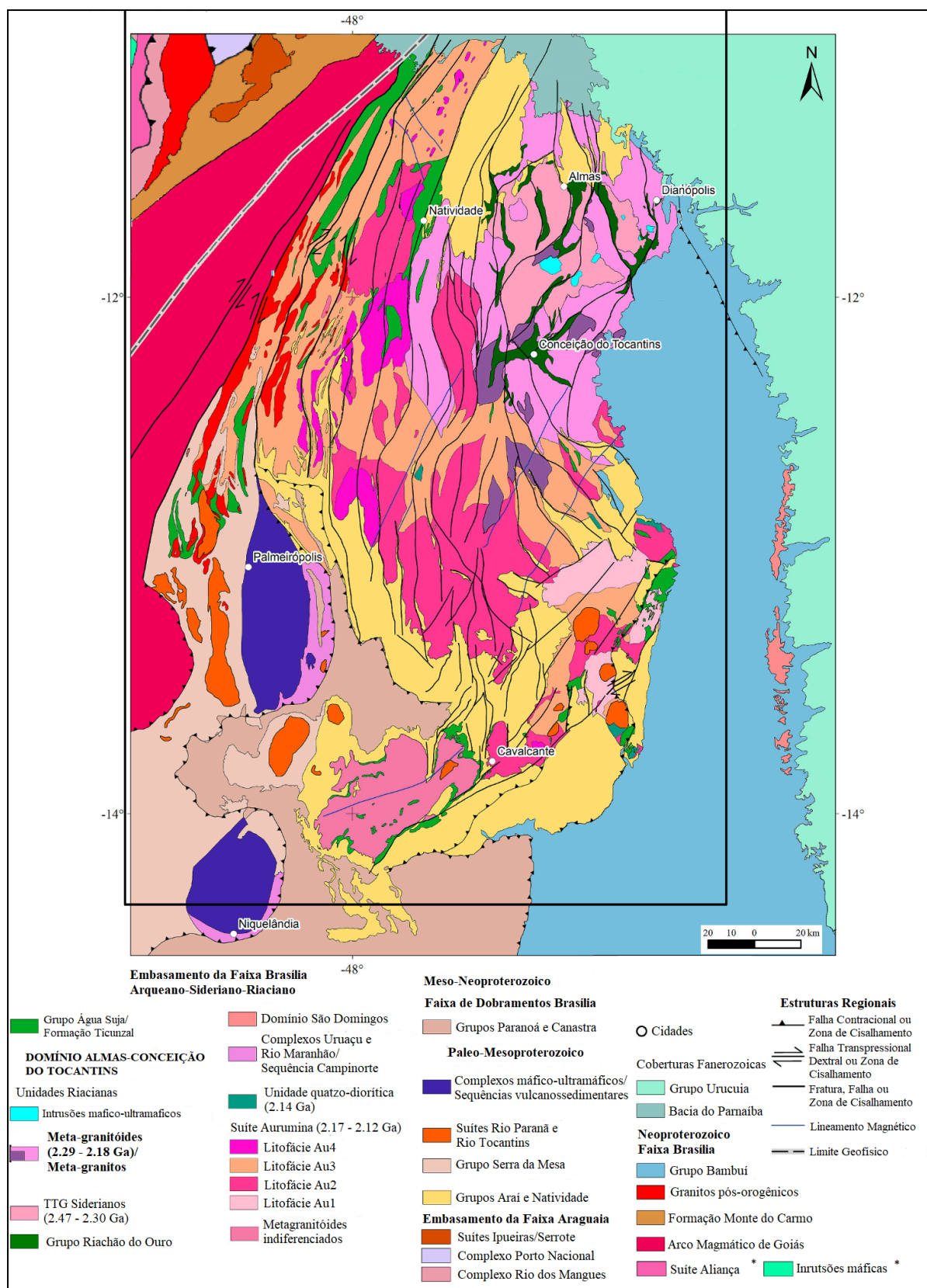


Figura 2.6: Divisão geotectônica da Faixa Brasília Norte. Modificado de: Sabóia et al. (2020a, 2020b).

A porção norte do Bloco Cavalcante-Natividade é denominada de Domínio Almas-Conceição do Tocantins (Cuadros et al. 2017a, 2017b). Esse domínio é constituído por rochas metavulcanossedimentares do Grupo Riachão do Ouro (constituído pelas formações Córrego do Paiol e Morro do Carneiro), TTG's (Complexo Ribeirão das Areias, Suíte Ribeirão Itaboca, Suíte Serra do Boqueirão), rochas máfico-ultramáficas da Suíte Gameleira e por rochas metassedimentares do Grupo Natividade (Cuadros et al. 2017a, 2017b; Martins-Ferreira et al. 2020; Sabóia et al. 2020a, 2020b).

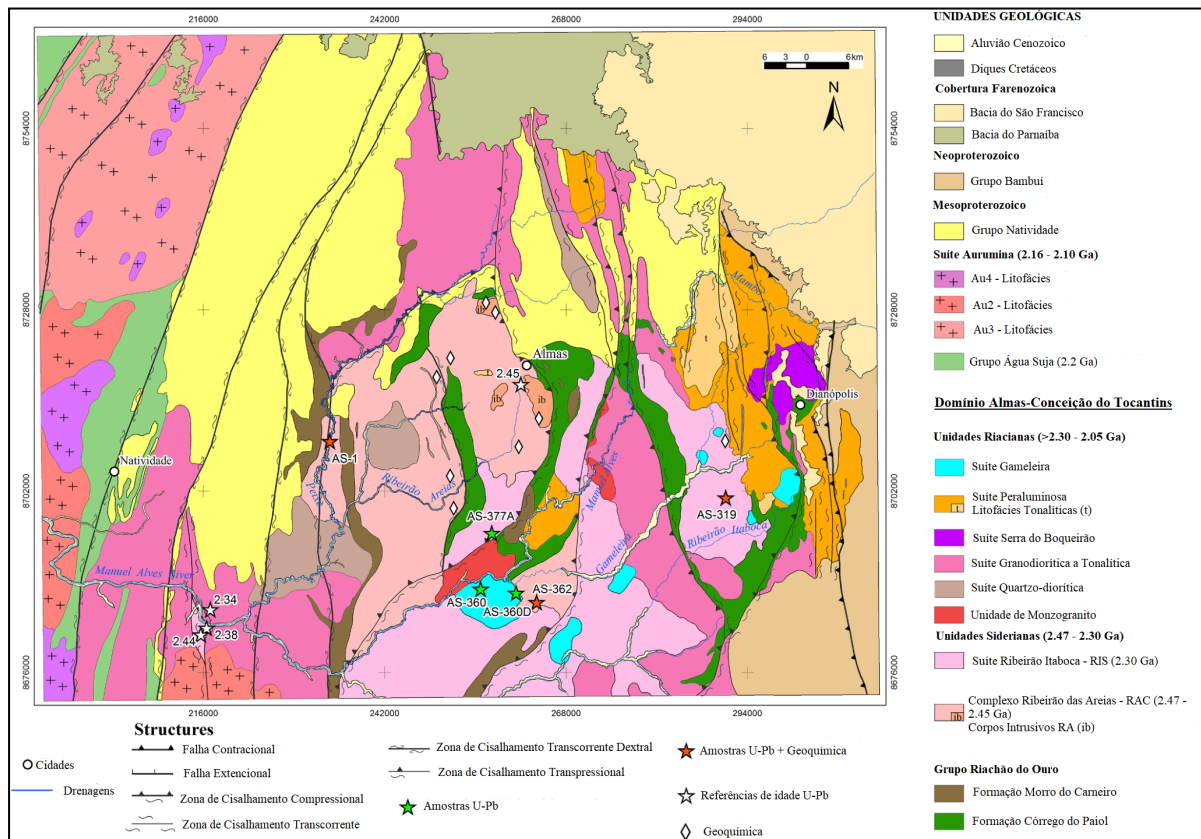


Figura 2.7: Mapa geológico esquemático da porção Norte do Bloco Cavalcante-Natividade. Fonte: Sabóia et al. (2020a).

A porção sul do Bloco Crustal Cavalcante-Natividade é denominada de Domínio Cavalcante-Araias (Cuadros et al. 2017a, 2017b) que é formado por granada paragneisse/grafita-mica xisto da Formação Ticunzal, granitos/tonalito da Suíte Aurumina, diorito do plúton Nova Roma, rochas metavulcanossedimentares do Grupo Araí e granitos anorogênicos das suítes Pedra Branca (Figura 2.7) (Cuadros et al. 2017a, 2017b; Martins-Ferreira et al. 2018).

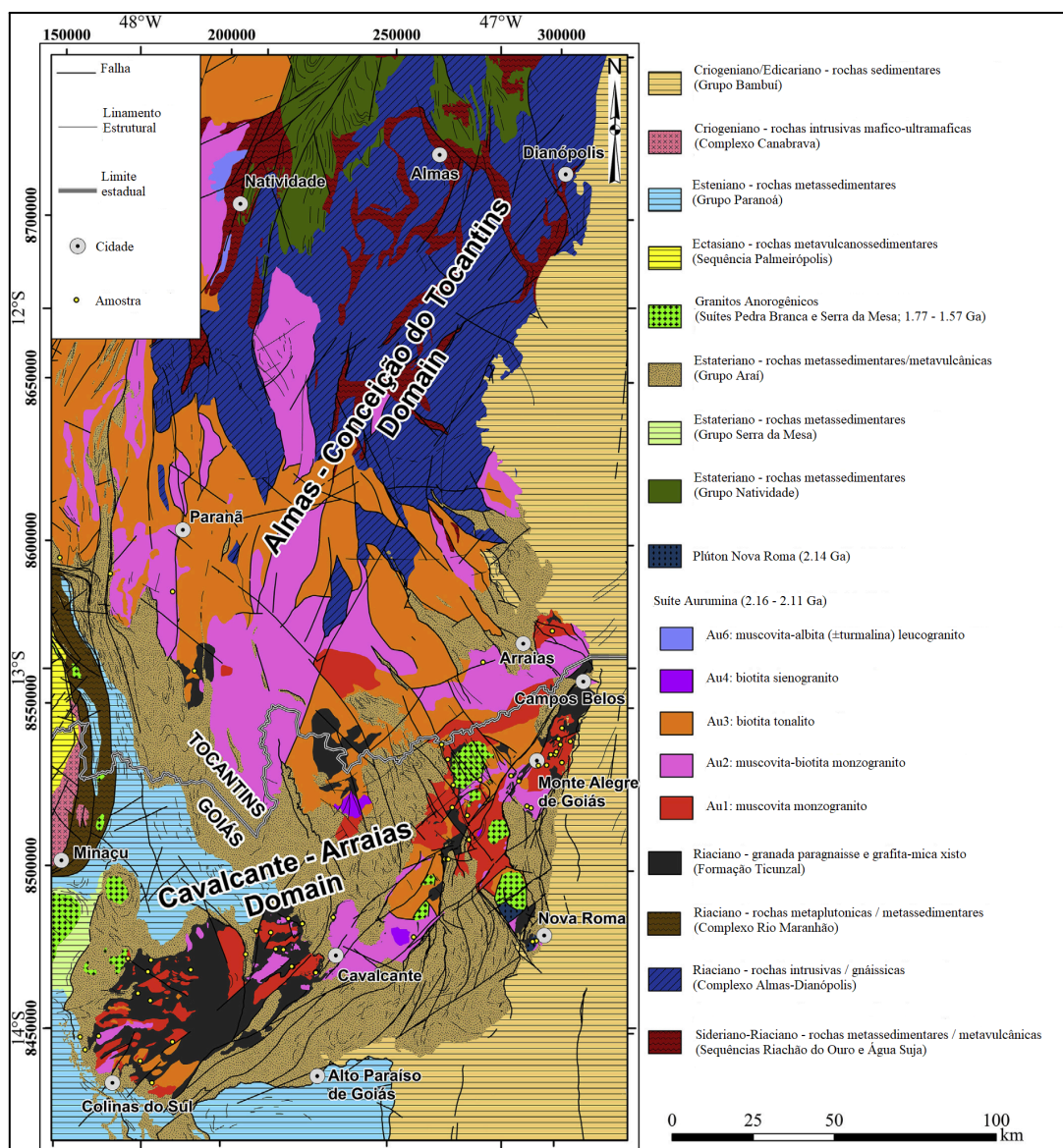


Figura 2.8: Mapa geológico do Bloco Cavalcante-Natividade e regiões limítrofes. Fonte: Cuadros et al. (2017a).

2.1.2 Cráton do São Francisco

A região oeste do Cráton do São Francisco está inserida no contexto da Zona Cratônica (Pimentel et al. 2004), formada pelas rochas do Grupo Bambuí, em parte afetadas por um sistema de dobras e empurrões (Fuck et al. 2014; 2017). A margem oeste do Cráton do São Francisco mostra o domínio da Bacia São Francisco que apresenta características de bacia intracratônica formada por sucessivos ciclos de sedimentação, com direção N-S, que cobre parte da região formada pelo sistema de dobras e empurrões (Figura 2.9) (Alkmim & Martins-Neto 2001; Reis et al. 2011).

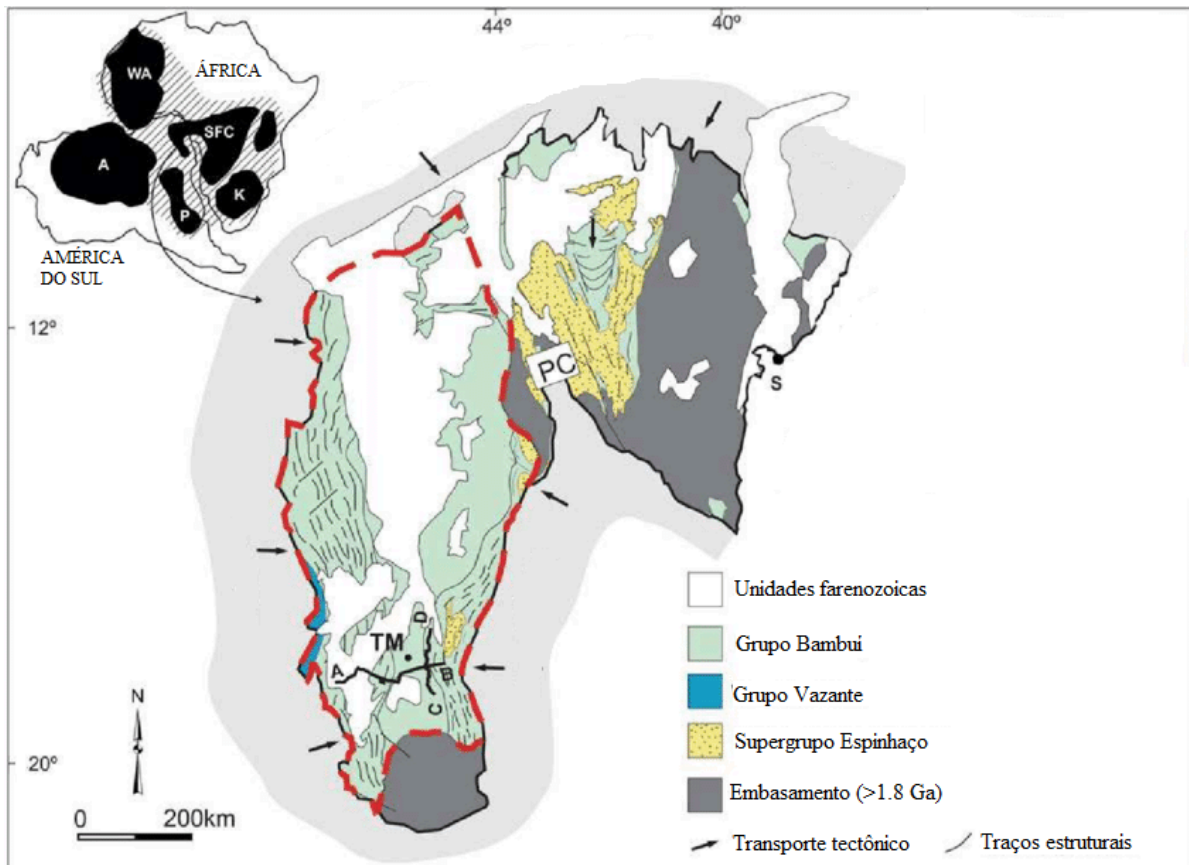


Figura 2.9: Mapa geológico simplificado do Cráton do São Francisco, com realce para a Bacia São Francisco (linha vermelha tracejada). No canto superior direito, o mapa de Anomalia Bouguer mostra as principais estruturas presentes na Bacia. Fonte: Reis et al. (2011).

2.2 Geofísica Regional

Lima et al. (2023) apresentam modelos geofísicos de inversão para a caracterização da Plataforma continental Sul-Americana, mais especificamente a brasileira, *onshore* e *offshore* (Figura 2.10). Os modelos foram obtidos a partir da integração de dados potenciais de satélite, gravimétrico e magnetométrico, com a sísmica profunda (Berrocal et al. 2014, Soares et al. 2006; 2018) e sismologia apresentada por Assumpção et al., (2013a; 2013b) e Rivadeneyra-Vera et al. (2019).

Os dados de satélite utilizados pelos autores foram o WGM2012, *World Gravity Model* 2012, e o EMAG2, da missão CHAMP. A figura 2.10 mostra as anomalias gravimétricas na plataforma sul-americana (Lima et al. 2023).

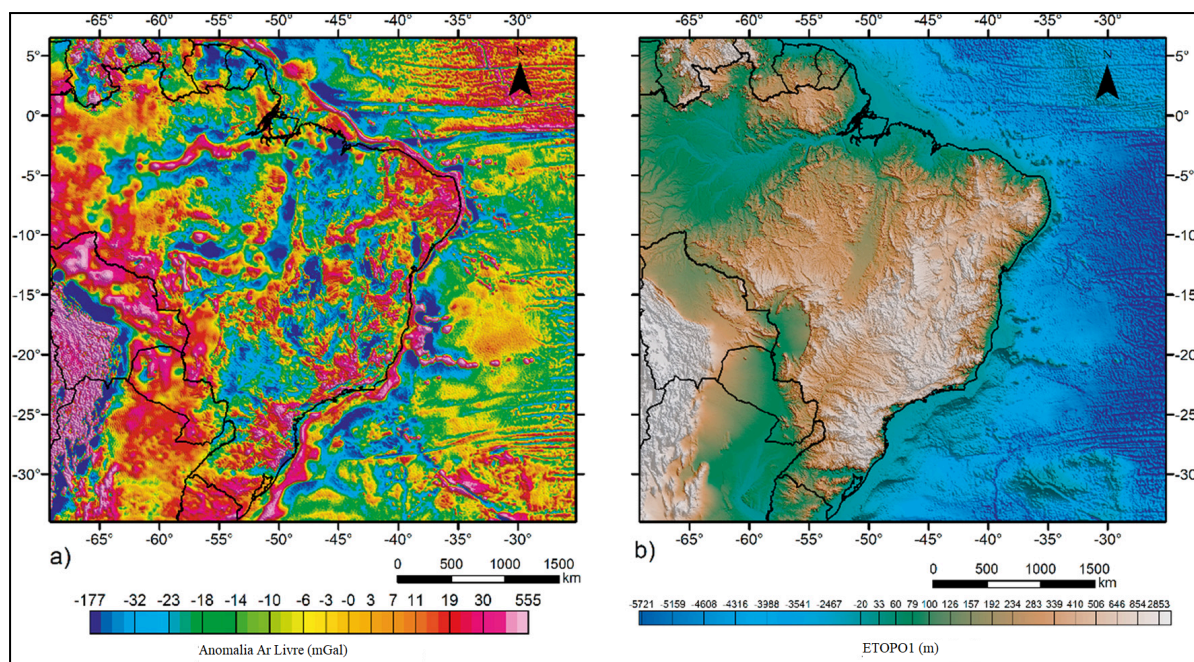


Figura 2.10: Mapas de Anomalia Ar-Livre (a direita) e Anomalia Bouguer (a esquerda). Fonte: Lima et al. (2023).

Lima et al. (2023) integraram dados geofísicos e, por meio da inversão gravimétrica, geraram um modelo 3D de profundidade da crosta para a compreensão da geotectônica da região. Para interpretação do modelo realizaram perfis E-W e NW-SE, seccionando a porção onshore e offshore da área de estudo (Figura 2.11).

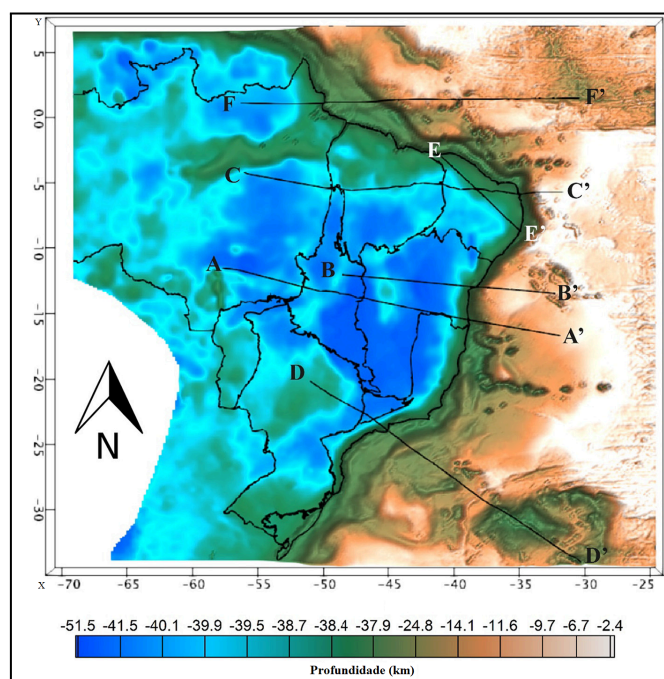


Figura 2.11: Espessura Crustal 3D para as porções onshore e offshore da área de estudo apresentando a posição dos perfis A-A' , B-B' , C-C' , D-D' , E-E' e F-F'. Fonte: Lima et al. (2023).

O perfil A-A' começa próximo à Porto dos Gaúchos (MT) e se estende por 2.000 km até Santa Luzia (BA), antes de continuar por 708 km offshore (Figura 2.12). Conforme o observado na Figura 2.12, o perfil da Superfície Curie mostra ascendência em direção à zona de sutura, localizada entre a Província Tocantins e o Cráton do São Francisco. Observa-se também anomalia térmica ascendente do manto sob a Província Tocantins que impacta na litosfera e astenosfera.

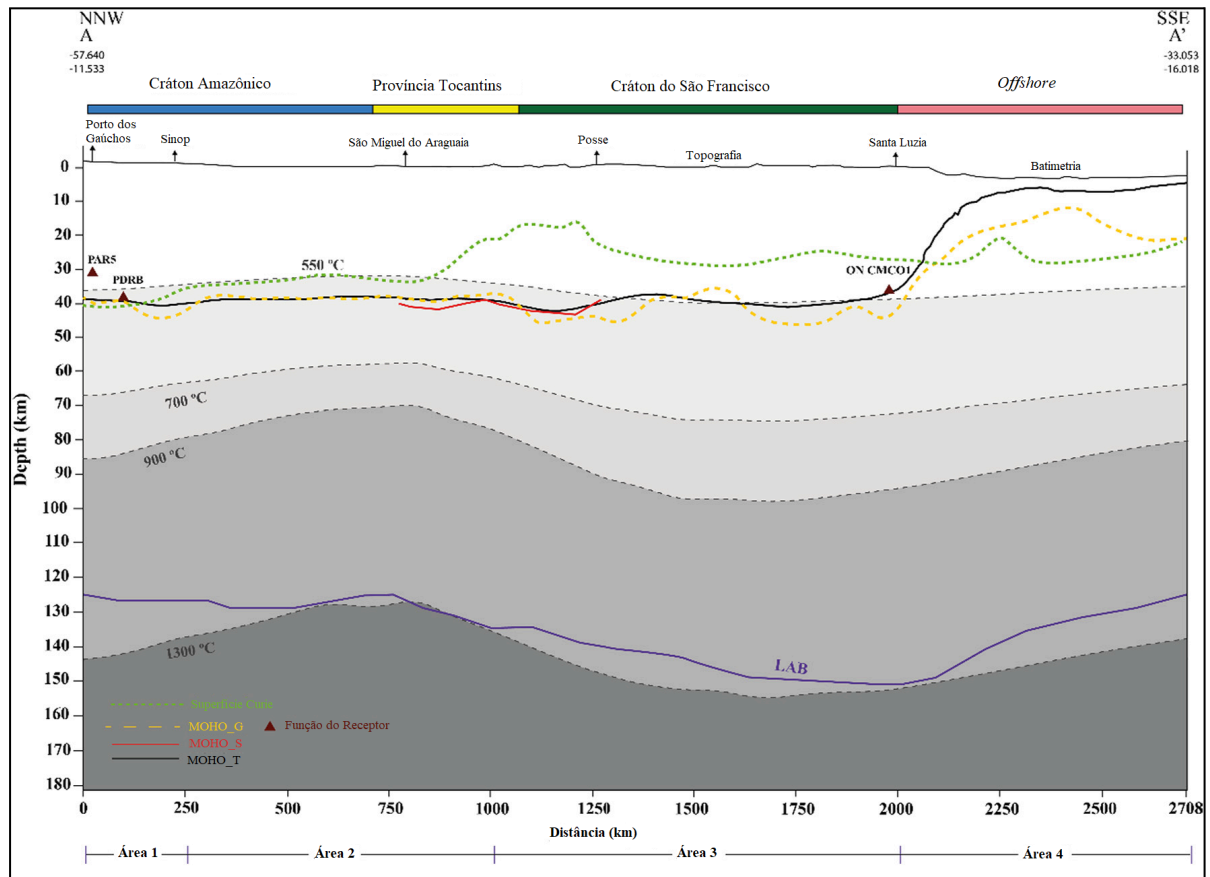


Figura 2.12: Perfil A-A'. Linha pontilhada amarela (MOHO_G), linha pontilhada verde (Superfície Curie, 580 °C), linha sólida vermelha (MOHO_S), linha sólida preta (MOHO_T), linha sólida roxa (Litosfera-Astenosfera Boundary) e linhas pretas pontilhadas (isótermas de 550 °C, 700 °C, 900 °C e 1300 °C). Fonte: Lima et al. (2023).

2.2.1 Província Tocantins

Soares et al. (2006) apresentam modelo de velocidades da crosta terrestre e do manto superior na porção central do Brasil a partir da interpretação dos tempos de chegada ou tempos de viagem (traveltimes) das linhas sísmicas de refração profunda: Porangatu e Cavalcante.

A partir dos dados sísmicos de refração foi construído modelo de velocidades bidimensional (2D) vinculado aos coeficientes de Poisson, obtido a partir da modelagem das fases SmS e dos produtos de função do receptor (Figura 2.13). Ao longo do perfil, a

velocidade de onda P (V_p) crustal média varia de 6,4 a 6,6 km/s e o Coeficiente de Poisson médio varia de 0,23 a 0,25. São observados sutis aumentos na V_p da crosta que descrevem os contatos entre as camadas e dentro das camadas o gradiente de velocidades é baixo. A profundidade da descontinuidade de Moho varia de 36 a 44 km e o manto superior apresenta velocidade média de 8,05 km/s abaixo da linha de Porangatu e 8,23 km/s abaixo da linha de Cavalcante (Figura 2.13) (Soares et. al 2006).

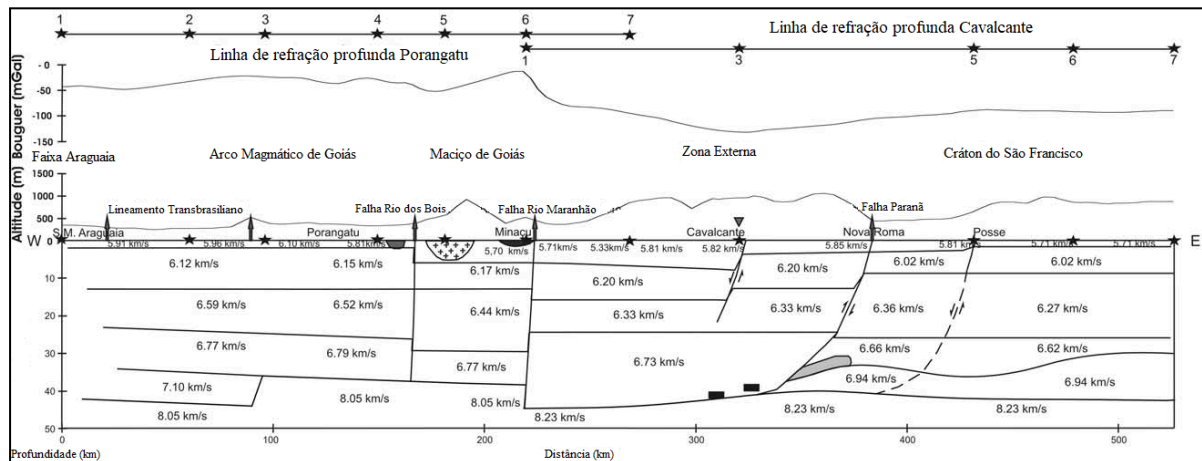


Figura 2.13: Modelo 2D da crosta e manto superior obtido a partir de modelagem de traçado de raio e resultados da função de receptor de Cavalcante, sob as linhas de refração profunda de Porangatu e Cavalcante. Fonte: Soares et al. (2006).

Soares et al. (2006) concluem que é perceptível a subdivisão de Faixa Araguaia, Arco Magmático de Goiás, Zona Externa da Faixa Brasília e Cráton do São Francisco em subsuperfície. Para a crosta sob as linhas sísmicas de refração, as médias de velocidade de onda P e coeficientes de Poisson indicam composição félsica. A porção norte da Faixa Brasília, Zona Externa, apresenta blocos de estrutura crustal definidos tectonicamente durante o Brasiliano.

Melo (2006) apresenta assinaturas gravimétricas acerca dos complexos Máfico-Ultramáficos presentes na porção setentrional da Faixa Brasília. O Arco Magmático de Goiás exibe uma resposta gravimétrica elevada e é denominada de Alto Gravimétrico de Goiás, com direção preferencial NE-SW. Os Complexos Máfico-Ultramáficos Barro Alto, Niquelândia e Canabrava bordejam a porção oeste do Arco Magmático e possuem elevados valores gravimétricos (Figura 2.14). Soares (2006) interpreta que esses complexos foram explitados a partir da colisão das paleoplacas do São Francisco, Amazônica e Paranapanema. O produto gravimétrico da Derivada Vertical apresentado por Melo (2006) delimita os Complexos Máfico-Ultramáficos e sugere a presença de um quarto complexo em subsuperfície ao norte de Canabrava (Figura 2.14).

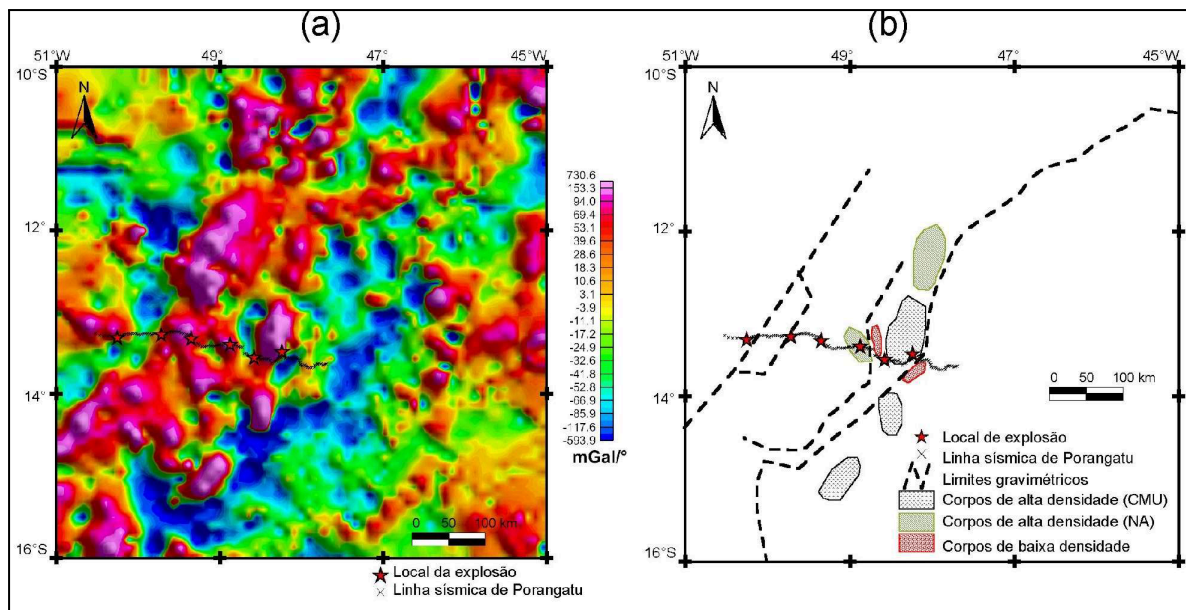


Figura 2.14: a) Mapa gravimétrico transformado para derivada vertical de primeira ordem. A transformação visa realçar as feições geológicas rasas sem introduzir ruídos. b) Mapa de interpretações gravimétricas. Fonte: Melo (2006).

Praxedes (2015) apresenta produtos magnetométricos da porção norte do Bloco Cavalcante-Natividade (Domínio Almas-Conceição do Tocantins e Cavalcante-Arraias) e regiões limítrofes (Maciço de Goiás, Arco Magmático de Goiás e Bacia do Parnaíba). Os dados de magnetometria, lineamentos magnetométricos, mostram correlação com as estruturas da área de estudo, com enfoque para o principal lineamento estrutural denominado Zona de Cisalhamento Cruz das Almas (ZCCA), feição que divide os domínios Almas-Conceição, a leste e Cavalcante-Arraias, a oeste (Figura 2.15). A ZCCA apresenta direção preferencial N-S com inflexão para NE e provavelmente tem idade paleoproterozóica. A Zona de Cisalhamento Mombuca (ZCM) é um corredor deformacional de direção NE-SW localizado no Domínio Cavalcante-Arraias de caráter transpressivo. A Zona de Cisalhamento Rio Formiga (ZCRF) também apresenta direção NE-SW e delimita o Domínio Cavalcante-Arraias e o Maciço de Goiás. A Zona de Cisalhamento Jatobazeiro (ZCJ) divide o Maciço de Goiás e o Arco Magmático de Goiás a partir de estrutura de direção N35E característica do Lineamento Transbrasiliano.

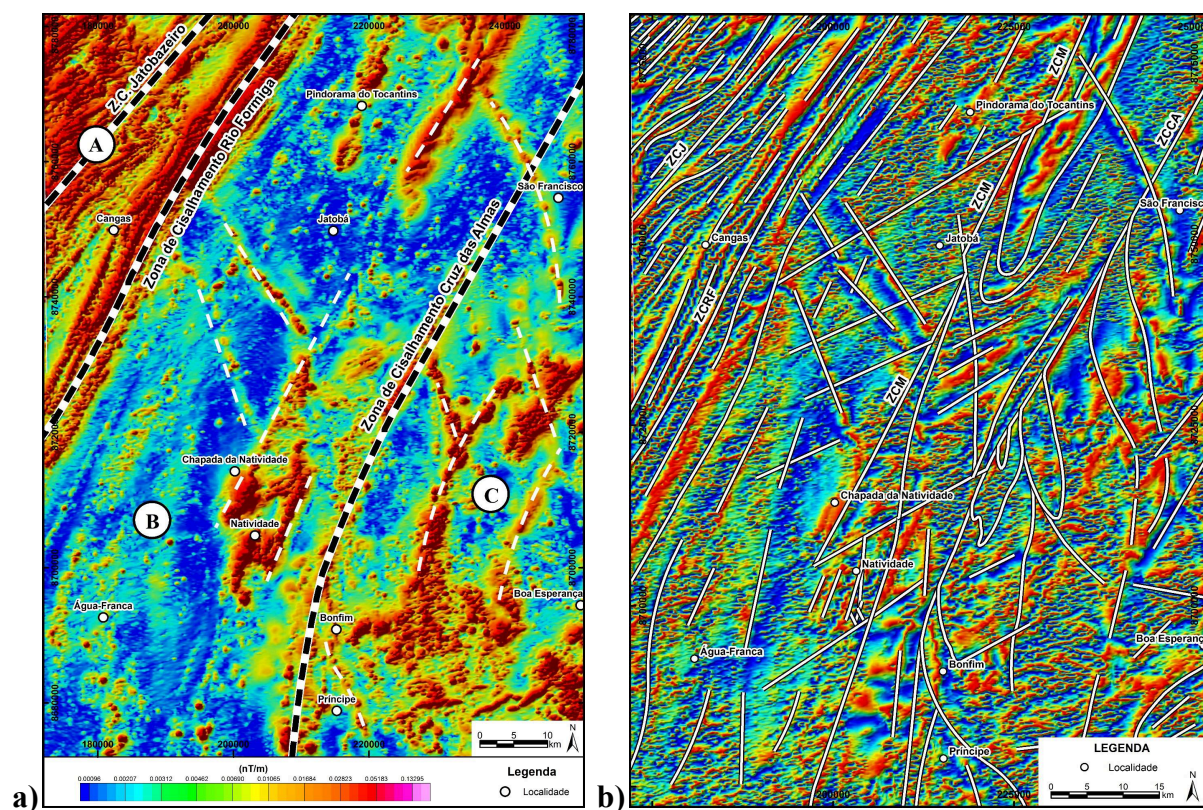


Figura 2.15: a) Produto Sinal Analítico, A - Lineamento Transbrasiliano; B - Domínio Cavalcante-Araias; C - Domínio Almas-Conceição do Tocantins; b) Produto Inclinação do Sinal Analítico (ISA ou TILT). Fonte: Praxedes (2015).

A Zona de Cisalhamento Cruz das Almas (ZCCA) também é apresentada no trabalho de Sousa et al. (2016) como um lineamento magnetométrico coincidente com a feição estrutural que separa os domínio Almas-Conceição do Tocantins e Natividade. No Sinal Analítico (Figura 2.16) observam-se distintos padrões de lineamentos magnetométricos para o Domínio Almas-Conceição do Tocantins, caracterizando-o com feições de alta frequência associadas às sequências metavulcano-sedimentares. O Domínio Natividade é marcado por baixo magnético formado por lineamentos magnetométricos de direção NNE-SSW, de mais elevada frequência.

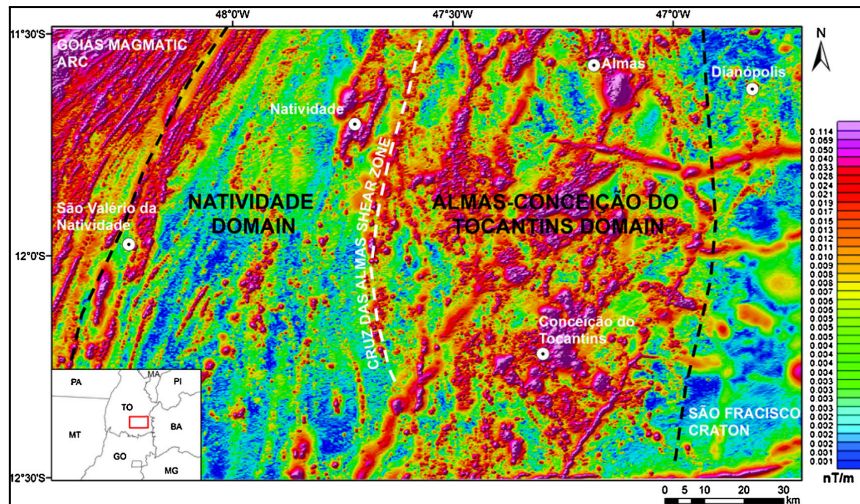


Figura 2.16: Produto Sinal Analítico (ASA). Fonte: Sousa et al. (2016).

Serafim (2017) mostra informações magnetométricas referentes ao Domínio Cavalcante-Araias a partir de faixas e lineamentos magnetométricos extraídos do produto Inclinação do Sinal Analítico (ISA), com três direções preferenciais: NE-SW, E-W e NW-SE (Figura 2.17). Assim, interpretam-se os lineamentos associados à zona rúptil NE-SW, enquanto os lineamentos com direção NW-SW e E-W relacionam-se ao Evento Transamazônico. O Evento Brasileiro reativou deformações rúpteis de direção NE-SW e é representado por cinemática predominantemente dextral.

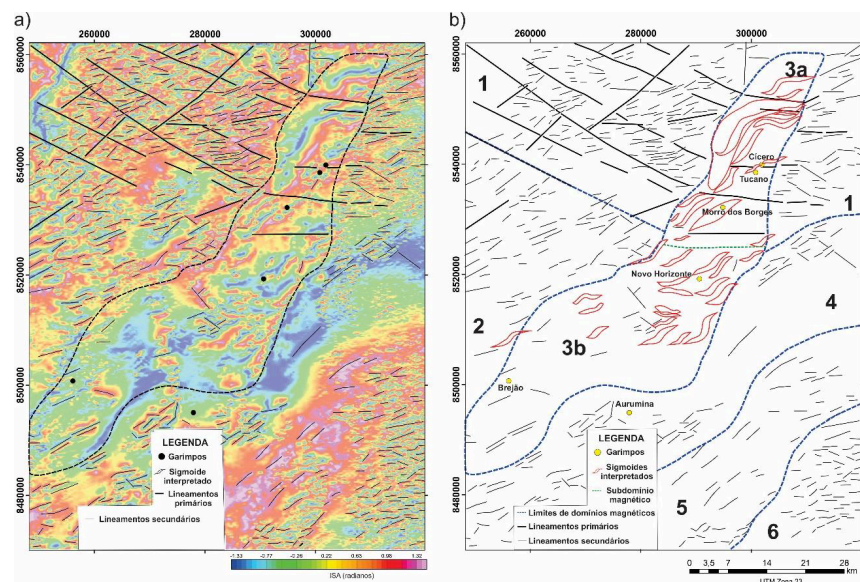


Figura 2.17: Interpretação dos dados magnetométricos. a) Produto ISA com destaque aos lineamentos e a faixa de textura magnética mais lisa; b) Interpretação magnetométrica da área em domínios magnetométricos, com base em lineamentos e feições com forma de sigmóide. Fonte: Serafim (2017).

2.2.2 Cráton do São Francisco

Assumpção et al. (2017) estudam a litosfera e a espessura crustal do Cráton do São Francisco, bem como as faixas adjacentes por meio de dados gravimétricos, função do receptor e velocidades sísmicas do manto superior, obtidos a partir de tomografia sísmica. Os dados gravimétricos do satélite GOCE mostram baixas anomalias Bouguer nos contatos entre o cráton e as faixas Brasília e Araçuaí, e valores intermediários na porção centro-oeste do Cráton do São Francisco (Figura 2.18).

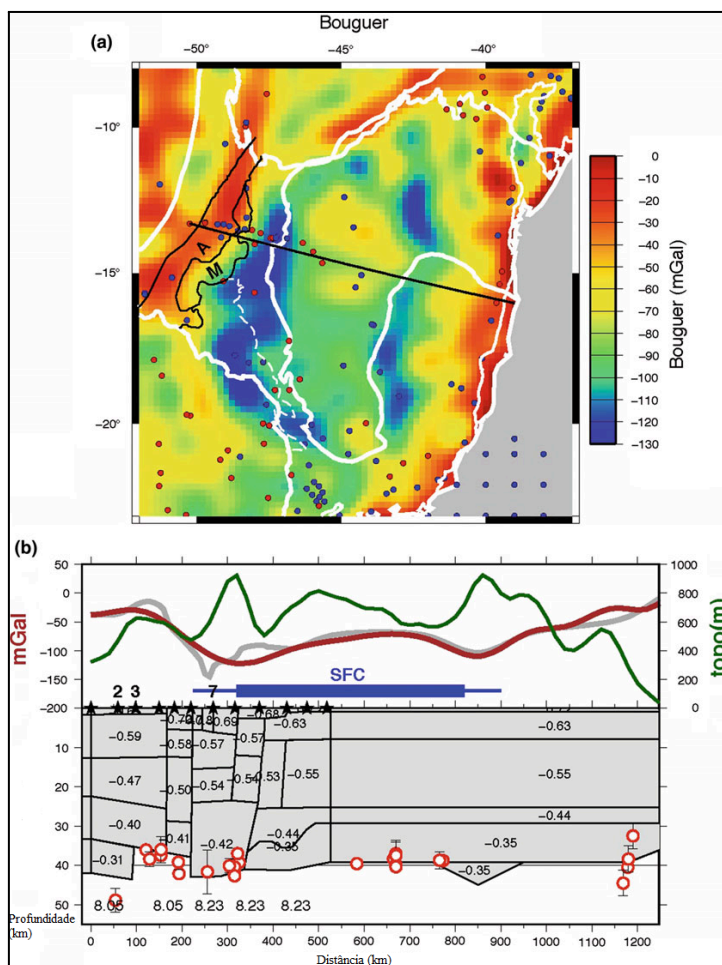


Figura 2.18. a) Mapa de anomalia Bouguer (GOCE) mostrando as assinaturas gravimétricas ao longo dos limites, ocidental e oriental, do Cráton do São Francisco; b) Modelo 2D de espessura crustal na parte central do Cráton do São Francisco. Fonte: Assumpção et al. (2017).

Lima et al. (2020) apresentam produtos gravimétricos de satélite, da missão CHAMP e compilação WGM2012, utilizados para delimitar e caracterizar o Cráton do São Francisco e suas zonas limítrofes: i) Província Tocantins, Faixa Brasília e ii) Província Mantiqueira, Faixas Ribeira e Araçuaí. Os resultados exibem assinaturas gravimétricas características para o Cráton do São Francisco e para os cinturões orogenéticos (Figura 2.19). Assim, o estudo

mostrou-se eficaz para a delimitação de contatos geotectônicos em subsuperfície a partir da aplicação de dados de gravimetria de satélite.

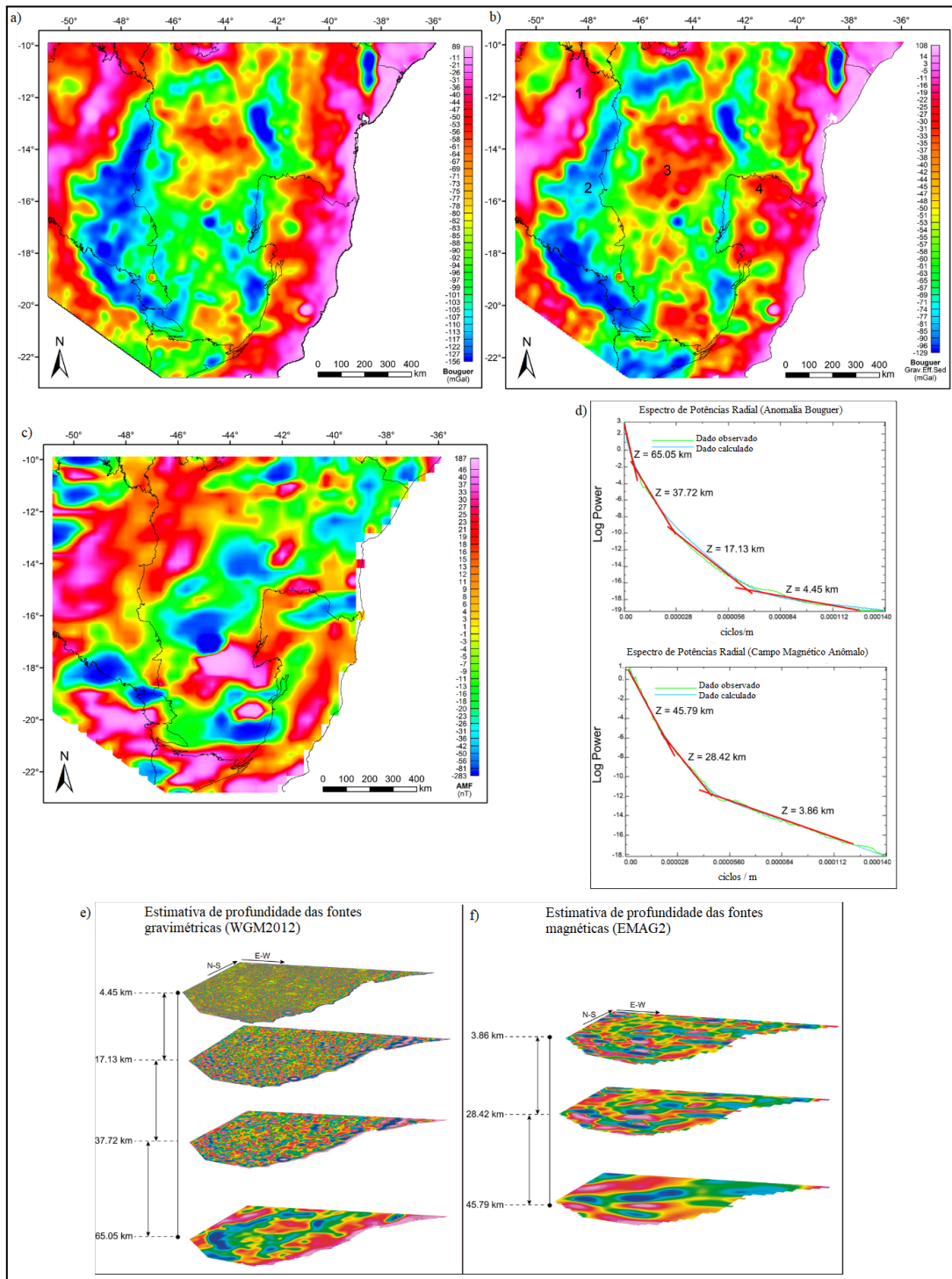


Figura 2.19: a) Anomalia Bouguer, b) Anomalia Bouguer com remoção do efeito gravimétrico dos sedimentos e os números indicam os principais domínios interpretados. c) Campo Magnético Anômalo; d) Espectro de Potências; e) Empilhamento dos produtos do *matched filter* gravimétricos; f) Empilhamento dos produtos do *matched filter* magnéticos Fonte: Lima et al. (2020).

3. Fundamentação Teórica

3.1 Método Magnetométrico

O método magnetométrico tem sido empregado para uma variedade de problemas relacionados ao mapeamento de subsuperfície, desde a primeira vez que foi utilizado, no século XVII, para a localização de depósitos de minério de ferro em subsuperfície (Hinze 2013).

Esse método é de exploração passiva, pois é fundamentado no mapeamento do campo de força magnética natural ou normal da Terra. O campo geomagnético está sempre presente, mas varia espacialmente e no tempo. Essas variações distorcem as mudanças anômalas locais no campo, para fontes em subsuperfície, foco de interesse em levantamentos magnetométricos. Assim, para a interpretação de anomalias locais, rotinas matemáticas são aplicadas nos dados magnetométricos, com o intuito de diminuir a influência geomagnética (Hinze 2013).

Em torno de uma barra magnética existe um fluxo magnético, conforme indicado pelas linhas de fluxo na Figura 3.1. Essas linhas convergem próximo às extremidades do ímã, regiões conhecidas como polos magnéticos. Os polos sempre existem em pares de sentidos opostos para formar um dipolo. Quando um polo está suficientemente afastado do outro para não causar interferência, o polo único é denominado monopolo (Reynolds 2011).

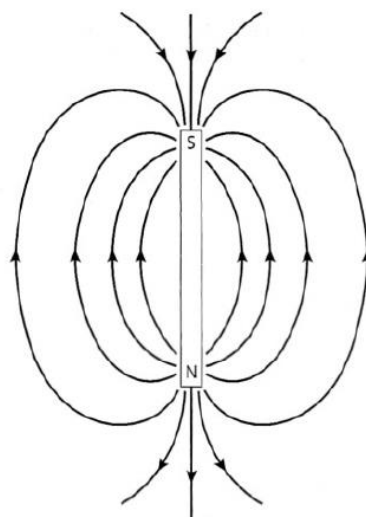


Figura 3.1: O fluxo magnético ao redor de uma barra magnética. Fonte: Kearey (2009).

Segundo Kearey (2009), a força F entre dois polos magnéticos de intensidades m_1 e m_2 , separados por uma distância r , é dada por:

$$F = \frac{\mu_0 m_1 m_2}{4\pi\mu_R r^2} \text{ (Eq. 3.1)}$$

em que μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo e μ_R a permeabilidade magnética relativa do meio que separa os polos. R é a distância entre os corpos p_1 e p_2 . A força F é atrativa se os polos são de sinais opostos e é repulsiva se são de mesmo sinal.

O campo magnético (B) em razão de um polo de intensidade m a uma distância r do polo é definido como a força exercida sobre uma unidade de polo positiva naquele ponto (Kearey 2009):

$$B = \frac{\mu_0 m}{4\pi\mu_R r^2} \text{ (Eq. 3.2)}$$

Os campos magnéticos podem ser definidos, em termos de potenciais magnéticos, de um modo semelhante aos campos gravitacionais. Para um único polo de intensidade m , o potencial magnético V a uma distância r do polo é dado por (Kearey 2009):

$$V = \frac{\mu_0 m}{4\pi\mu_R r} \text{ (Eq. 3.3)}$$

O campo magnético terrestre é a soma de vários componentes magnéticos, derivados tanto de dentro como de fora da Terra. O campo principal gerado por correntes eletromagnéticas no núcleo externo da Terra é responsável por cerca de 98% do campo geomagnético. Os campos externos são altamente dinâmicos, devido à interação dos plasmas solares com o campo central, contribuindo com a maior parte do campo restante. Sobrepostos aos campos principal e externo estão os efeitos estáticos relativamente menores de contrastes de magnetização de subsuperfície, que são de interesse em estudos de exploração usados para determinar as propriedades composicionais, estruturais e térmicas e, portanto, a história da crosta terrestre e do manto superior (Hinze 2013).

No que diz respeito à geofísica de exploração, o campo geomagnético é composto por três partes: i) O campo principal, que varia relativamente devagar e é de origem interna; ii) um pequeno campo, comparado ao campo principal, que varia rapidamente e se origina fora da Terra; iii) em decorrência das variações espaciais do campo principal, geralmente são menores que as do campo principal, são quase constantes no tempo e no espaço, causadas por anomalias magnéticas locais na crosta próxima à superfície da Terra (Telford 1990).

Mudanças locais no campo principal resultam de variações magnéticas causadas por variações mineralógicas das rochas próximas à superfície. As fontes de anomalias magnéticas locais não podem ser muito profundas, porque temperaturas abaixo de aproximadamente 40 km devem estar acima do ponto Curie, pois com temperatura maior que 580° C as rochas perdem suas propriedades magnéticas ou capacidade de magnetização. Assim, as anomalias locais devem estar associadas a feições na crosta superior (Telford 1990; Schön 2004).

A susceptibilidade magnética é uma propriedade importante de rochas. As rochas formadas por minerais que possuem concentrações significativas de ferro e são ferrimagnéticos tendem a apresentar as maiores susceptibilidades magnéticas (Tabela 3.1). Consequentemente, as rochas básicas e ultrabásicas têm as susceptibilidades mais altas, as rochas ígneas e metamórficas ácidas possuem valores intermediários a baixos e as rochas sedimentares têm susceptibilidades muito baixas. Em geral, as rochas metamórficas são dependentes de seu material de origem (Reynolds 2011).

Os minerais mais comuns, formadores de rochas, apresentam baixa susceptibilidade magnética e, portanto, indicam caráter magnético das rochas por apresentarem minerais pobres em ferro. O mineral magnético mais comum é a magnetita ($FeO \cdot Fe_2O_3$), seguido pela pirrotita ($Fe_{2-1+x}S$). Em decorrência disto, é possível classificar o comportamento magnético das rochas com base no conteúdo total desses minerais (Schön 2004; Kearey 2009).

A magnetização das rochas está diretamente relacionada à direção de atuação do campo geomagnético durante sua formação. Inversões no campo magnético terrestre, ao longo dos anos, imprimem características do vetor de magnetização nas rochas. No assoalho oceânico do Atlântico o movimento divergente das placas tectônicas Sul-Americana e Africana exibe um padrão zebado de direções reversas de magnetização. O paleomagnetismo ajuda a datar as mudanças magnéticas ocorridas nas rochas e determinar movimentos passados, como rotações de placas. Os métodos de laboratório paleomagnéticos separam a magnetização residual da induzida, algo que não pode ser feito no campo (Telford 1990).

Tabela 3.1: Suscetibilidade magnética de rochas e minerais. Fonte: Adaptado de Telford (1990).

Susceptibilidade X 10 ³ (SI)		
Tipo	Variação	Média
Sedimentar		
Dolomito	0 - 0,9	0,1
Calcários	0 - 3	0,3
Arenitos	0 - 20	0,4
Folhelhos	0,01 - 15	0,6
Média 48 sedimentar	0 - 18	0,9

Metamórfica		
Anfibolito		0,7
Xisto	0,3 - 3	1,4
Filito		1,5
Gnaisse	0,1 - 25	
Quartzito		4
Serpentinito	3 - 17	
Ardósia	0 - 35	6
Média 61 metamórfica	0 - 70	4,2
Ígnea		
Granito	0 - 50	2,5
Riolito	0,2 - 35	
Dolorito	1 - 35	17
Augita-sienito	30 - 40	
Olivina-diabásio		25
Diabásio	1 - 160	55
Pórfiro	0,3 - 200	60
Gabro	1 - 90	70
Basaltos	0,2 - 175	70
Diorito	0,6 - 120	85
Piroxenito		125
Peridotito	90 - 200	150
Andesito		160
Média ígnea ácida	0 - 80	8
Média ígnea básica	0,5 - 97	25
Minerais		
Grafita		0,1
Quartzo		-0,01
Halita		-0,01
Anidrita, Gipsita		-0,01
Calcita	-0,001 - -0,01	
Carvão		0,02
Argilas		0,2
Calcopirita		0,4
Esfalerita		0,7
Cassiterita		0,9
Siderita	1 - 4	
Pirita	0,05 - 5	1,5
Limonita		2,5
Arsenopirita		3
Hematita	0,5 - 35	6,5
Cromita	3 - 110	7
Franklinita		430
Pirrotita	1 - 6000	1500
Ilmenita	300 - 3500	1800
Magnetita	1200 - 19200	6000

3.2 Método Gravimétrico

O método gravimétrico é importante para solucionar problemas que envolvem mapeamento de subsuperfície. É um método utilizado em diversos estudos geológicos, por exemplo, estudos quantitativos de corpos de minério metálico, caracterização de estruturas de sal e monitoramento de mudanças no conteúdo de fluido/gás em vulcões. O método raramente fornece uma única resposta. Existe o problema da ambiguidade geofísica e para resolver isso, outros métodos geofísicos devem ser utilizados. A gravimetria também tem sido usada na caracterização regional da Terra para determinar a forma da crosta, identificar regiões potencialmente favoráveis para a exploração de recursos e desenvolver modelos conceituais de exploração (Hinze 2013).

O método de levantamento gravimétrico é baseado na Lei de Gravitação de Newton, que afirma que a força de atração F entre duas massas, m_1 e m_2 , cujas dimensões são pequenas com respeito à distância r entre elas, é obtida por (Kearey 2009):

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2} \text{ (Eq. 3.4)}$$

em que G é a Constante Gravitacional ($6,67 \times 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$).

Supondo que a Terra seja uma esfera estática, homogênea, podemos inferir a aceleração gravitacional g que esses corpos podem adquirir tomando como base a segunda Lei de Newton e a equação 3.1 acima (Kearey 2009):

$$F = mg \text{ (Eq. 3.5)}$$

Contudo, sabe-se que a Terra possui formato elipsoidal, rotação, relevo irregular e distribuição interna das massas. Isso permite que a gravidade varie em sua superfície. Assim, o campo gravitacional é definido em termos do potencial gravimétrico (U) (Kearey 2009):

$$U = \frac{GM}{r} \text{ (Eq. 3.6)}$$

O método gravimétrico é focado na medida e análise de perturbações ou anomalias no campo terrestre causadas por variações laterais na densidade em subsuperfície. O campo gravitacional da Terra inclui variações espaciais devido a variações temporais relacionadas aos efeitos da gravidade diferencial da Lua e do Sol na Terra. Cada observação da gravidade na superfície terrestre inclui esses efeitos de gravidade normal, que no caso de variações espaciais e algumas variações temporais são grandes em comparação com muitos efeitos de gravidade geológica (Hinze 2013).

A magnitude da gravidade depende de cinco fatores: latitude, elevação, topografia do terreno circundante, marés terrestres e variações de densidade em subsuperfície. Para reduzir a influência dos demais fatores sobre as variações de densidade em profundidade, que são mais importantes para a exploração, são realizadas correções: i) Correção de Latitude; ii) Correção Ar-Livre; iii) Correção Bouguer; iv) Correção de Terreno; v) Correção de Maré; vi) Correção Isostática. A partir dessas correções, obtém-se as anomalias Bouguer e Ar-Livre, as principais e mais utilizadas para a confecção dos demais produtos (Telford 1990).

O levantamento gravimétrico é sensível às variações de densidade das rochas (Tabela 3.2), portanto, uma apreciação dos fatores que afetam a densidade auxilia na interpretação dos dados de gravidade. Esses métodos têm a vantagem de determinar a densidade em condições naturais e sobre um grande volume (Reynolds 2011; Hinze 2013).

Tabela 3.2: Densidade de Rochas. Fonte: Adaptado de Telford (1990).

Densidade (g/cm³)		
Tipo de Rocha	Variação	Média
Sedimentos (úmidos)		
Sobrecarregados		1,92
Solo	1,20 - 2,40	1,92
Argila	1,63 - 2,60	2,21
Cascalho	1,70 - 2,40	2,00
Areia	1,70 - 2,30	2,00
Arenito	1,61 - 2,76	2,35
Xisto	1,77 - 3,20	2,40
Calcário	1,93 - 2,90	2,55
Dolomita	2,28 - 2,90	2,70
Rochas sedimentares (méd.)		2,50
Rochas ígneas		
Riolito	2,35 - 2,70	2,52
Andesito	2,40 - 2,80	2,61
Granito	2,50 - 2,81	2,64
Granodiorito	2,67 - 2,79	2,73
Pórfiro	2,60 - 2,89	2,74
Quartzo diorito	2,62 - 2,96	2,79
Diorito	2,72 - 2,99	2,85
Lavas	2,80 - 3,00	2,90
Diabásio	2,50 - 3,20	2,91
Basalto	2,70 - 3,30	2,99
Gabro	2,70 - 3,50	3,03

Peridotito	2,78 - 3,37	3,15
Média ígnea ácida	2,30 - 3,11	2,61
Média ígnea básica	2,09 - 3,17	2,79
Rochas metamórficas		
Quartzito	2,50 - 2,70	2,60
Xistos	2,39 - 2,90	2,64
Grauvaca	2,60 - 2,70	2,65
Mármore	2,60 - 2,90	2,75
Serpentina	2,40 - 3,10	2,78
Ardósia	2,70 - 2,90	2,79
Gneisse	2,59 - 3,00	2,80
Anfíbolito	2,90 - 3,04	2,96
Eclogita	3,20 - 3,54	3,37
Média metamórfica	2,40 - 3,10	2,74

4. Natureza dos Dados e Metodologia

Este trabalho apresenta dados potenciais magnetométricos e gravimétricos, aéreos e terrestres, respectivamente, e dados petrofísicos de susceptibilidade magnética e densidade. Os produtos integrados corroboram a caracterização geofísica-geológica do Bloco Cavalcante-Natividade e regiões limítrofes.

4.1 Natureza dos Dados

4.1.1 Dados Aéreos

Os dados magnetométricos utilizados nesta pesquisa são oriundos de aerolevantamentos disponibilizados pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), Secretaria de Estado de Minas e Energia do Governo de MG (SEME) e Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais e Serviço Geológico do Brasil (CODEMIG/SBG). Os grids utilizados pertencem aos projetos aerogeofísicos exibidos na Figura 4.1 e detalhados na Tabela 4.1.

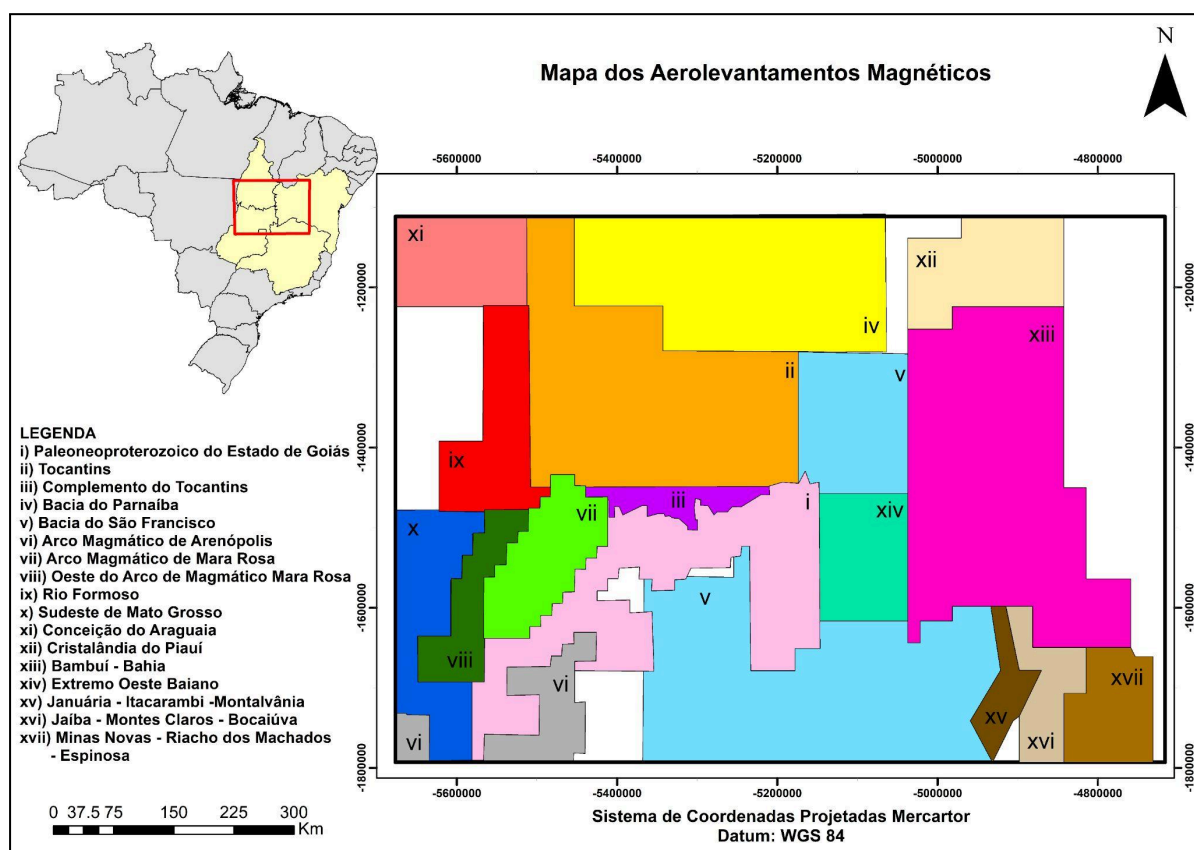


Figura 4.1: Mapa dos aerolevantamentos geofísicos magnetométricos utilizados na integração dos grids.

Tabela 4.1: Características dos Aerolevantamentos magnetométricos.

Aerolevantamentos	Direção e espaçamento entre as linhas de voo (m)	Direção e espaçamento entre as linhas de controle (m)	Ano
Paleoneoproterozóico do Nordeste de Goiás (1)	N-S 500	E-W 5000	2006
Tocantins (1)	N-S 500	E-W 10000	2005/2006
Complemento do Tocantins (1)	N-S 500	E-W 10000	2006/2007
Bacia do Parnaíba (2)	N-S 500	E-W 10000	2005/2006
Bacia do São Francisco (2)	N-S 6000	E-W 24000	2007/2008
Arco Magmático de Arenópolis (1)	N-S 500	E-W 5000	2004
Arco Magmático de Mara Rosa (1)	N-S 500	E-W 5000	2004
Oeste do Arco Magmático de Mara Rosa (1)	N-S 500	E-W 5000	2005
Rio Formoso (1)	N-S 500	E-W 10000	2014
Sudeste do Mato Grosso (1)	N-S 500	E-W 10000	2011/2012
Conceição do Araguaia (1)	N-S 500	E-W 10000	2012
Cristalândia do Piauí (1)	N-S 500	E-W 10000	2009
BambuÍ-Bahia (1)	N-S 500	E-W 10000	2012
Extremo Oeste da Bahia (1*)	N-S 500	E-W 5000	2015
Januária - Itacarambi - Montalvânia (3)	N30W 250	N60E 2500	2000/2001
Jaíba - Montes Claros - Bocaiúva (4)	N25W 500	N65E 10000	2009
Minas Novas - Riacho dos Machados - Espinosa (4)	N25W 500	N65E 10000	2005/2006

Notas: Agências responsáveis: (1) CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais); (1*) CBPM/CPRM; (2) ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), (3) SEME (Secretaria de Estado de Minas e Energia do Governo de MG); e (4) CODEMIG/SBG (Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais e Serviço Geológico do Brasil).

4.1.2 Dados Terrestres

Os dados gravimétricos utilizados são oriundos de aquisições terrestres obtidas pelas instituições: Laboratório de Estudos da Litosfera - LabLitos (IG/UnB) e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (Soares 2005; Soares et al. 2006) e Agência Nacional do Petróleo - ANP. O banco de dados compilado resulta da junção de dois bancos de dados disponibilizados, de forma gratuita. A densidade de pontos de aquisição/estações sobre a área de estudo é satisfatória, entretanto a distribuição desses é irregular (Figura 4.2). As variáveis gravimétricas presentes nos bancos de dados são as anomalias Bouguer e Ar-Livre.

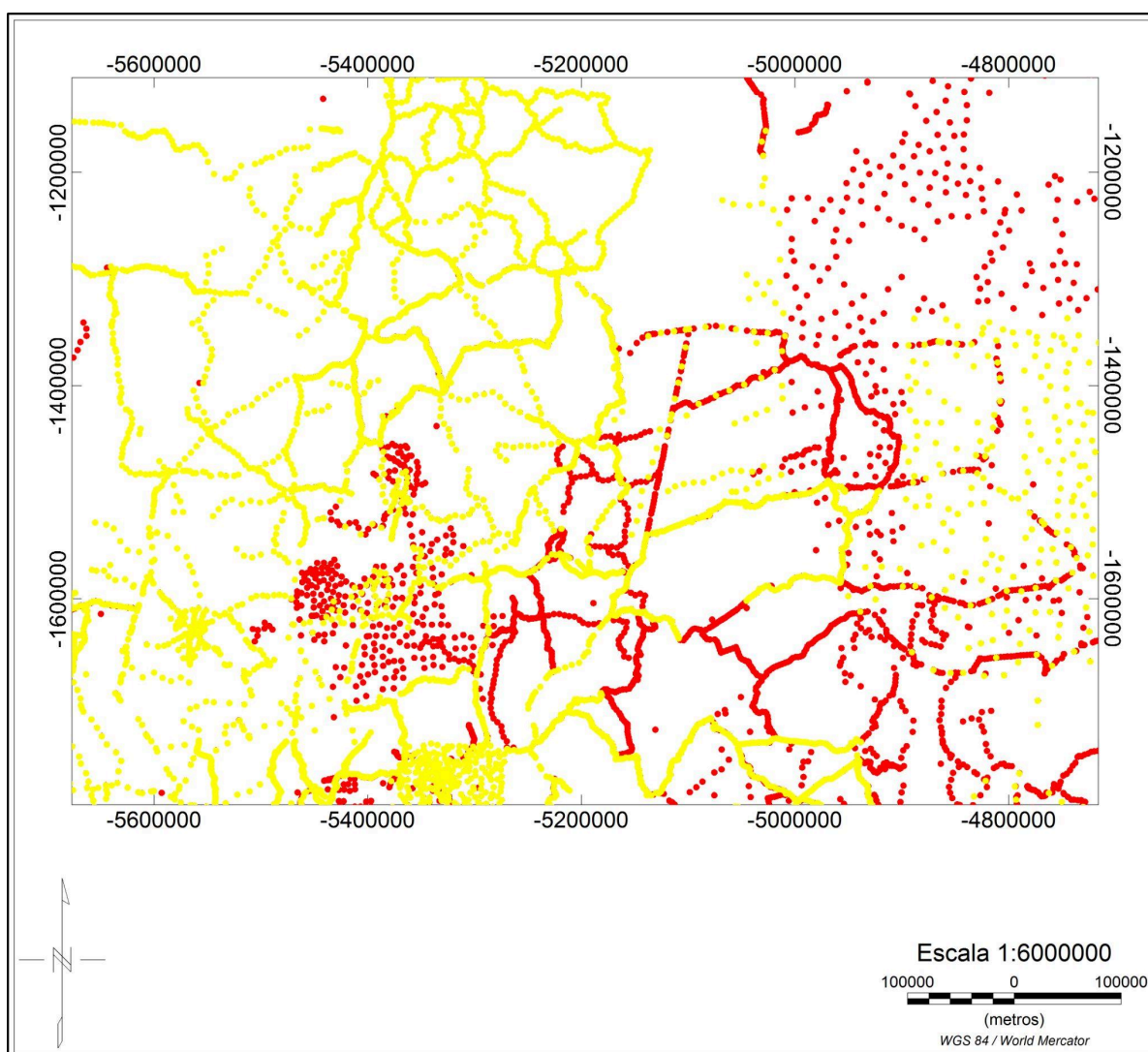


Figura 4.2: Mapa das estações gravimétricas. Em amarelo os pontos são provenientes do banco de dados do LabLitos - UnB / IBGE e em vermelho os pontos do banco de dados da ANP.

4.1.3 Dados Petrofísicos

As amostras de rocha foram coletadas em duas campanhas de campo realizadas nos períodos de: 20 a 22 de maio de 2022 e 16 a 19 de junho de 2022. Os pontos de coleta foram

selecionados previamente conforme sua representatividade local e regional, sendo o foco o Bloco Cavalcante-Natividade (Figura 4.3). Um dos objetivos desta pesquisa é apresentar e descrever o embasamento da Faixa Brasília a partir de suas propriedades físicas (densidade, susceptibilidade magnética e resistividade).

Das 32 amostras coletadas foram selecionadas 22 amostras para análise, de acordo com a sua representatividade regional, com a orientação do Professor Nilson Francisquini Botelho. Essas amostras foram preparadas e foram confeccionados plugues e/ou lâminas delgadas no Laboratório de Laminação do Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. O tamanho selecionado para os plugues é de 1 polegada ($01' = 2,54$ cm) de diâmetro, por 1 polegada de altura.

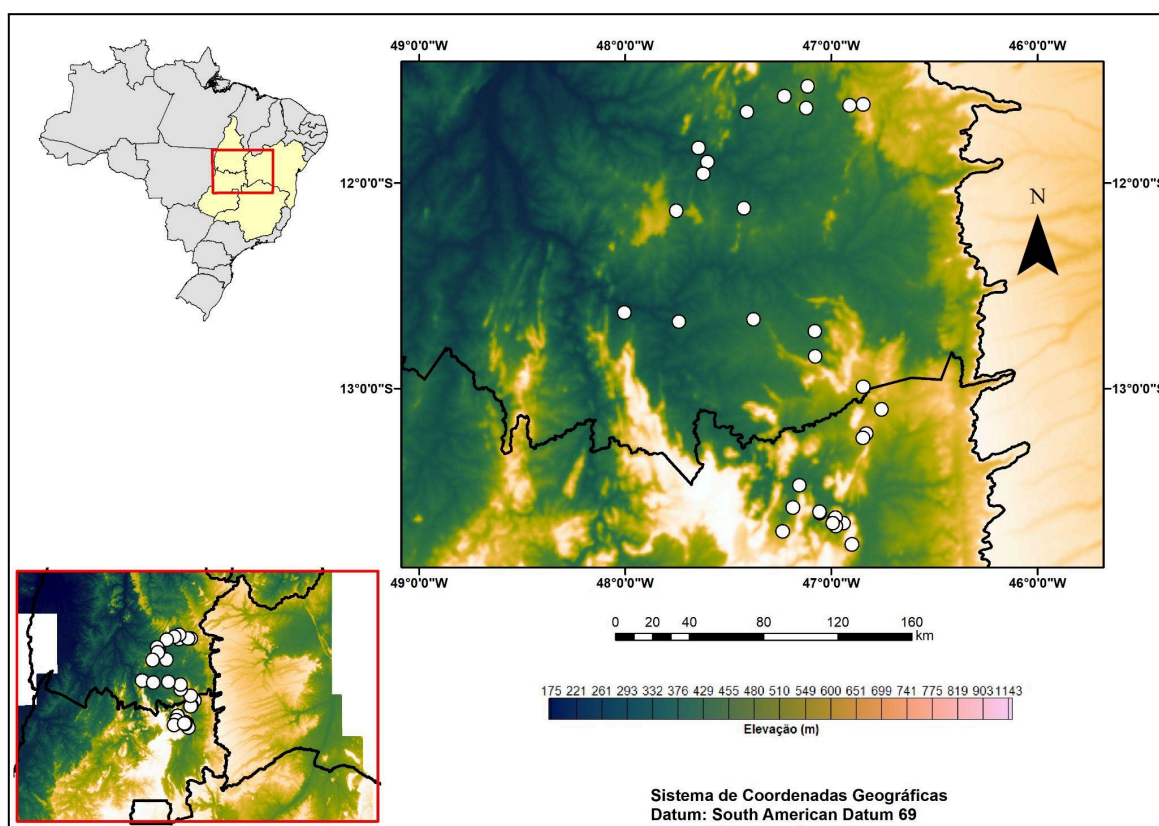


Figura 4.3: Mapa de localização dos pontos (em branco) de coleta de amostras de rocha.

4.1.3.1 Susceptibilidade Magnética

Para a medição do parâmetro geofísico de susceptibilidade magnética das rochas foi utilizado o equipamento Susceptibilímetro MPP-EM2S+ da GDD *Instrumentation* (Figura 4.4). Os valores de cada amostra resultaram da média obtida pela a realização de 5 a 10 medidas. As amostras em que ocorreram 10 medições apresentaram valores de susceptibilidade magnética inferior a 0,5 SI. Esse sistema de medição foi adotado devido à acurácia do equipamento.



Figura 4.4: Fotografia de aquisição de dados do equipamento MPP-EM2S+ da GDD *Instrumentation*.
Fonte: <https://www.gddinstrumentation.com/mpp-probe>.

4.1.3.2 Densidade

O equipamento utilizado para a medição da Densidade (g/cm^3) das amostras foi o Pentapyc 5200e - *Automatic Density Analyzer* da AZo *Materials*. O método de aquisição de densidade específica por gás picnômetro segue a norma ASTM D5550 (2014), com adaptações para rochas (Figura 4.5). Foram selecionados 17 plugues representativos para a geologia regional. Cada amostra obteve cinco aquisições de densidade para o cálculo da densidade média.

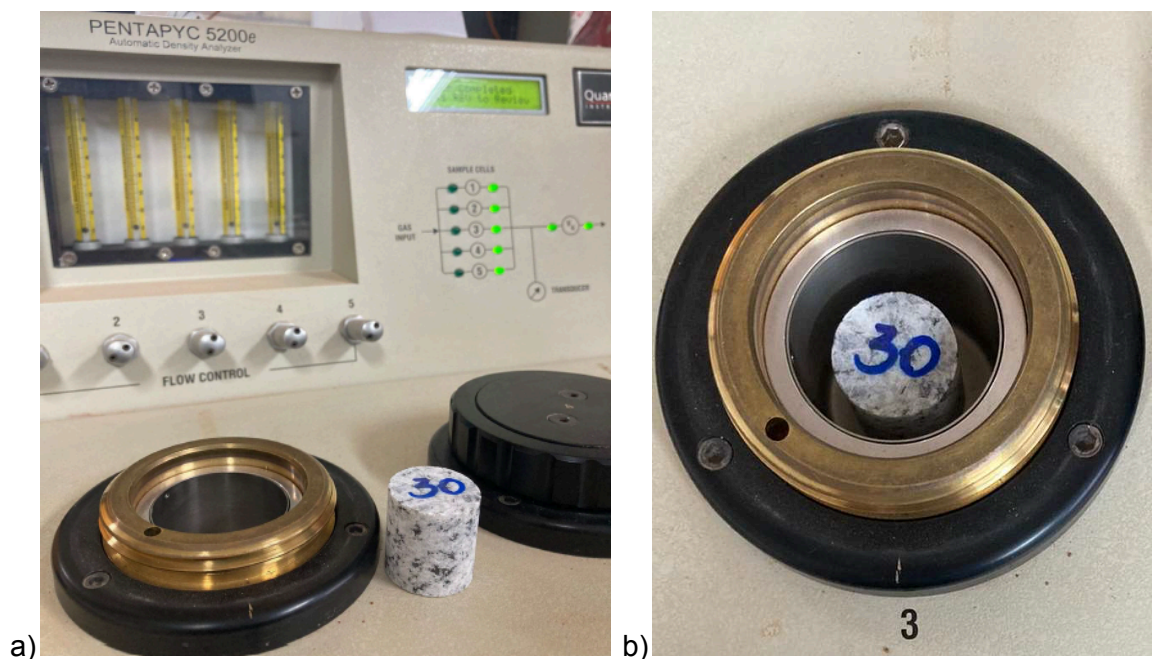


Figura 4.5: Fotografias das medições de densidade realizada na amostra 30.

4.2 Pré e Processamento dos Dados

4.2.1 Dados Aéreos

Os dados magnetométricos aéreos utilizados resultam da junção dos *grids*, citados anteriormente, gerados no *Oasis montajTM*, Versão 2021.2.1, *Geosoft® - Seequent*, a partir da ferramenta *Grid Knitting* e possuem tamanho de célula de 125 m X 125 m. A aplicação de filtros, operações matemáticas, resultam em correções com o objetivo de melhorar a compreensão das anomalias magnéticas presentes na área de estudo. O Campo Magnético Anômalo (CMA) (Figura 4.6) é o produto base que será utilizado para a confecção dos demais produtos. O sistema de coordenadas cartesianas escolhido foi o *World Mercator* (EPSG: 3395), pois alguns produtos não podem ser confeccionados em coordenadas geográficas.

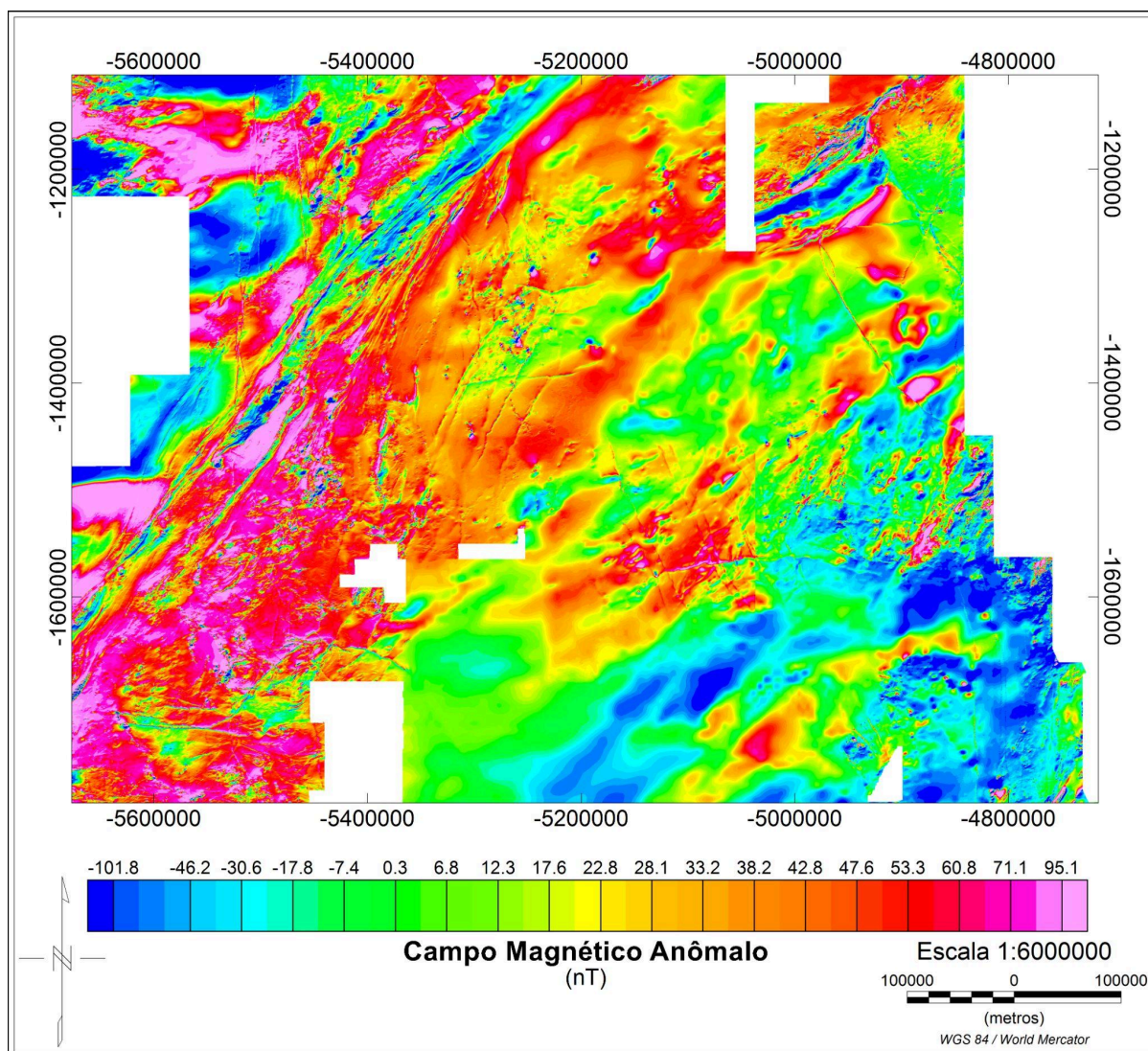


Figura 4.6: Produto Campo Magnético Anômalo (CMA).

A Derivada Vertical (DZ) (Figura 4.7) consiste na derivada de direção vertical da amplitude da anomalia. Assim, a DZ resalta fontes rasas de alta frequência e é descrita por:

$$DZ = \frac{dA}{dz} \text{ (Eq. 4.1)}$$

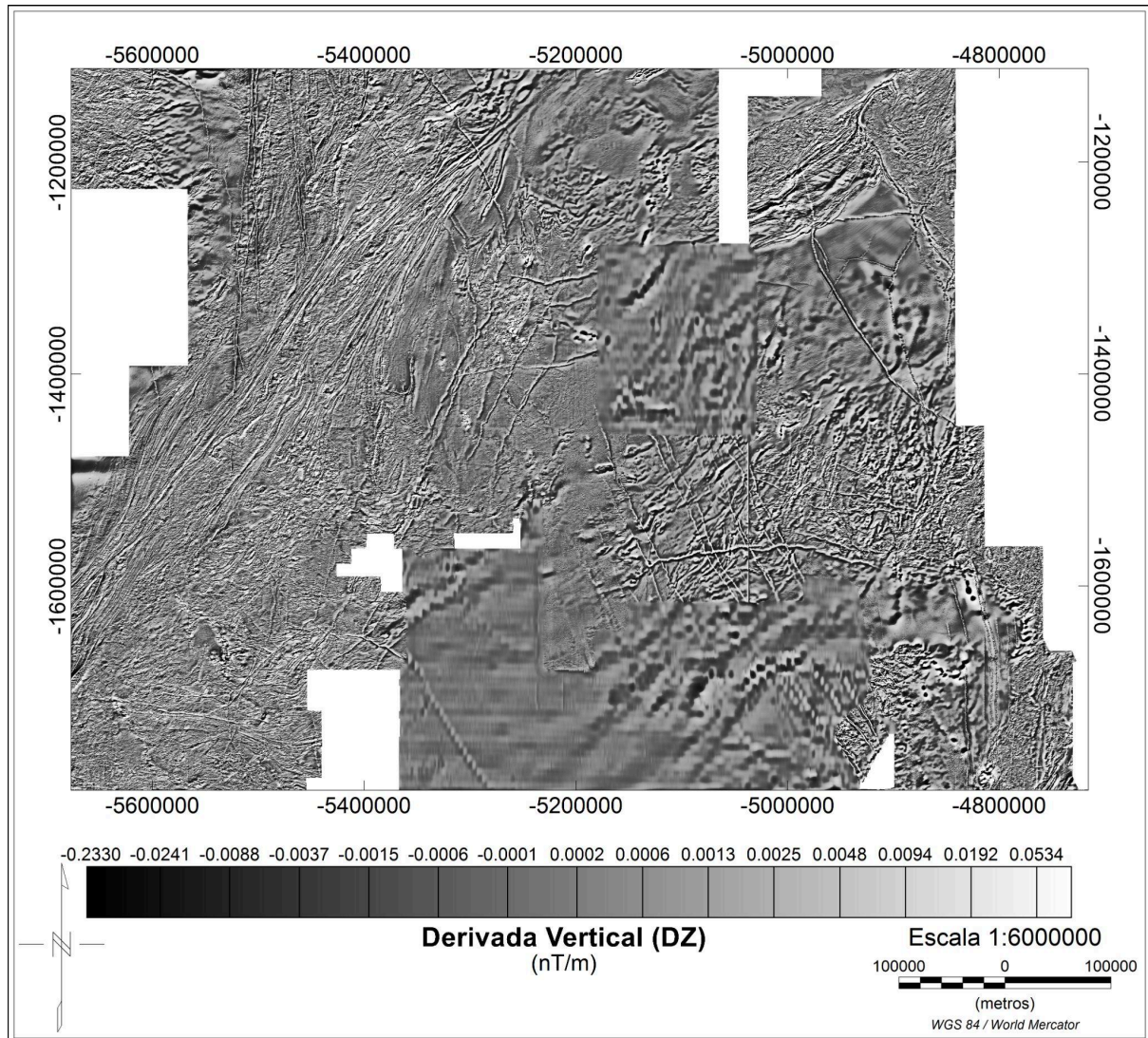


Figura 4.7: Produto Magnético Derivada Vertical (DZ).

O Gradiente Horizontal Total (GHT) (Figura 4.8) é um filtro utilizado para a delimitação das bordas do corpo anômalo. A variação magnética lateral causada por mudanças abruptas entre contatos geológicos é ressaltada pelo GHT. O Gradiente Horizontal Total (Blakely 1996) é calculado a partir da raiz quadrada da soma dos quadrados das derivadas das anomalias magnéticas (A) nas direções x e y:

$$GHT = \sqrt{\left(\frac{dA}{dX}\right)^2 + \left(\frac{dA}{dY}\right)^2} \text{ (Eq. 4.2)}$$

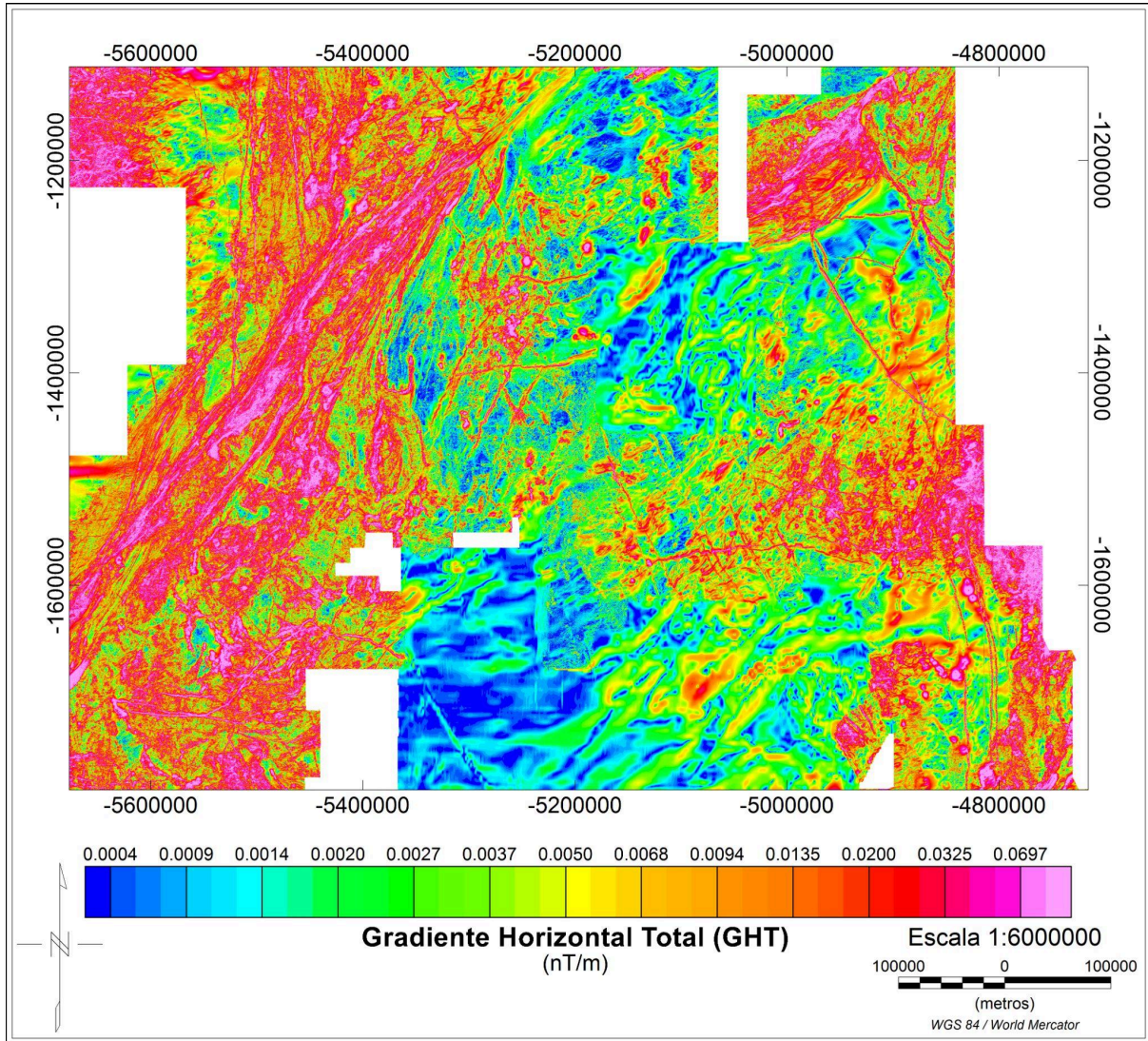


Figura 4.8: Produto Magnético Gradiente Horizontal Total (GHT).

O Gradiente Total (GT), comumente chamado de Amplitude do Sinal Analítico (ASA) em literaturas anteriores, também é um filtro que resalta bordas de corpos magnéticos (Xi 2006). Segundo Blakely (1996), o GT (Figura 4.9) consiste na combinação dos gradientes horizontal e vertical da anomalia. Seus resultados são dependentes da profundidade, extensão e ângulo de mergulho do corpo, além da direção do campo magnético da Terra. A Amplitude do Sinal Analítico é dada pela equação (Reid 2012):

$$GT = \sqrt{\left(\frac{dA}{dX}\right)^2 + \left(\frac{dA}{dY}\right)^2 + \left(\frac{dA}{dZ}\right)^2} \text{ (Eq. 4.3)}$$

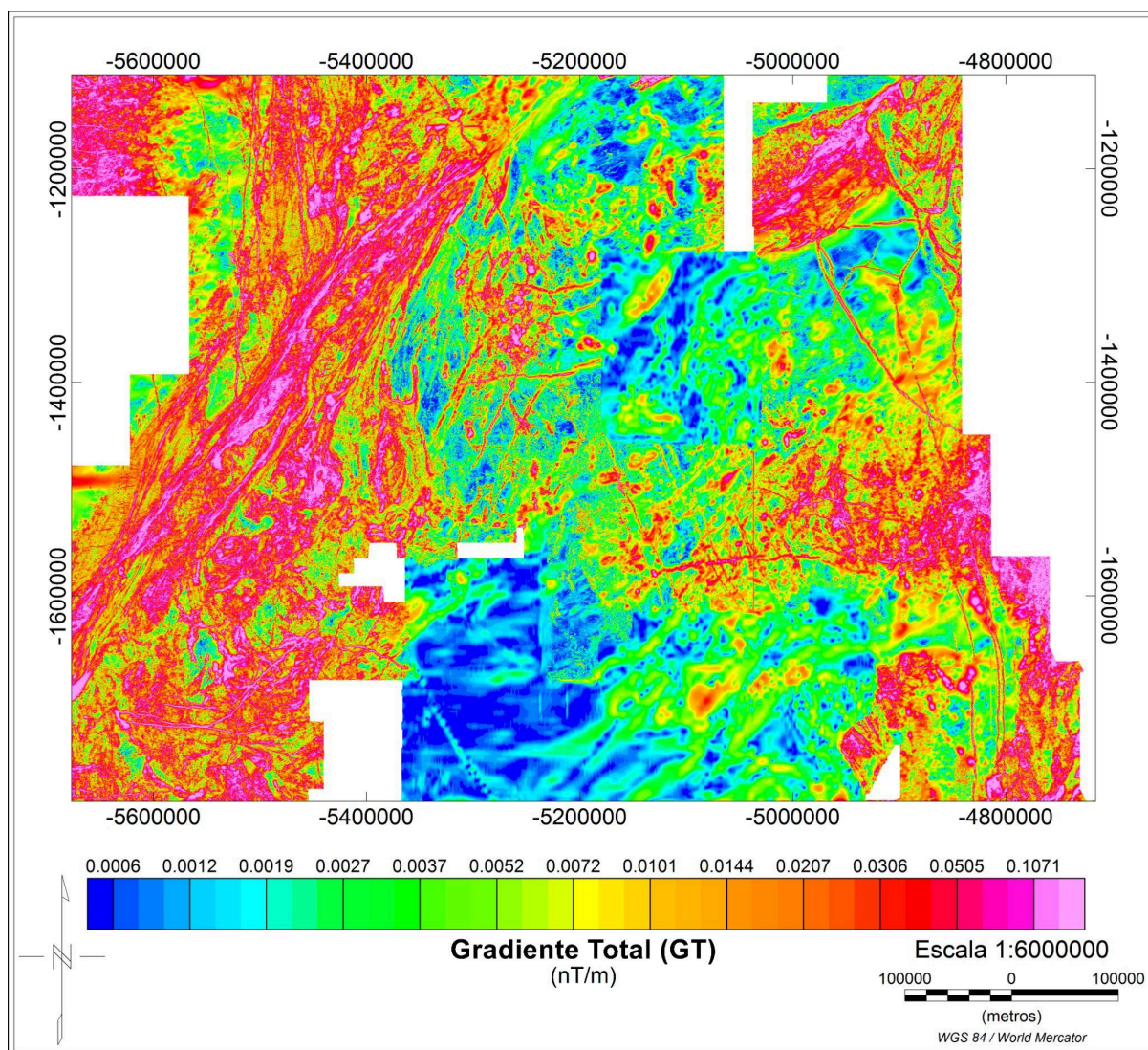


Figura 4.9: Produto Magnético do Gradiente Total (GT).

O Tilt Derivative ou Inclinação do Sinal Analítico (ISA) é um filtro que resalta estruturas e lineamentos. O Tilt (Figura 4.10) é calculado a partir do arco tangente da Derivada Vertical sobre o Gradiente Horizontal Total, conforme a equação:

$$TILT = \text{atan}\left(\frac{DZ}{GHT}\right) \text{ (Eq. 4.4)}$$

Os lineamentos magnetométricos foram traçados manualmente, no *software* QGis, a partir da análise dos produtos Tilt Derivative (ou Inclinação do Sinal Analítico) e Gradiente Total (GT). A Roseta direcional também foi confeccionada no *software* QGis por meio da ferramenta *Line Direction Histogram*. Os lineamentos foram separados nas direções: i) NE-SW ($15^\circ \leq X < 75^\circ$); ii) NW-SE ($285^\circ \leq Y < 345^\circ$); iii) N-S ($345^\circ \leq Z < 15^\circ$); e iv) E-W ($75^\circ \leq W < 90^\circ$) e ($270^\circ \leq W < 285^\circ$).

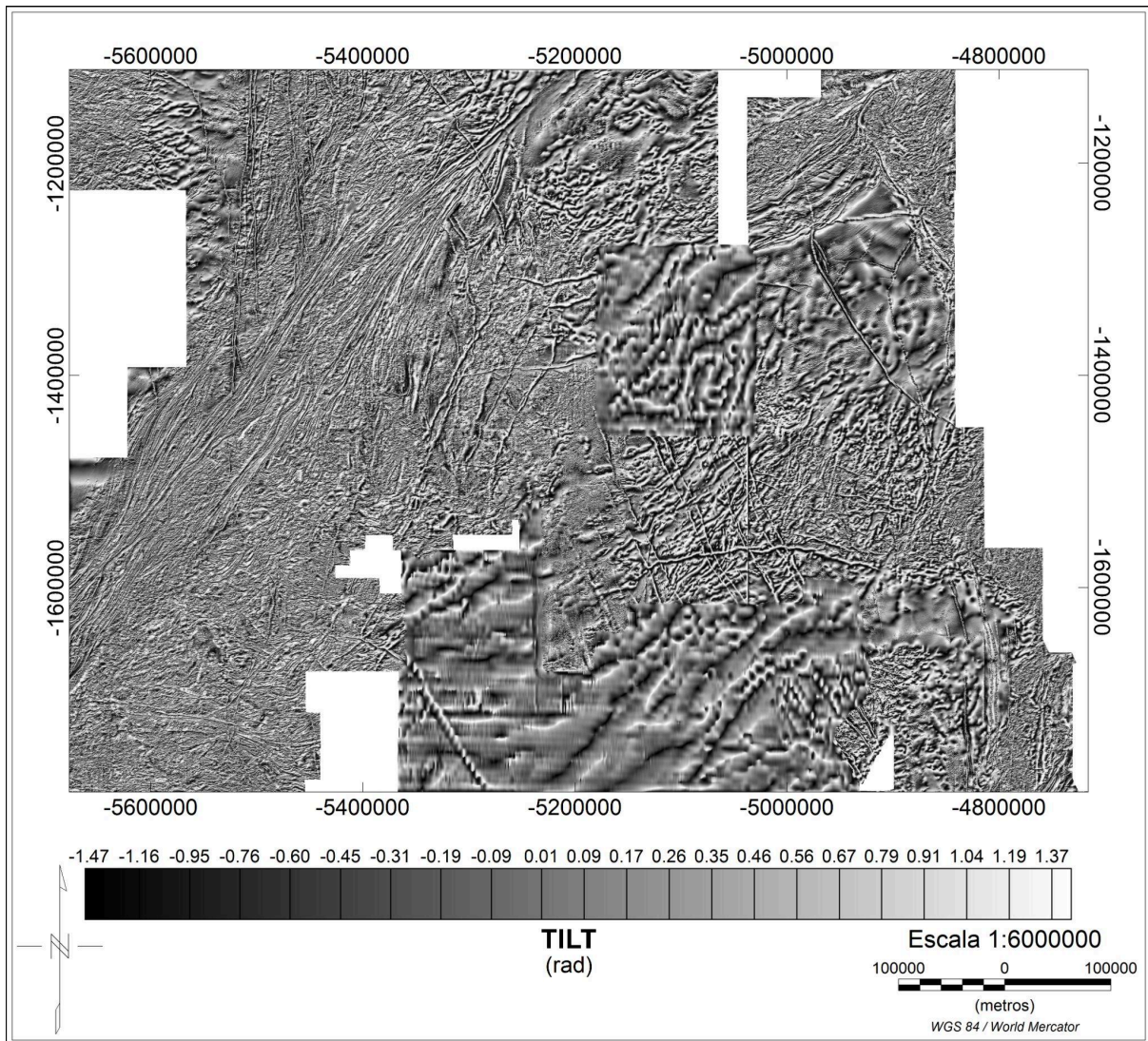


Figura 4.10: Produto Magnético do *Tilt Derivative*.

A Deconvolução de Euler utiliza o Campo Magnético Anômalo e suas Derivadas, Vertical (Z) e Horizontais (X,Y), para estimar a profundidade das fontes magnéticas de interesse. A equação diferencial de Euler é expressa por (Reid et al. 2014):

$$(x - x_o) \frac{\partial T}{\partial x} + (y - y_o) \frac{\partial T}{\partial y} + (z - z_o) \frac{\partial T}{\partial z} = N(B - T) \text{ Eq. 4.4}$$

Em que N é o Índice Estrutural; T é campo magnético total no ponto (x,y,z); B o valor regional do campo; x, y, z a posição onde o campo magnético total está sendo medido; e x_o , y_o , z_o a posição da fonte magnética.

O Índice Estrutural varia de 0 a 3, conforme a aplicação. O índice 0 é utilizado para observar contatos planares (contatos estruturais). O índice 1 para estruturas lineares como diques e soleiras. O índice 2 para corpos cilíndricos. O índice 3 é atribuído a corpos esféricos (Reid et al. 2014).

As soluções de Euler foram calculadas, no *software Oasis Montaj (Geosoft) Seequent*, a partir da escolha dos parâmetros: Índice Estrutural, Tolerância Máxima e Tamanho de Janela. O melhor resultado obtido utilizou os parâmetros: 1, 2% e 4, respectivamente.

O produto das Soluções de Euler (Figura 4.11) foi subdividido em cinco categorias de acordo com a profundidade da estrutura. As profundidades escolhidas foram: i) de 50 m a 500 m; ii) de 500 m a 1 km; iii) de 1 km a 2 km; iv) de 2 km a 3 km; e v) de 3 km a 5 km.

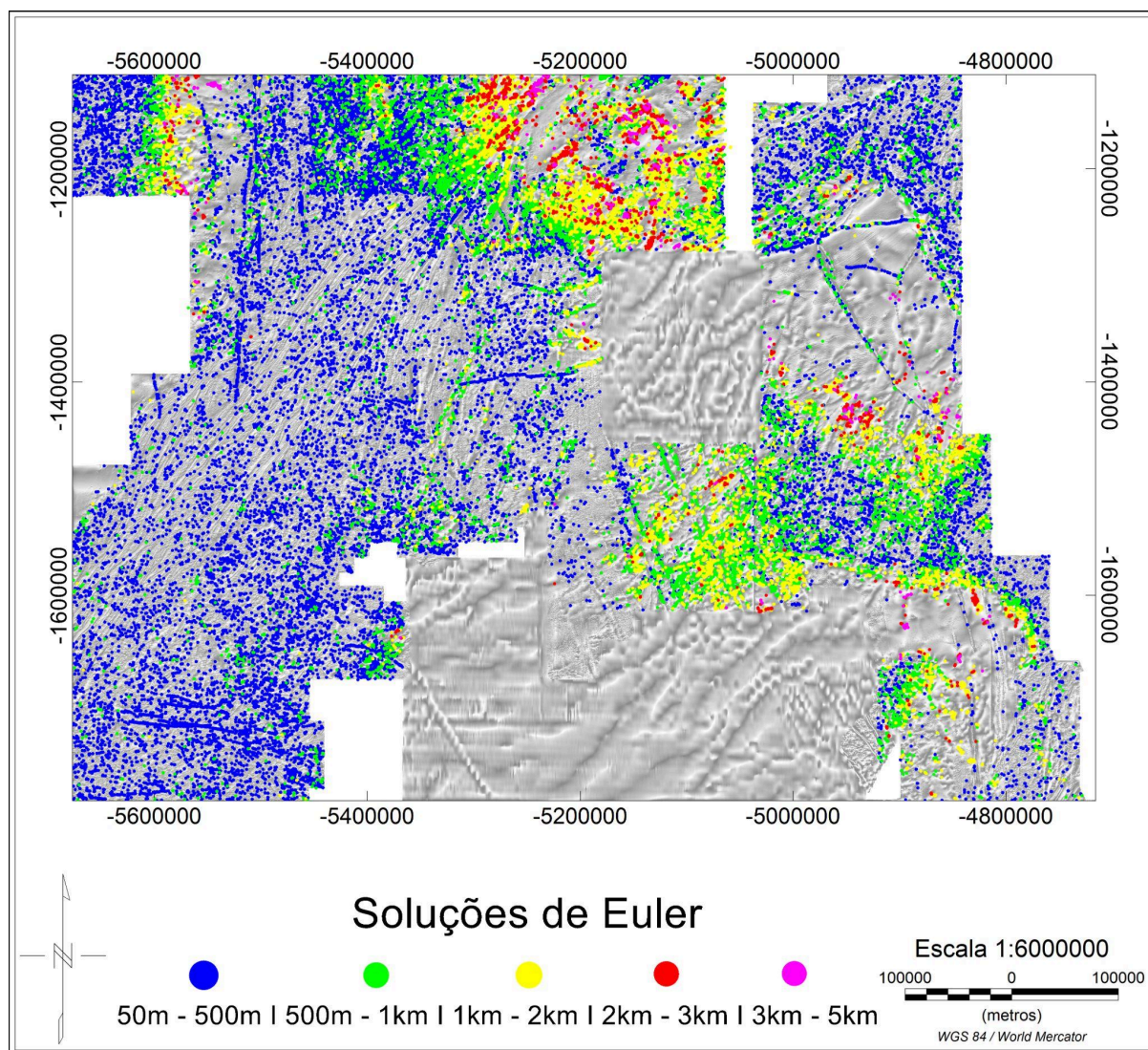


Figura 4.11: Produto Soluções de Euler sobre o Tilt.

O *Matched Filtering* é um produto que permite subdividir o Campo Magnético Anômalo em camadas de diferentes profundidades a partir da análise do espectro de potências. Spector e Grant (1970) mostram que o espectro de potências pode ser discretizado, em segmentos de reta, a fim de atribuir características das profundidades das fontes, conforme a inclinação da reta. Syberg (1972) introduz o termo *Matched Filtering* ao propor o uso do filtro tanto no domínio do espaço quanto da frequência.

O algoritmo do *Matched filtering* utilizado foi desenvolvido por Phillips (2001) e a extensão USGS foi adicionada no *Oasis montajTM*, Versão 2021.2.1, Geosoft® - Seequent. Os segmentos de reta foram traçados manualmente a fim de ajustar a curva. A Figura 4.12 mostra o ajuste das retas e as amplitudes obtidas. As profundidades obtidas foram: i) 455 m; ii) 1408 m; iii) 3950 m; e iv) 9140 m (Figura 4.13).

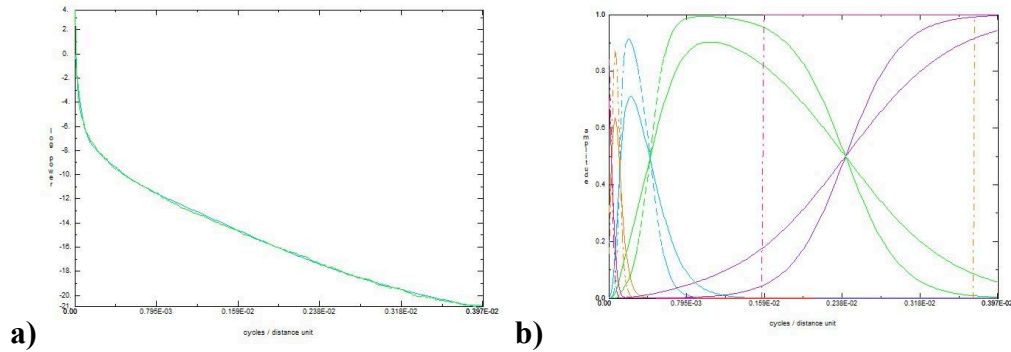


Figura 4.12: a) Ajuste da curva do espectro de potências (azul); b) Filtros passa-banda determinados a partir da inclinação do espectro radial de potência.

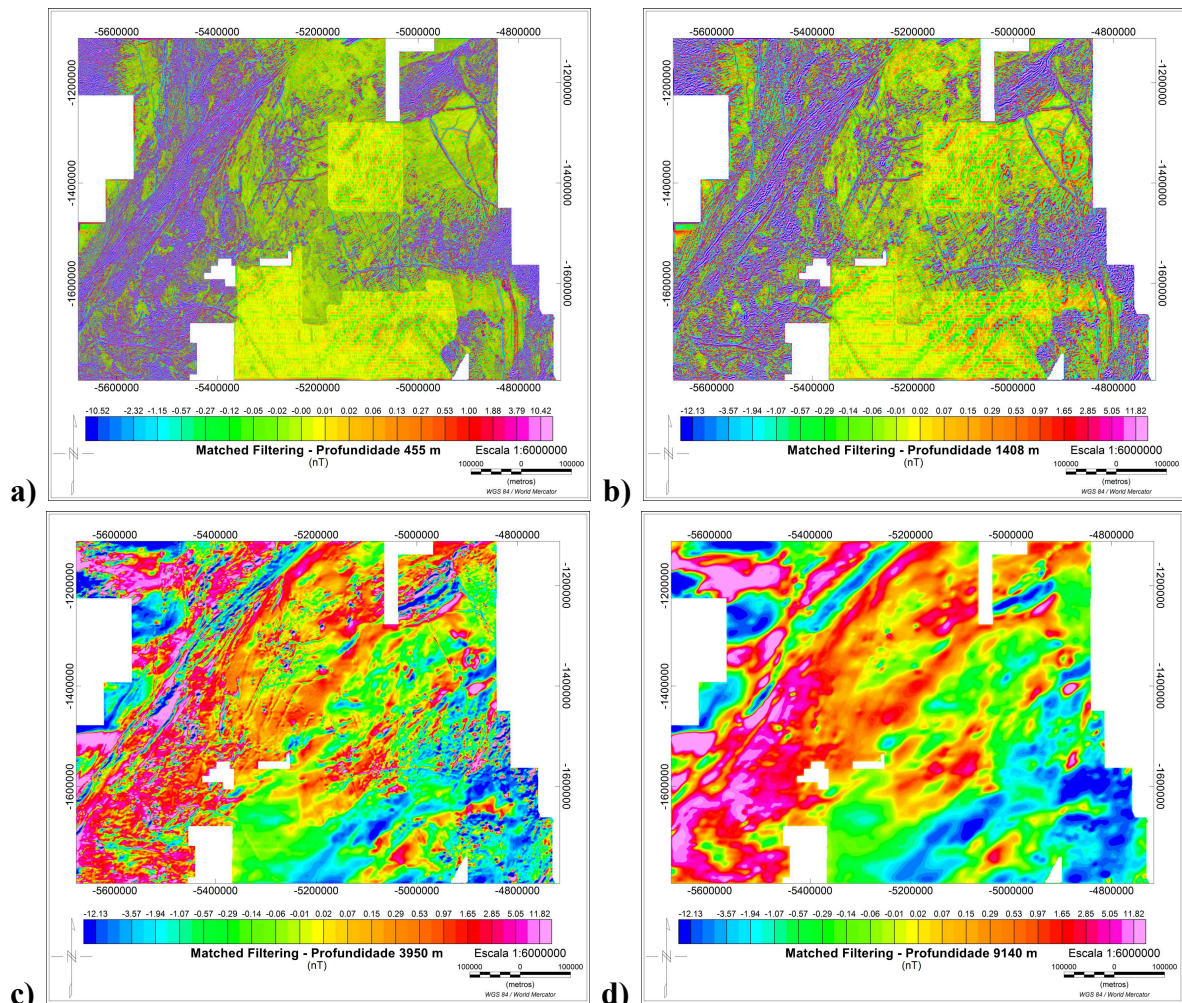


Figura 4.13: Produtos do *Matched Filtering* em 4 profundidades.

INVERSÃO

O produto Campo Magnético Anômalo foi utilizado como base para o cálculo da Inversão dos Vetores de Magnetização (*Magnetization Vector Inversion* - MVI). A inversão magnética foi realizada no *Oasis montajTM*, Versão 2021.2.1, Geosoft® Seequent, na ferramenta *VOXI*.

A partir do cálculo dos vetores de magnetização obtém-se os produtos Susceptibilidade Magnética Projetada, que está relacionada ao produto de inversão convencional, Susceptibilidade Magnética Perpendicular, que está relacionada com a magnetização remanente das feições, e Amplitude da Susceptibilidade Magnética, que é um produto oriundo dos citados anteriormente.

Os valores de células escolhidos para a malha de inversão 3D foram: X=1500, Y=1500 e Z=1000, com profundidade de 20 km.

Para caracterização das assinaturas geofísicas em subsuperfície por meio de recortes 2D, em perfis, foi escolhido o produto Amplitude da Susceptibilidade Magnética para as interpretações a serem discutidas. Esse Voxel foi multiplicado por 10^3 para melhor compreensão das assinaturas geofísicas, tendo em vista que os valores petrofísicos de susceptibilidade magnética medidos estão na escala 10^{-3} SI.

4.2.2 Dados Terrestres

Os dados gravimétricos de anomalias Bouguer e Ar-Livre foram interpolados por meio da Mínima Curvatura e o tamanho de célula adotado foi de 500 m X 500 m. Observou-se a congruência dos produtos iniciais com as características geofísicas da área de estudo (Ventura et al. 2011). A Anomalia Bouguer (Figura 4.14) serviu de base para a confecção dos demais produtos a partir da aplicação de filtros matemáticos.

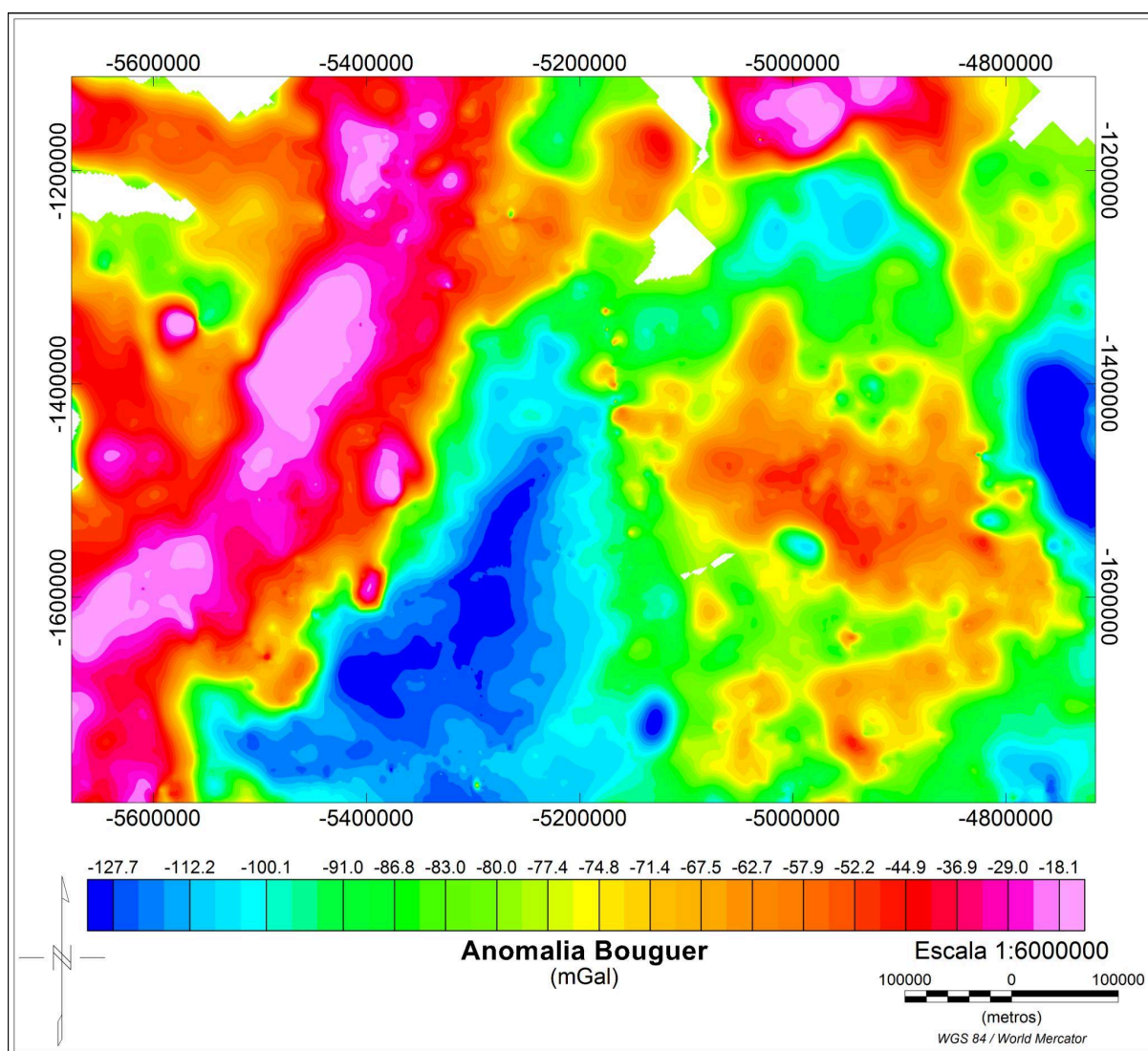


Figura 4.14: Produto Anomalia Bouguer.

A Anomalia Bouguer apresenta grande influência regional de corpos profundos que atrapalham a análise de variações de gravimétricas de interesse. Para remover a influência regional realizou-se um filtro matemático *Butterworth Bandpass* a fim de observar as anomalias residuais presentes na área. O produto oriundo desse filtro foi apresentado nessa pesquisa como Bouguer Residual (Figura 4.15).

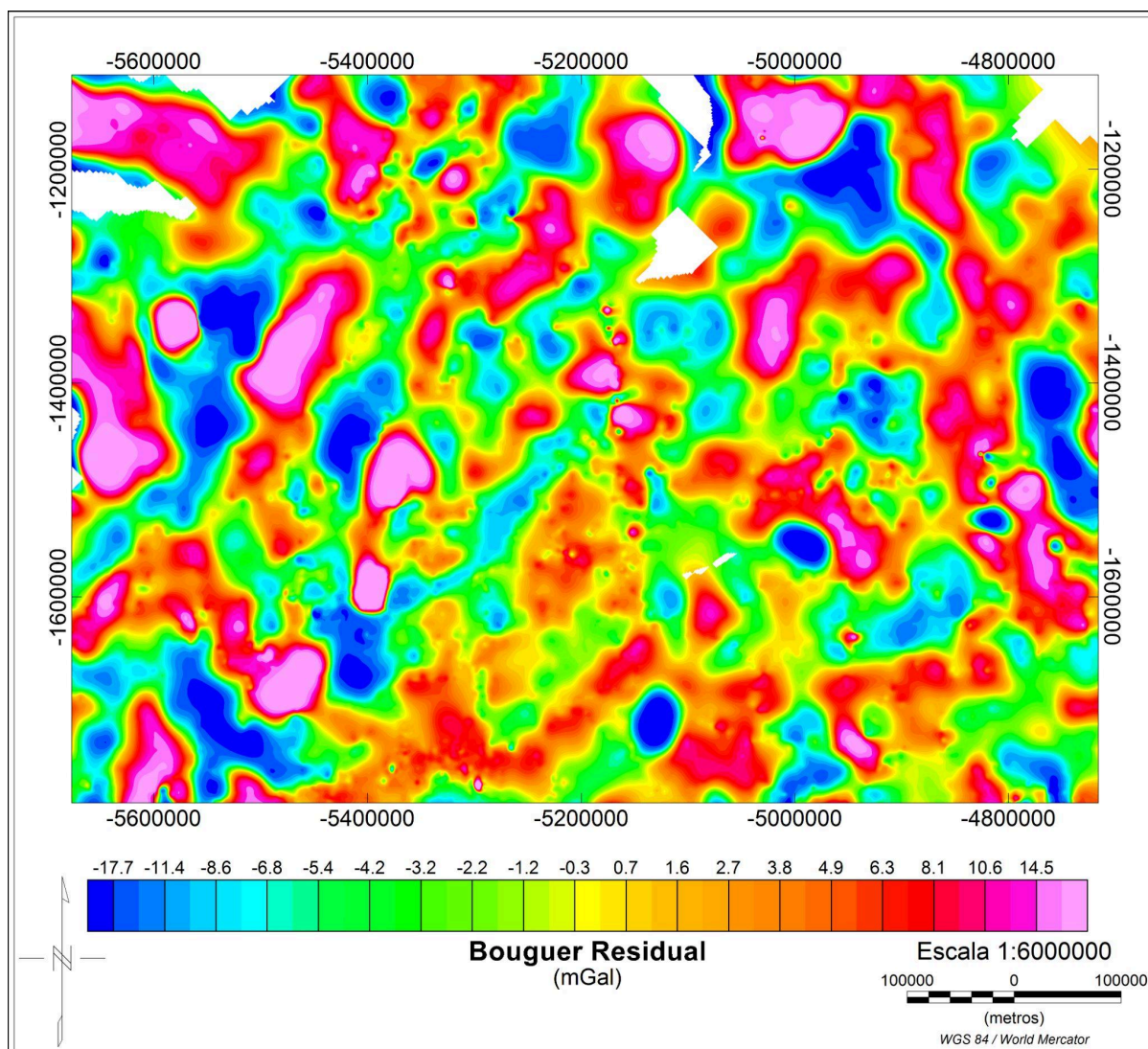


Figura 4.15: Produto Anomalia Bouguer Residual (ou Bouguer Residual).

INVERSÃO

Com o intuito de observar as variações da assinaturas de densidade de forma lateral e vertical, utilizou-se o *grid* de Anomalia Bouguer para confeccionar um modelo inverso 3D. Para a realização da inversão gravimétrica foi utilizada a ferramenta *VOXI Earth Modeling* no *software Geosoft Oasis Montaj, Seequent*. Os dados introduzidos na ferramenta de inversão foram a Anomalia Bouguer, Modelo Digital de Elevação (SRTM) e *shapefile* com o tamanho da área de inversão.

Os valores de células escolhidos para a malha de inversão 3D foram: X=1500, Y=1500 e Z=1000, com profundidade de 20 km. O algoritmo usado para a inversão assume um conjunto de prismas retangulares contíguos em que cada prisma possui um valor de contraste de propriedade física (densidade) distribuído automaticamente, com base nos

valores da Anomalia Bouguer (Richarte et al. 2017). O modelo de inversão segue a solução da equação de modelagem direta:

$$G \cdot m = d \quad \text{Eq. 4.1}$$

Em que m é o vetor do modelo que contém os valores das propriedades físicas das células; d são os dados da matriz vetorial, e (G) é a matriz de sensibilidade que quantifica a contribuição das células relacionadas ao valor dos dados observados (Richarte et al. 2017).

O vetor (m) representa a densidade ($m=\rho$) e o vetor (d) os dados gravimétricos. O resultado do *voxel* é baseado em um sistema cartesiano, em que X e Y são os eixos horizontais e Z o eixo vertical. A solução inversa foi obtida ao utilizar a regularização de Tikhonov, ao minimizar uma função objetivo total com constraint fornecido pelo usuário (Richarte et al. 2017).

$$\min \phi = \phi d + \mu \phi m; \text{ para } m_{\min} \leq m \leq m_{\max} \quad \text{Eq 4.2}$$

Em que (m) é o parâmetro de regularização (ϕd) são os dados desajustados e (ϕm) é a função desajuste do modelo e os parâmetros ($m_{\min}$) e ($m_{\max}$) são os limites inferior e superior da distribuição da propriedade física (Richarte et al. 2017).

Foram realizadas operações matemáticas no voxel resultante da inversão: i) *Absolute Value*, consiste em adicionar densidades absolutas nas células no lugar de densidades relativas; ii) Soma do valor de 2,675 g/cm³ aos Valores Absolutos (Richarte et al. 2017).

4.2.3 Dados Petrofísicos

4.2.3.1 Susceptibilidade Magnética

As medições realizadas em cada amostra foram formatadas em arquivos de formato .DAT e .GDB, para a realização de análises estatísticas, como aplicações da média aritmética para a discriminação de valor condizente com a assinatura geofísica da rocha.

4.2.3.2 Densidade

Com as cinco medidas de densidade de cada amostra, foi calculada a densidade média (g/cm³) de cada plugue, o desvio padrão (g/cm³) e o coeficiente de variação (%). Os dados de densidade foram colocados em gráficos e comparados conforme a litologia e os demais resultados petrofísicos.

5. Discussão dos Resultados

Este capítulo apresenta a integração dos produtos, citados no capítulo anterior, a fim de caracterizar a assinatura geofísica da área. Primeiramente foram discutidos os produtos geofísicos regionais, separando-os em domínios e vinculando-os, posteriormente, à geologia mapeada. Diante das análises dos domínios geofísicos, foram selecionadas Áreas Alvo a fim de detalhar as assinaturas de gravimetria e magnetometria.

5.1 Regional

MAGNETOMETRIA

Os produtos Campo Magnético Anômalo (CMA), Gradiente Total (GT) e Inclinação do Sinal Analítico (ISA ou Tilt) foram base para a subdivisão de Domínios Magnetométricos. Em cada produto foram definidas regiões em função das assinaturas magnéticas características:

- Campo Magnético Anômalo (CMA) - a área de estudo foi dividida em sete domínios (Figura 5.1). Domínio I: apresenta relevo magnético homogêneo, com intensidade moderada a alta (12 a 43 nT), apresentando lineamentos e feições dipolares bem definidas; Domínio II: exibe faixas dipolares alongadas realçadas na direção preferencial NE-SW; Domínio III: apresenta textura magnética “rugosa” de valores elevados (60 a 95 nT), predominantemente, anomalias dipolares pontuais e lineamentos extensos; Domínio IV: mostra valores baixos a intermediários (-102 a 43 nT) e lineamentos bem delimitados nas direções E-W e NW-SE; Domínio V: ocorrem características semelhantes aos domínios I e II, com faixas alongadas na direção NE-SW e anomalias dipolares pontuais; Domínio VI: predominam anomalias dipolares grandes com direção preferencial E-W; e Domínio VII: ocorrem anomalias que não apresentam forte caráter dipolar, pois há predomínio de valores elevados (48 a 71 nT) e lineamentos magnetométricos “sinuosos”.
- Gradiente Total (GT) - a área de estudo foi dividida em doze domínios (Figura 5.2). Domínio I: apresenta valores baixos a altos (0,0010 a 0,10 nT/m) com lineamentos magnetométricos bem definidos, com direção NE-SW e E-W, e corpos circulares de valores elevados (0,10 nT/m); Domínio II: exibe elevados valores (0,05 a 0,10 nT/m) alongados, com direção preferencial NE-SW; Domínio III: mostra valores intermediários a altos (0,005 a 0,10 nT/m) que

aparentam delimitar corpos; Domínio IV: resposta semelhante a observada no Domínio I, contudo os lineamentos possuem direções preferenciais NW-SE e E-W; Domínio V: sua assinatura se assemelha à relatada no Domínio II; Domínio VI: predominam valores baixos a intermediários (0,0005 a 0,004 nT/m); Domínio VII: apresenta lineamentos magnetométricos de valores altos (0,03 a 0,05 nT/m) sem direção preferencial; Domínio VIII: exibe predomínio de valores elevados (0,05 a 0,1 nT/m); Domínio IX: Assemelha-se com a resposta do Domínio II, contudo os lineamentos não possuem direção preferencial; Domínio X: é caracterizado por valores intermediários (0,004 a 0,025 nT/m); Domínio XI: possui assinatura parecida com o Domínio VIII; Domínio XII: ocorrem valores altos (0,04 a 0,1 nT/m) e lineamentos com direção N-S.

- Inclinação do Sinal Analítico (ISA ou Tilt) - a área de estudo foi dividida em oito domínios (Figura 5.3 e 5.4). Domínio I: apresenta lineamentos em todas as direções, com predomínio de NE-SW e N-S; Domínio II: exibe elevada concentração de lineamentos na direção NE-SW; Domínio III: há predomínio da direção E-W nos lineamentos; Domínio IV: mostra lineamentos principalmente nas direções NW-SE e E-W; Domínio V: ocorrem lineamentos nas direções NE-SW e NW-SE, onde suas relações de corte são de “truncamento”, com predomínio NE-SW; Domínio VI: predomínio de extensos lineamentos na direção N-S; Domínio VII: ocorrem escassos lineamentos magnetométricos, em todas as direções; e Domínio VIII: predominam lineamentos extensos com direção N-S.

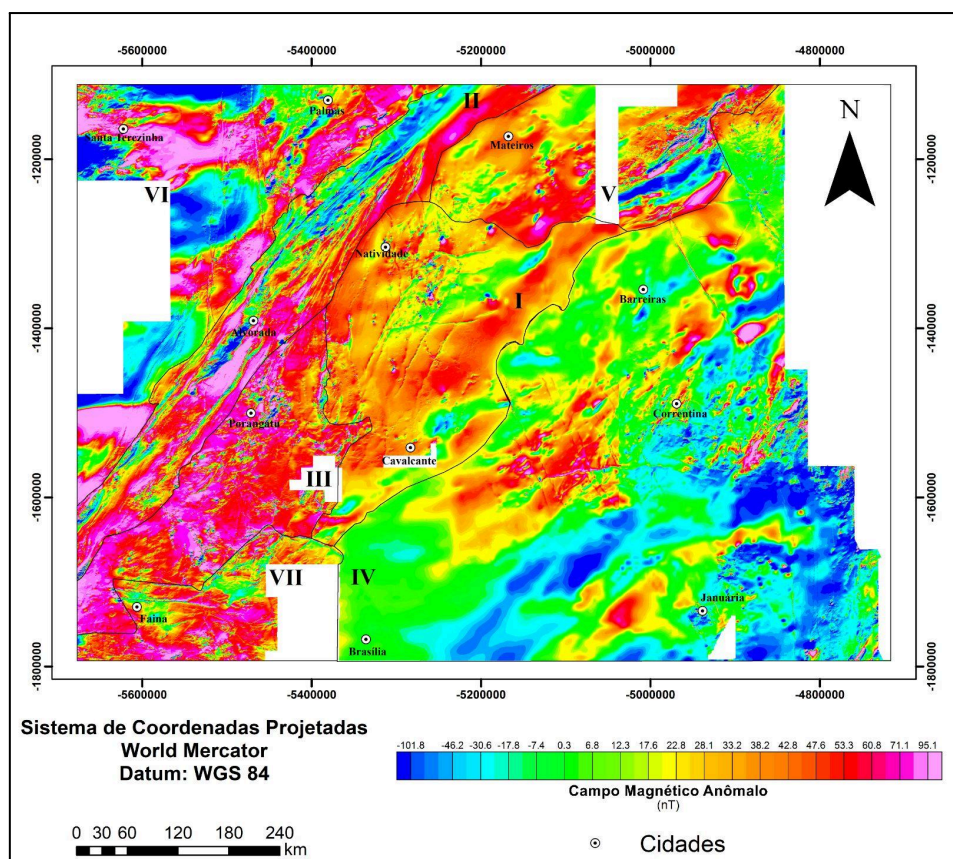


Figura 5.1: Produto Campo Magnético Anômalo com os domínios traçados.

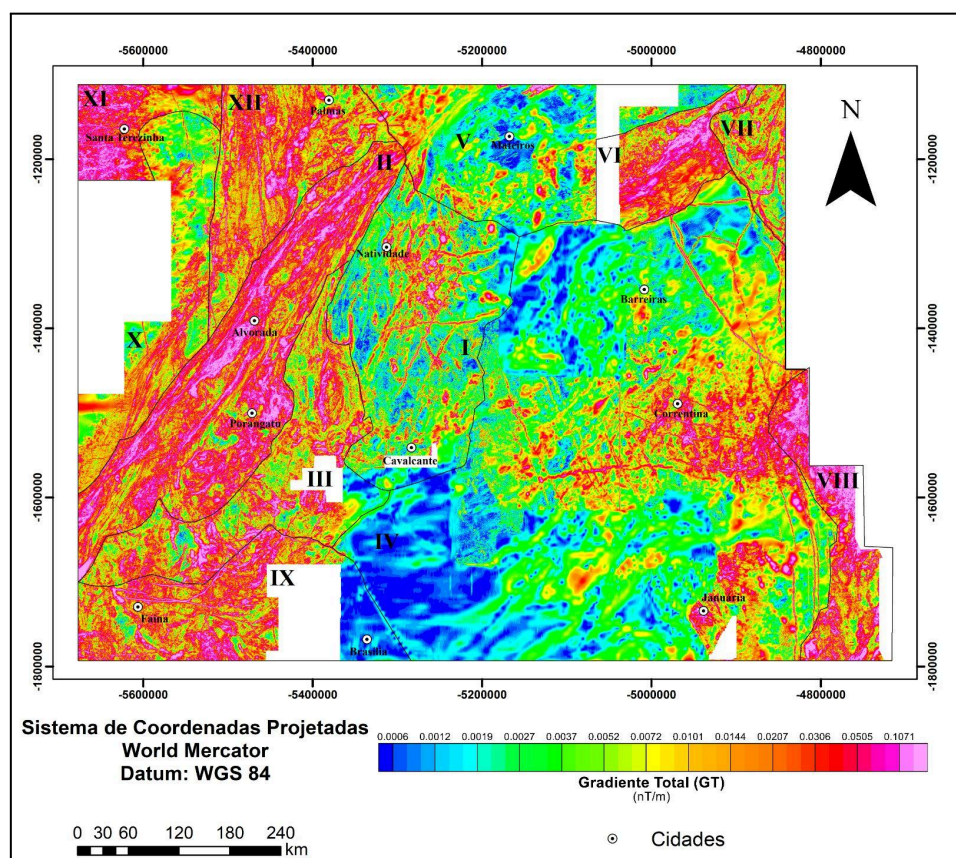


Figura 5.2: Produto Gradiente Total com os domínios traçados.

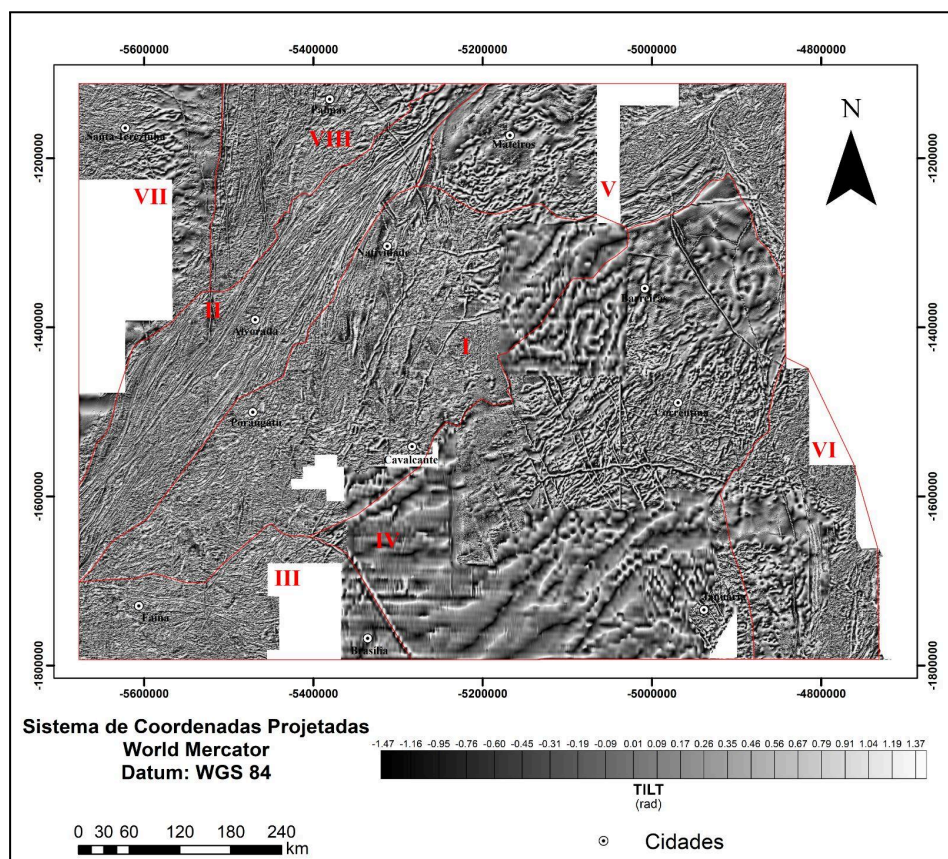


Figura 5.3: Produto Inclinação do Sinal Analítico (Tilt) com os domínios traçados.

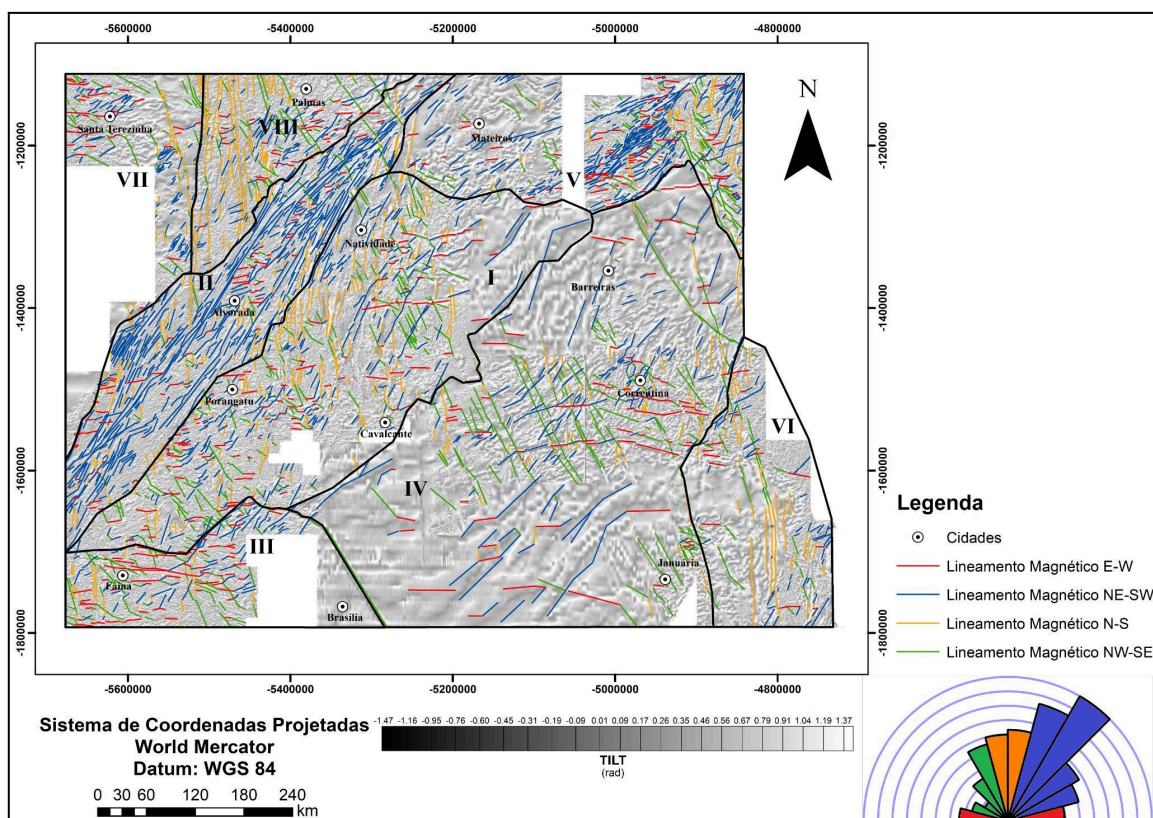


Figura 5.4: Produto Tilt com lineamentos magnetométricos e com os domínios traçados.

GRAVIMETRIA

O produto Anomalia Bouguer foi a base para originar os domínios gravimétricos. Foram definidas regiões em função das assinaturas gravimétricas características (Figura 5.5).

- Anomalia Bouguer - a área de estudo foi dividida em seis domínios. Domínio I: apresenta baixos valores de anomalia Bouguer (-127 a -80 mGal); Domínio II: exibe valores intermediários (-75 a -52 mGal), localmente altos valores de anomalia (-37 a -18 mGal); Domínio III: é caracterizado pelos maiores valores de anomalia Bouguer da área (-37 a -18 mGal); Domínio IV: mostra valores intermediários de anomalia (-75 a -58 mGal); Domínio V: indica anomalias com valores elevados a intermediários (-75 a -18 mGal); e Domínio VI: representa anomalias com valores intermediários a altos (-80 a -29 mGal).

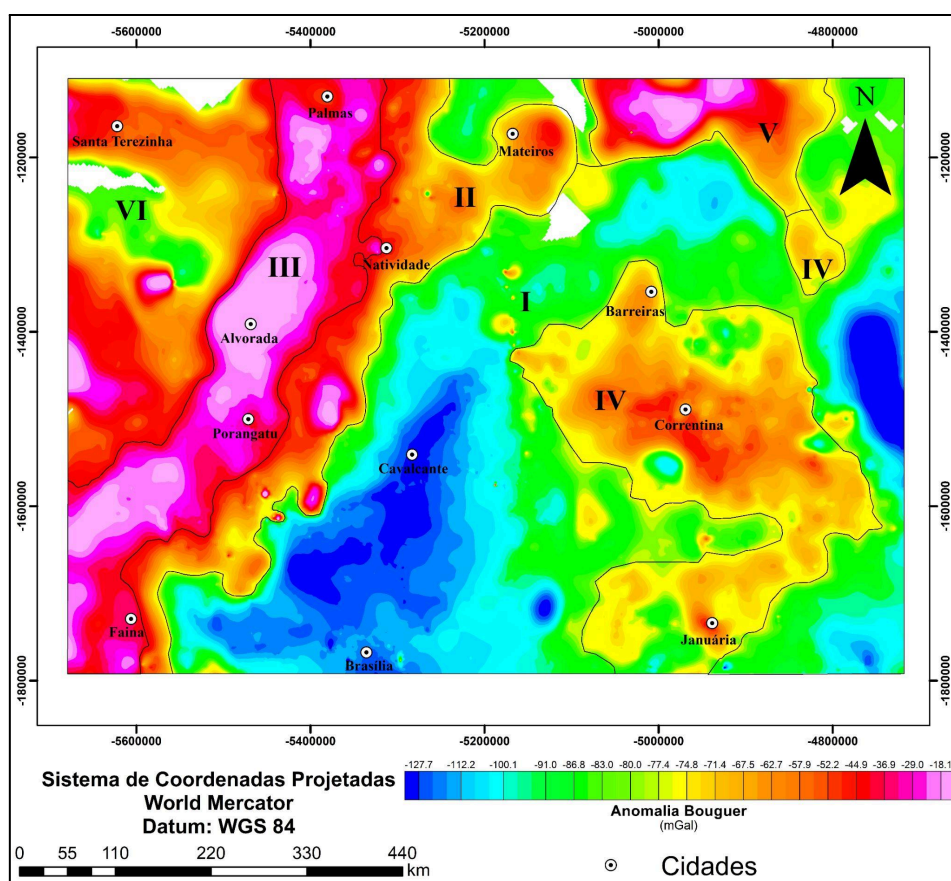


Figura 5.5: Produto Anomalia Bouguer com os Domínios traçados.

INTEGRAÇÃO DOS DADOS POTENCIAIS

Os principais produtos magnetométricos e gravimétricos foram utilizados para caracterizar a área de pesquisa segundo os parâmetros geofísicos. Os domínios obtidos foram interpretados em função dos ambientes geológicos que constituem a Província Tocantins, o Cráton do São Francisco e a Bacia do Parnaíba (Tabela 5.1).

Tabela 5.1: Caracterização magnética das unidades da Província Tocantins, Cráton do São Francisco (CSF) e da Bacia do Parnaíba, conforme Valeriano et al. (2008), Dardenne e Botelho (2014), Fuck et al. (2014) e Reis et al. (2011).

Província	Subdivisão	Unidade	Domínio CMA	Domínio GT	Domínio Tilt	Domínio Bouguer
Província Tocantins	Faixa Brasília	Arco Magmático de Goiás	II	II	II	III
		Maciço de Goiás	III	III	I	II
		Zona Externa/ Cinturão de Dobras - Empurrões	IV	IV	IV	I
		Bloco Cavalcante -Natividade	I	I	I	I - II
		Cobertura Metamórfica	VII	IX	III	I
	Faixa Araguaia	Supergrupo Baixo Araguaia	VI	X - XI	VII	VI
		Embasamento	VI	XII	VIII	VI - (III)
Cráton do São Francisco	Bacia do São Francisco		IV - (V)	IV - V	IV - (V)	IV - I
	Aulacógeno do Paramirim		V - (IV)	VI - VII - VIII	V - VI	I - V - (IV)
Bacia do Parnaíba	Porção Sul		II - (VI)	V	V - (II)	I - (II)

As informações apresentadas na Tabela 5.1 possibilitaram a caracterização das assinaturas magnetométricas e gravimétricas dos diferentes ambientes geológicos. O resultado da integração dos dados a partir dos domínios indicou correlação positiva da resposta geofísica com a geologia e tectônica.

A seguir foram selecionadas quatro áreas alvo que representam diferentes ambientes geológicos com assinaturas geofísicas características, em superfície e subsuperfície.

- Área Alvo 1 - Corresponde às respostas geofísicas do Arco Magmático de Goiás (Figura 5.6).

A área foca o Arco Magmático de Goiás, com realce para a anômala resposta gravimétrica (-37 a -18 mGal), denominada Alto Gravimétrico de Goiás (Soares 2005; Soares et al. 2006). O produto Bouguer Residual apresenta a anomalia realçada e individualizada por

valores elevados (10 a 15 mGal, Figura 4.15), contrastante com valores intermediários a baixos da região envoltória.

A assinatura magnética observada nos produtos CMA, GT e Tilt destaca o Arco Magmático, com valores elevados do Gradiente Total (0,1 nT/m, Figura 5.2) e característico feixe de lineamentos magnetométricos na direção NE-SW e zonas de suturas que delimitam esse com os terrenos adjacentes.

- Área Alvo 2 - Corresponde às respostas geofísicas do Maciço de Goiás, com enfoque nos complexos máfico-ultramáficos de Niquelândia e Canabrava e Maciço Serra da Mesa (Figura 5.7).

O limite do Maciço de Goiás, terreno constituinte da Faixa Brasília, com a Placa do São Francisco, em profundidade, é observado no produto Anomalia Bouguer a partir contraste das assinaturas gravimétricas de valores intermediários a altos (-75 a -45 -37 a -18 mGal) com valores intermediários a baixos (-112 a 75 -37 a -18 mGal). O produto Bouguer Residual indica, com destaque, os complexos máfico-ultramáfico de Canabrava e Niquelândia, com elevados valores gravimétricos (15 mGal, Figura 4.15).

A assinatura magnética é elevada nas regiões de borda e zonas máficas das intrusões, principalmente observada no produto Gradiente Total. O Granito Serra da Mesa comporta-se como “objeto cinemático” resultado da ação tectônica promovida durante o amálgama dos terrenos da Faixa Brasília, especificamente a Zona de Cisalhamento Rio Maranhão (Soares 2005; Sabóia et al. 2020)

- Área Alvo 3 - Corresponde às respostas geofísicas do Cráton do São Francisco, mais especificamente da Bacia do São Francisco, e Bloco Cavalcante-Natividade, mais especificamente porção sudeste do Domínio Cavalcante-Araías (Figura 5.8).

O produto Anomalia Bouguer exhibe o limite oeste da Placa do São Francisco, com assinatura gravimétrica baixa (-127 a -100 mGal). Soares et al. (2006) mostram que essa assinatura indica afinamento crustal característico do domínio cratônico com a Faixa Brasília, evidenciado pela Falha Paranã. O limite leste da Área Alvo 3 mostra a região cratônica com valores de Anomalia Bouguer intermediários (-80 a 71 -37 a -18 mGal), caracterizando porções mais espessas da placa.

A assinatura magnética apresenta lineamentos magnetométricos nas direções NW-SE e E-W, padrão característico de áreas cratônicas, regiões não afetadas pela orogênese Brasileira. Entretanto, a Faixa Brasília, na porção noroeste da Área Alvo 3, exhibe lineamentos com direção NE-SW menos frequentes.

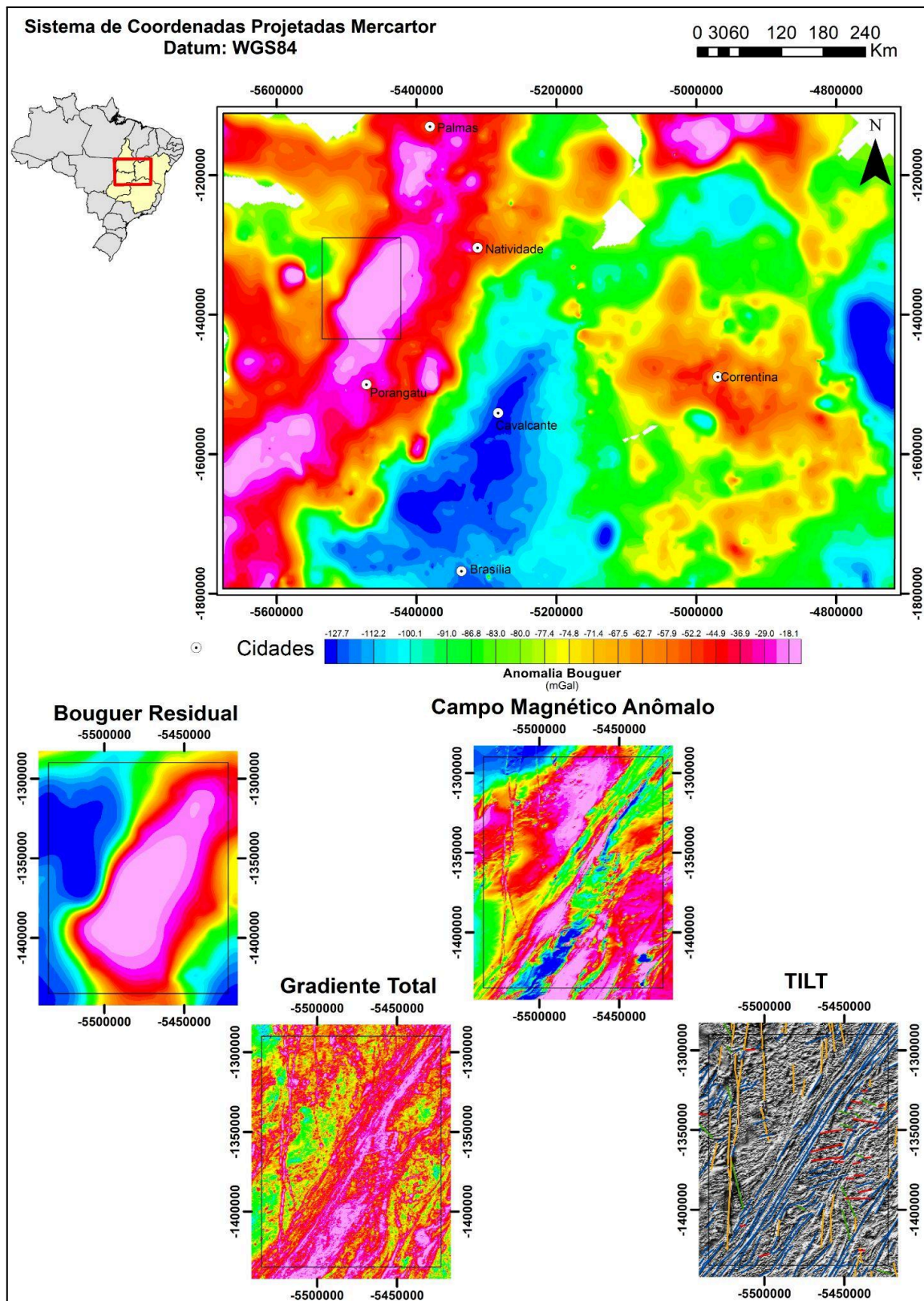


Figura 5.6: Área Alvo 1 - Arco Magmático de Goiás.

- Área Alvo 4 - Corresponde às respostas geofísicas do contato entre Bacia do Parnaíba, Cráton do São Francisco e Província Tocantins, Bloco Cavalcante-Natividade (Figura 5.9).

A Área Alvo 4 mostra valores gravimétricos, de anomalia Bouguer, intermediários a altos (-45 a -29 mGal), caracterizando a continuidade do Alto Gravimétrico de Goiás em direção à Bacia do Parnaíba. Interpreta-se que haja contribuição da Placa Amazônica, em profundidade, para os elevados valores. Na porção leste da área alvo, definida em mapa como região cratônica (Cráton do São Francisco), apresenta valores intermediários (-91 a -80 mGal) na Anomalia Bouguer. Em concordância, o produto Bouguer Residual também exhibe baixos valores para essa porção do Cráton do São Francisco.

A assinatura magnética caracteriza distintas respostas para os três arcabouços geotectônicos, a partir dos lineamentos e das anomalias magnéticas.

- Área Alvo 5 - Corresponde às respostas geofísicas do Bloco Crustal Cavalcante-Natividade e regiões limítrofes.

Essa Área Alvo é objeto de estudo desta Dissertação. Portanto, a definição das assinaturas geofísicas e sua integração com as informações geológicas do Bloco Crustal Cavalcante-Natividade são abordadas, com detalhamento, no próximo subitem deste capítulo - 5.2 “Bloco Crustal Cavalcante-Natividade”.

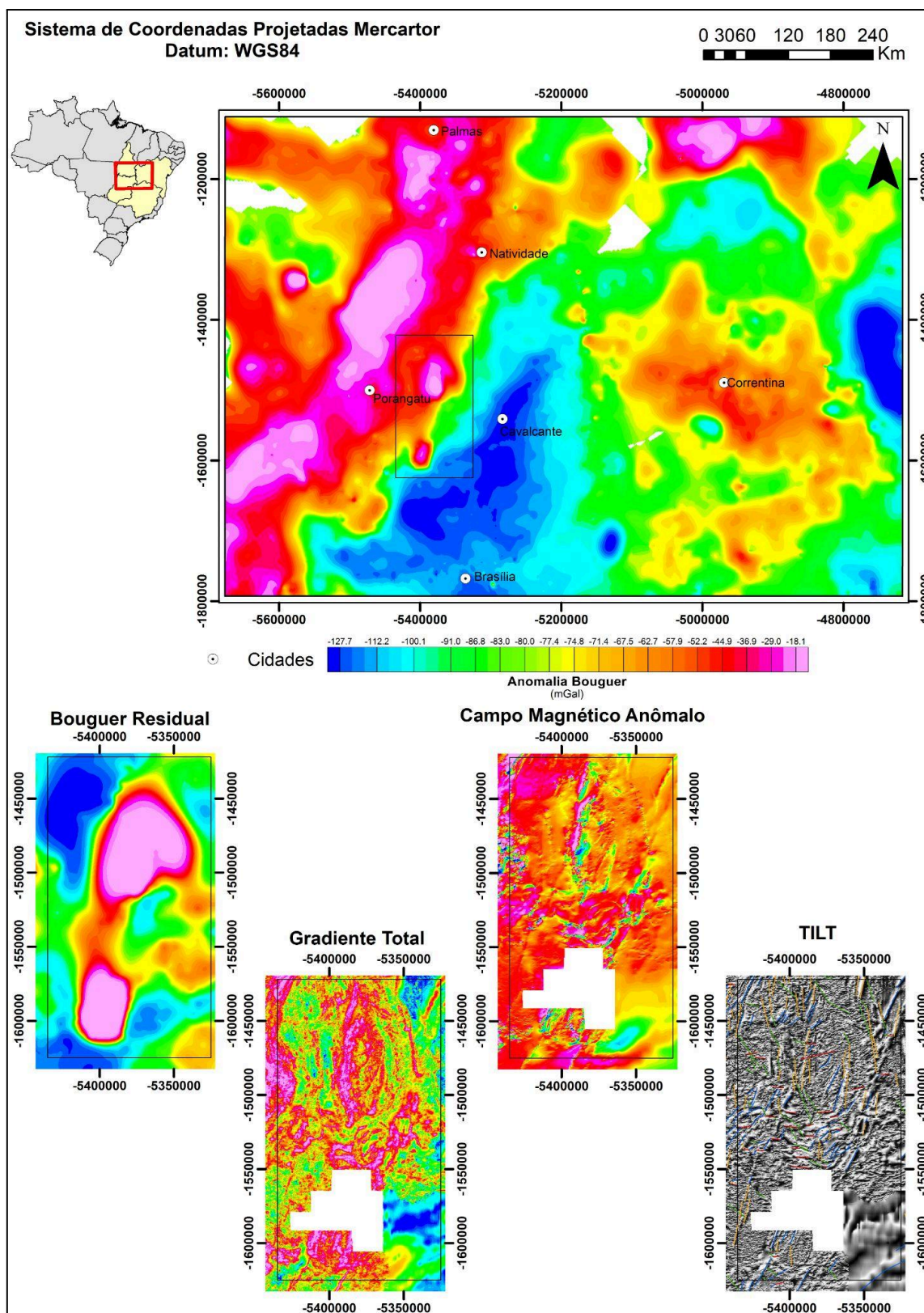


Figura 5.7: Área Alvo 2 - Maciço de Goiás.

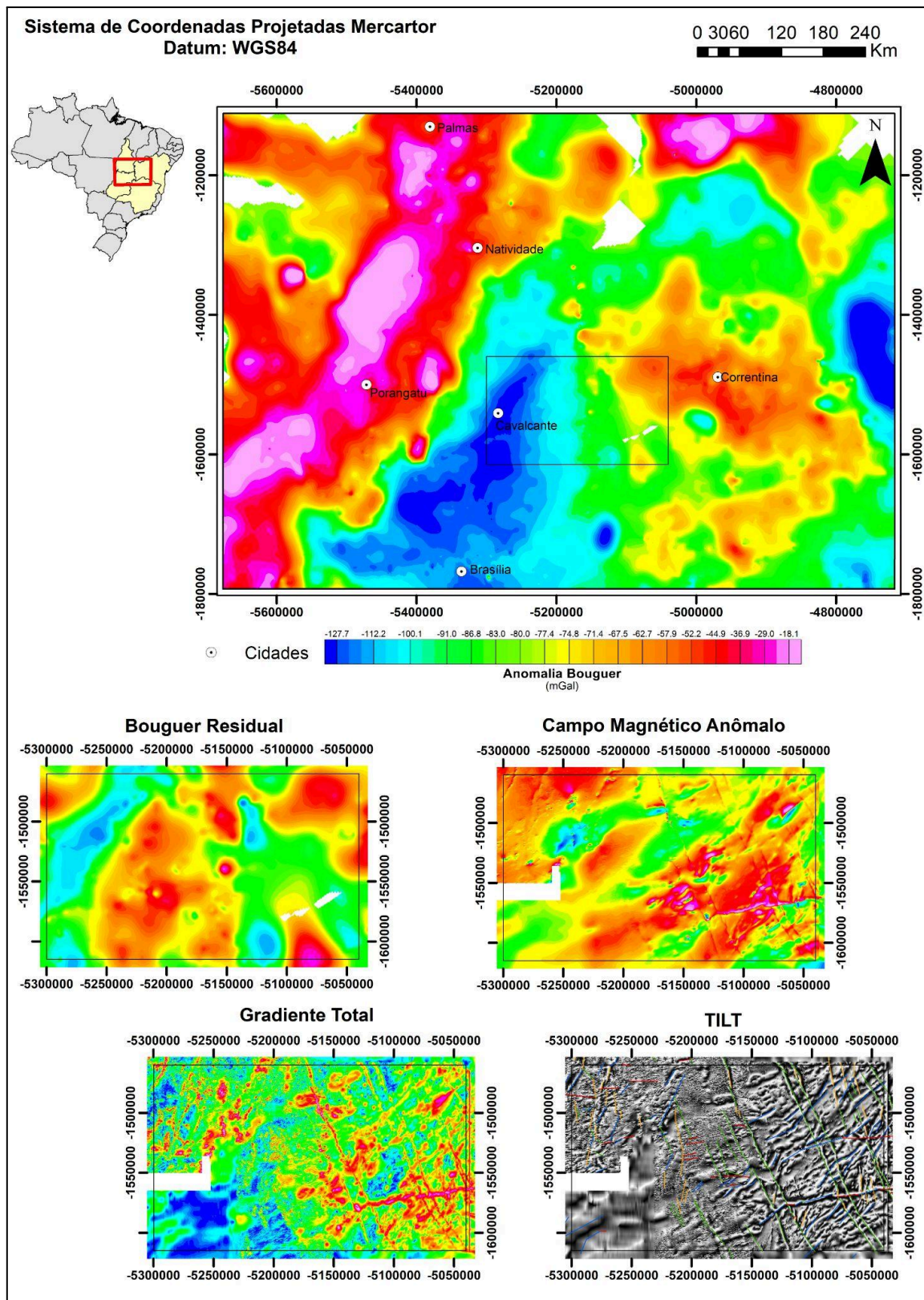


Figura 5.8: Área Alvo 3 - Cráton do São Francisco.

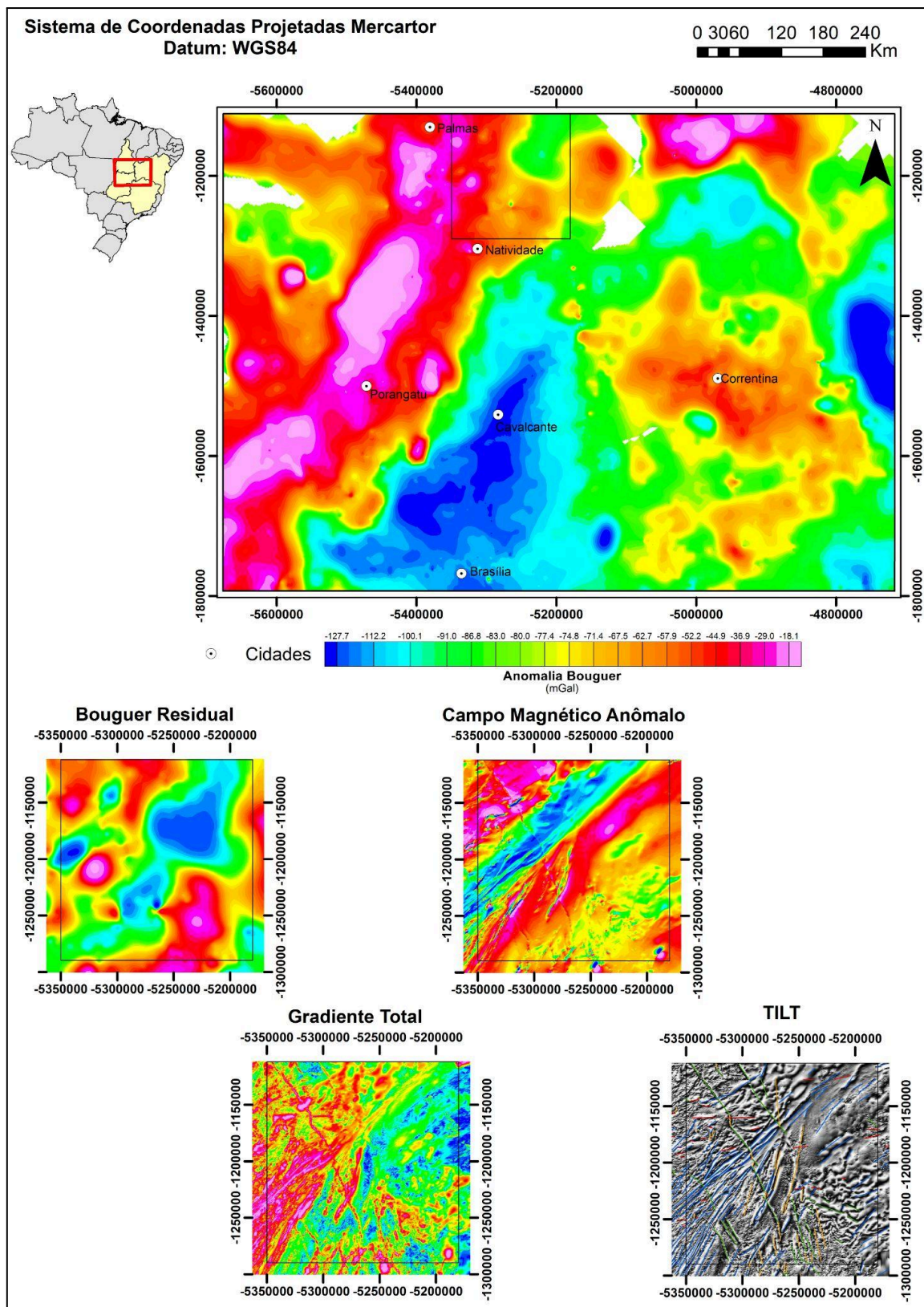


Figura 5.9: Área Alvo 4 - Bacia do Parnaíba.

5.2 Bloco Crustal Cavalcante-Natividade

O bloco e suas adjacências são alvo importante para estudos geotectônicos, entretanto, há carência de suas informações geofísicas. Com base no conhecimento das assinaturas magnéticas e gravimétricas, em subsuperfície e superfície, torna-se possível delimitar feições geofísicas que podem estar associadas às estruturas geológicas constituintes da crosta, como, por exemplo, realçar zonas de suturas, sistemas de falhas, limites de blocos crustais, relações de contato entre terrenos, entre outros.

Nesta pesquisa, propõe-se caracterizar as assinaturas geofísicas da porção centro-leste da Província Tocantins e regiões limítrofes, integrando-as com informações geológicas para contribuir com o conhecimento do arcabouço geotectônico da crosta/litosfera.

INTEGRAÇÃO DOS DADOS

O Bloco Cavalcante-Natividade é apresentado a partir de cinco produtos principais: Anomalia Bouguer, Anomalia Bouguer Residual, Gradiente Total, Composição Tilt e Soluções de Euler e Composição Tilt e Lineamentos Magnetométricos (Figuras 5.10; 5.11; 5.12 e 5.13). A caracterização gravimétrica e magnética, integradas às informações geológicas disponíveis na literatura e aos dados petrofísicos de amostras de campo, possibilitam uma interpretação embasada nas propriedades físicas que constituem o bloco.

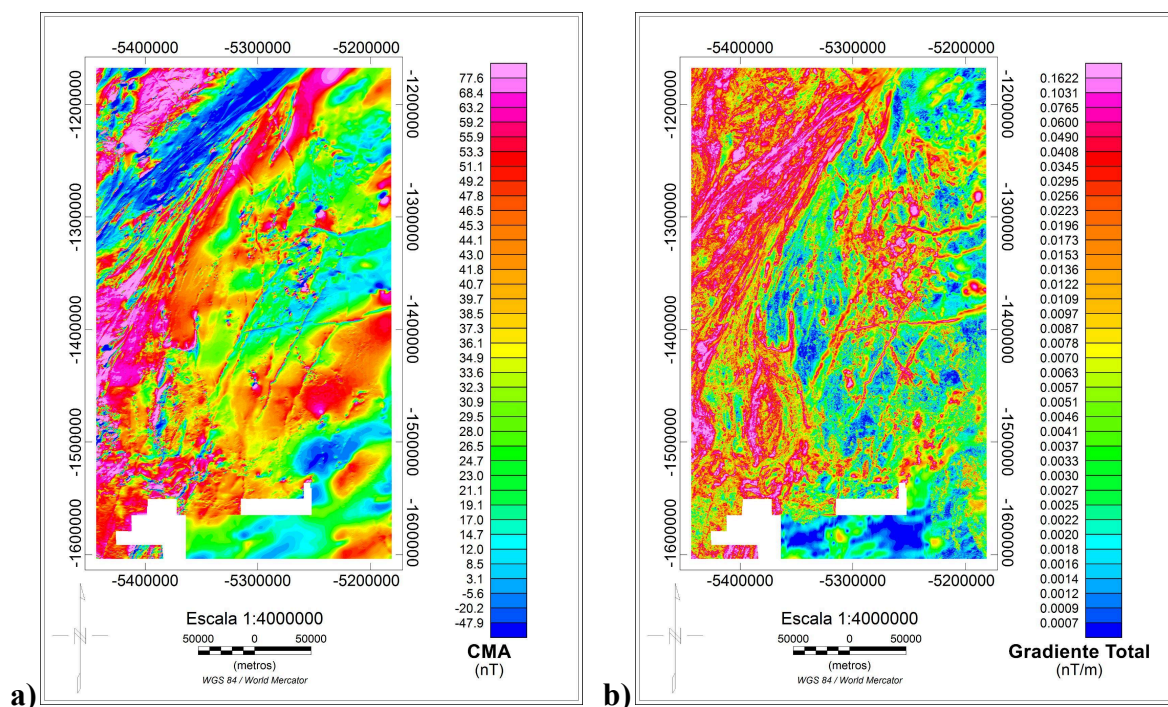


Figura 5.10: a) Produto Campo Magnético Anômalo; b) Produto Gradiente Total.

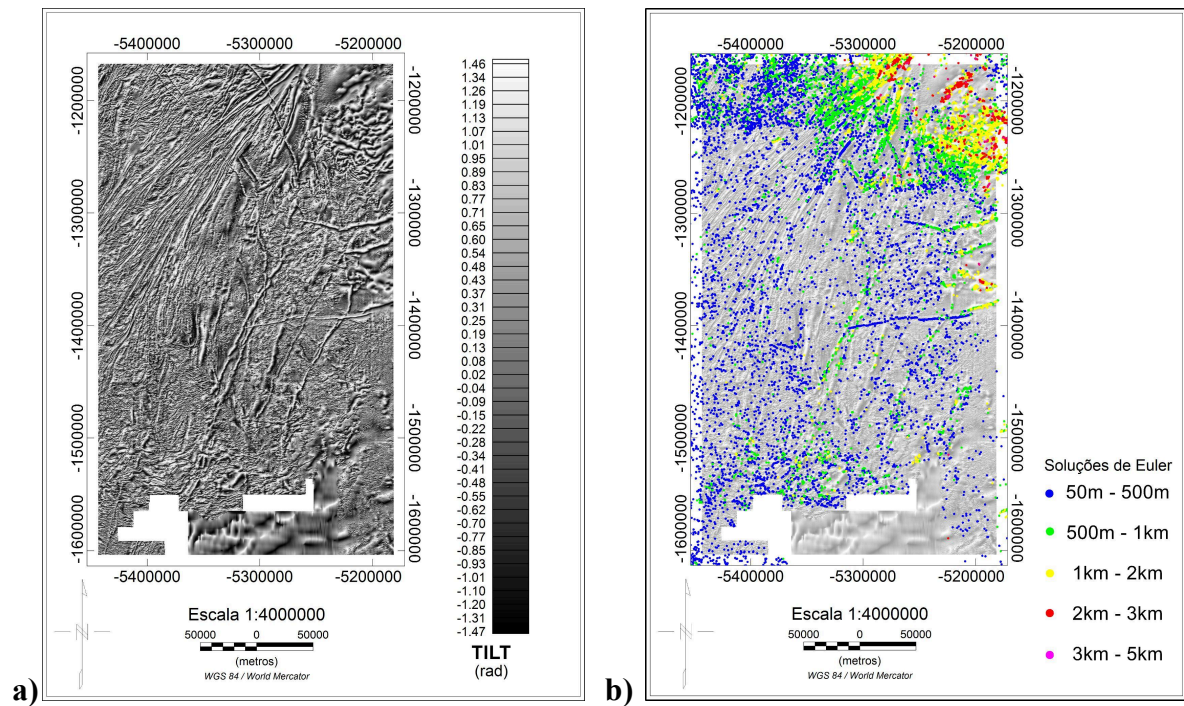


Figura 5.11: a) Produto Inclinação do Sinal Analítico; b) Produto Soluções de Euler sobre o Tilt.

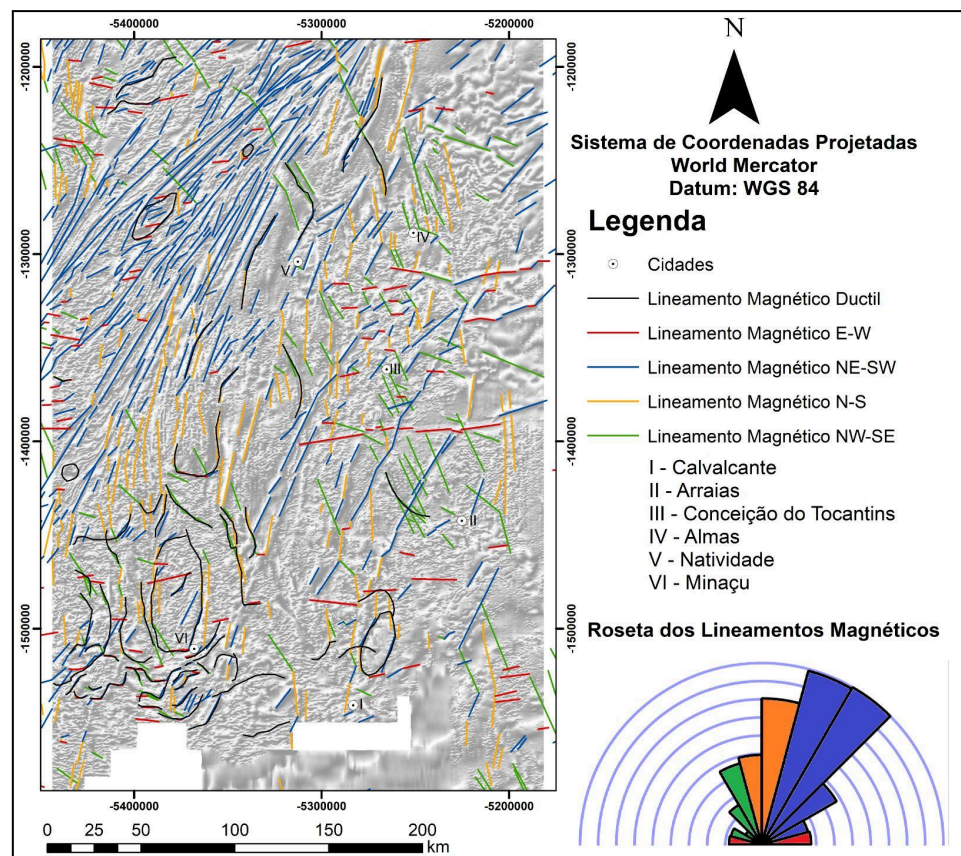


Figura 5.12: a) Produto Inclinação do Sinal Analítico com os lineamentos magnetométricos.

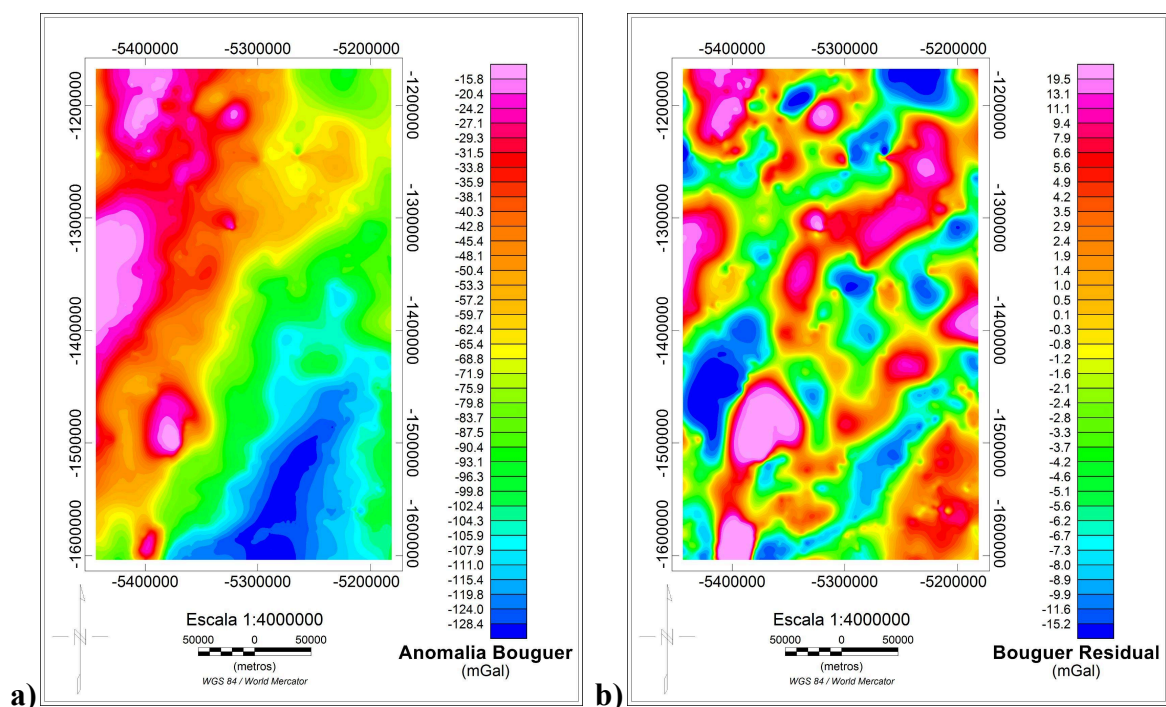


Figura 5.13: a) Produto Anomalia Bouguer; b) Produto Anomalia Bouguer Residual.

Conforme apresentado no subitem 5.1 e sumarizado na Tabela 5.1, o Bloco Cavalcante-Natividade constitui-se como área alvo selecionada para a caracterização de assinaturas geofísicas dos ambientes geológicos presentes na porção leste da Província Tocantins e regiões limítrofes.

NORTE

O produto Anomalia Bouguer mostra respostas distintas para as porções norte e centro-sul do Bloco (Tabela 5.2, Figura 5.14), respectivamente valores elevados de anomalia (-68,8 a -35,9 mGal) e valores médios a baixos (-124,0 a -68,8 mGal). Adicionalmente, o produto Anomalia Bouguer Residual apresenta elevados valores (3,5 a 19,5 mGal), com feição em forma de sigmoide, caracterizado como Bloco Almas, conforme Martins-Ferreira et al. (2020). Essa região é formada por rochas do Complexo Ribeirão das Areias (TTG) (2,47 a 2,45 Ga) (Sabóia et al. 2020b), Grupo Riachão do Ouro (idades neoarqueanas e paleoproterozoicas) e rochas metassedimentares mesoproterozóicas do Grupo Natividade (Martins-Ferreira et al. 2020). A área possui quatro amostras obtidas em trabalho de campo (ACH-19, ACH-21, ACH-23, ACH-25) que exibem dados petrofísicos de densidade e susceptibilidade magnética que corroboram as assinaturas obtidas nos produtos oriundos da gravimetria terrestre e da magnetometria aérea (Tabela 5.3, Figura 5.14). A amostra ACH-19 é de formação ferrífera bandada – BIF constituinte da Formação Morro do Carneiro

(Paleoproterozoico), topo do Grupo Riachão do Ouro, com densidade de 3,458 g/cm³ e susceptibilidade magnética de 128,70 10⁻³ SI. A amostra ACH-21 é um tonalito, provável representante da Suíte Peraluminosa (2,2 a 2,18 Ga), com densidade de 2,7153 g/cm³ e susceptibilidade de 0,690 10⁻³SI. A amostra ACH-23 exemplifica as rochas granodioríticas do Complexo Ribeirão das Areias (TTG) (2,47 a 2,45 Ga), com densidade de 2,764 g/cm³ e susceptibilidade magnética de 0,818 10⁻³SI. A amostra ACH-25 é um quartzito do Grupo Natividade (idade mesoproterozoica), com densidade de 2,7238 g/cm³ e susceptibilidade de 0,696 10⁻³ SI (Sabóia et al. 2020b).

Observa-se que os valores médios de densidade das amostras é 2,9153 g/cm³, e de susceptibilidade é 32,726 10⁻³ SI. Os valores médios são elevados, principalmente devido à resposta da amostra ACH-19 (BIF). Entretanto, a Porção Norte, caracterizada por terrenos TTG, sequências metavulcanossedimentares, suítes máfico-ultramáficas, exibe propriedades físicas que devem resultar em valores de densidade e susceptibilidade elevados, porém, menores que os valores médios apresentados (Schön 2004).

Os lineamentos magnetométricos apresentam direções principais NNE-SSW e NW-SE (Figura 5.14), com E-W subordinado. A principal e mais frequente direção é a NNE-SSW que se apresenta como falhas e associadas com as anomalias magnéticas (0,0345 a 0,1622 nT/m), com formas circulares e dimensões reduzidas e formas irregulares e expressão maior em área. Essas anomalias são interpretadas como diques e intrusões máficas e ultramáficas, rochas com elevada susceptibilidade magnética compreendida entre 10⁻⁴ SI e 10⁻¹ SI (Schön 2004). Por exemplo, Sabóia et al. (2020b) apresentam as rochas da Suíte Gameleira (2,48 e 2,30 Ga) decorrentes de evento magmático extensional ocorrido após o período Riachiano. Essas rochas, com composição máfico-ultramáfica, apresentam realçada assinatura magnética e estão relacionadas aos lineamentos magnetométricos (NNE-SSW).

Tabela 5.2: Caracterização das assinaturas geofísicas do Bloco Cavalcante-Natividade, focando em sua subdivisão em porções norte e sul.

Bloco	Subdivisão	A. Bouguer (mGal)	B. Residual (mGal)	GT (nT/m)	Tilt (rad) Lineamentos	Tilt (rad) Soluções de Euler (m)
Cavalcante-Natividade	Norte	-68 a -36	-15 a 19	> 0,02	NNE-SSW NW-SE E-W (*)	50 - 500 501 - 3000 (**)
	Centro-Sul	-76 a -128	-15 a 5	< 0,02	NE-SW NW-SE	50 - 500 501 - 2000 (**)

Nota: (*) subordinado; (**) Localizado

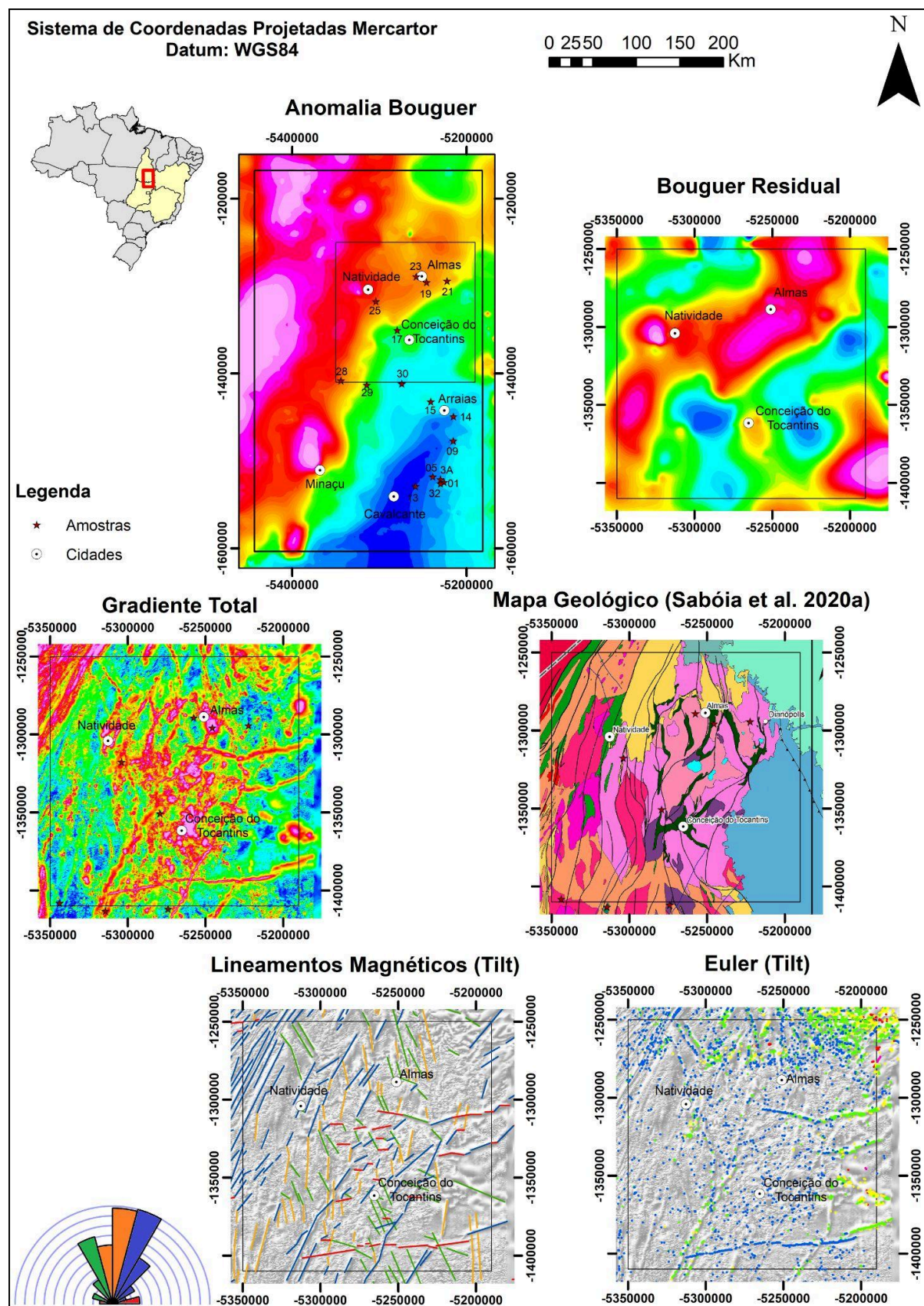


Figura 5.14: a) Domínio Norte do Bloco Cavalcante-Natividade;

CENTRO-SUL

A porção centro-sul do Bloco Cavalcante-Natividade mostra anomalias Bouguer com assinaturas valores médios a baixos (-76 a -128 mGal) (Tabela 5.2, Figura 5.15), com realçado gradiente decrescente no sentido sudeste (Soares et al. 2006). O produto Anomalia Bouguer Residual apresenta baixos valores (-15 a -7 mGal), em forma de sigmóide. Essa porção do bloco é dominada por rochas das suítes Aurumina (2,17 a 2,12 Ga) e Pedra Branca (1,77 a 1,57 Ga), Grupo Araí (1,77 a 1,57 Ga), Formação Ticunzal (idade riaciana) e Unidade Quartzo Diorito (2,14 Ga), onde os dois últimos afloram restritamente (Cuadros et al. 2017; Martins-Ferreira et al. 2018; Saboia et al. 2020a).

Predominam rochas das suítes graníticas, com destaque para a Suíte Aurumina que perfaz cerca de 50% da área. A suíte é subdividida em seis tipos de granitos (Au1, Au2, Au3, Au4, Au5 e Au6), tendo sua origem atribuída a magmas peraluminosos, conforme segue do granito mais velho para o mais jovem: muscovita monzogranito, muscovita-biotita monzogranito, biotita tonalito/granodiorito, biotita sienogranito, turmalina leucogranito e turmalina pegmatito. O facies Au5 é restrito e constitui-se em granitos migmatíticos associados à Formação Ticunzal (Alvarenga et al. 2007; Cuadros et al. 2017a).

Nessa porção do Bloco, dez amostras foram adquiridas em trabalho de campo, abrangendo as suítes Aurumina (ACH-05, ACH-09a, ACH-09b, ACH-15, ACH-17, ACH-28) e Pedra Branca (ACH-01, ACH-03a, ACH-13) e o Quartzo Diorito Nova Roma (ACH-32). A Tabela 5.3 apresenta as amostras com seus respectivos parâmetros de densidade e susceptibilidade magnética associados às suas unidades de pertencimento.

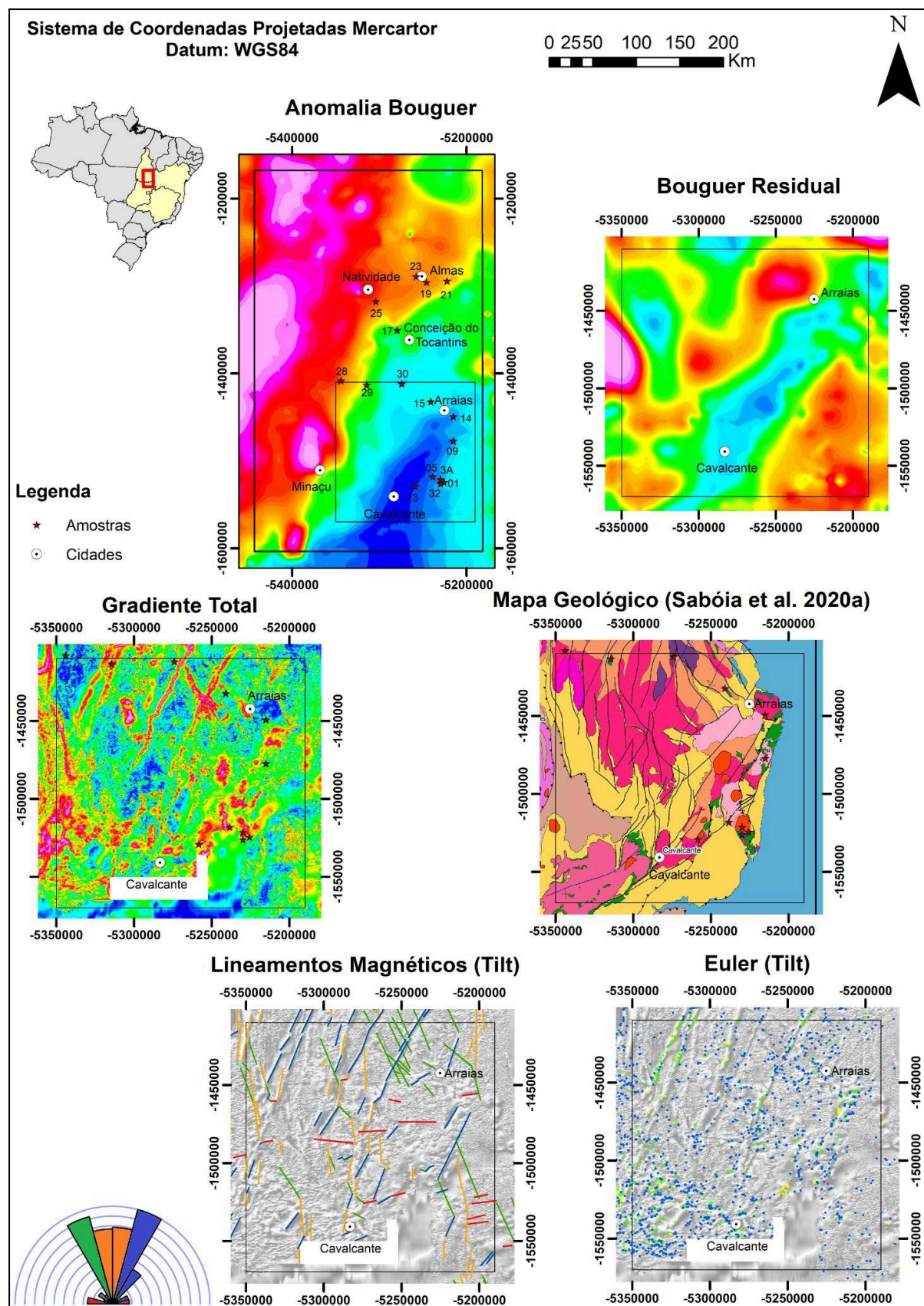


Figura 5.15: Domínio Centro-Sul do Bloco Cavalcante-Natividade.

Tabela 5.3: Amostras de rocha coletadas em trabalho de campo no Bloco Cavalcante-Natividade.

Bloco	Subdivisão	Amostra ACH-	Densidade (g/cm ³)	Susceptibilidade Magnética (10 ⁻³ SI)	Unidade
Cavalcante-Natividade	Norte	19	3,4580	128,70	BIF
		21	2,7153	0,690	TTG
		23	2,7640	0,818	TTG
		25	2,7238	0,696	QZT
	Centro-Sul	01	2,6461	0,452	PB
		03A	2,9269	21,195	Greisen
		05	2,7240	0,722	AU
		09A	2,6460	0,685	AU
		09B	2,6651	0,590	AU
		13	2,7839	0,738	PB
		15	2,7887	0,788	AU
		17	2,6857	1,88 (*)	AU
		28	2,6962	0,652	AU
		32	2,8055	0,846	Diorito

Nota: (*) amostra obtida próxima à borda da intrusão, resultando em um valor de susceptibilidade magnética mais elevado para o background de rochas graníticas

Observa-se que os valores médios de densidade das amostras é 2,7044 g/cm³, valor que converge com os valores atribuídos para rochas graníticas na literatura (2,5 a 2,7 g/cm³), como apresentado por Schön (2004). Desse modo, a resposta gravimétrica da porção centro-sul, com valores médios a baixos de Anomalia Bouguer, também reflete a formação predominante de suítes graníticas e consequente assinatura baixa de densidade. A média dos valores de susceptibilidade dos granitos é 0,6841 10⁻³SI, compatível com os valores de susceptibilidade apresentados para granitos na literatura (10⁻³SI a 10⁻¹SI) (Schön 2004). As rochas metassedimentares constituintes do Grupo Araí que dominam a porção centro-sul, nas proximidades de Cavalcante, reforçam a baixa assinatura de densidade observada na região (Schön 2004).

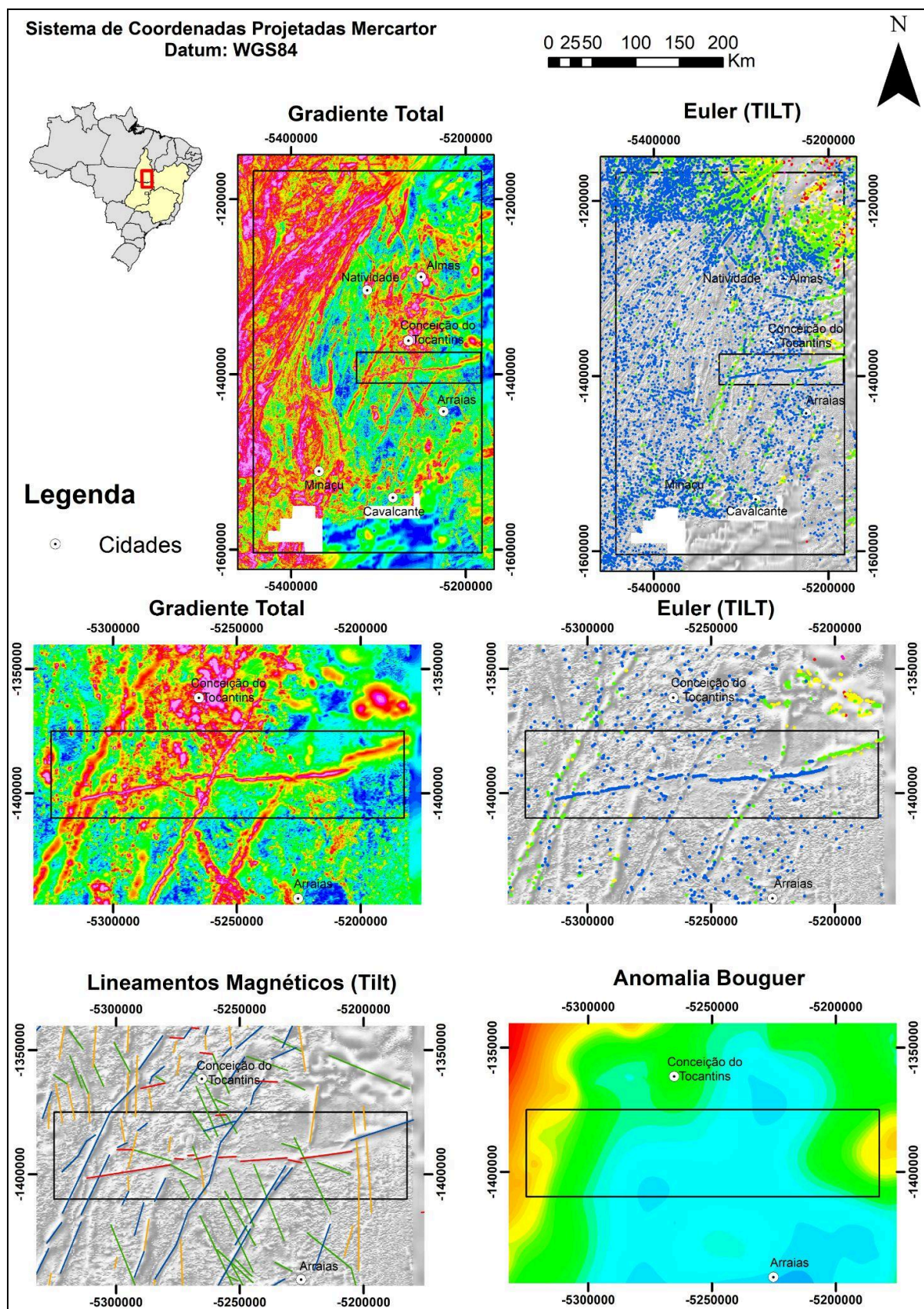


Figura 5.16: Mapa de detalhe da divisão geofísica do Bloco Cavalcante-Natividade.

Essa porção do bloco não apresenta assinatura magnética similar àquela encontrada na porção norte, pois os lineamentos magnetométricos exibem direção principal NE-SW, com NW-SE, N-S e E-W subordinados. Os lineamentos magnetométricos na direção NE-SW estão associados a falhas, com baixa frequência, e anomalias magnéticas esparsas (0,0345 a 0,0765 nT/m), predominantemente com formas circulares, dimensões reduzidas e raramente balizadas por falhas. Nos locais onde afloram as rochas vulcânicas do Grupo Araí, diques e principalmente soleiras, os valores de susceptibilidade magnética podem ser mais elevados, como para riolitos (10^{-6} SI a 10^{-2} SI) e diabásios (10^{-3} SI a 10^{-1} SI) (Schön 2004).

O extenso lineamento magnetométricos com direção E-W (Figura 5.16), localizado aproximadamente na coordenada Y = -1.400.000 m (World Mercator), corta os lineamentos com direção NE-SW, sendo caracterizado em profundidades rasas (50 a 500 m), pela aplicação das soluções de Euler. Nessa porção centro-sul do bloco as profundidades rasas predominam, identificando feições lineares.

Interpreta-se esse lineamento (Figura 5.16) como feição divisória das porções norte e centro-sul do Bloco Cavalcante-Natividade, que apresentam assinaturas gravimétricas e magnéticas distintas, delimitando dois possíveis terrenos com origens diferentes, como sugerido por Brito Neves et al. (2021). Esses autores apresentam o bloco como um terreno que teve sua origem associada ao Maciço de Goiás ou ao paleocontinente do São Francisco, antes de constituir a Província Tocantins.

5.3 Modelo Geofísico-Geológico 3D

A partir das assinaturas geofísicas obtidas no subitem 5.2 “Bloco Crustal Cavalcante-Natividade”, foram selecionados três perfis, que representam as regiões Norte, Centro e Sul do bloco, com base nas assinaturas geofísicas dos distintos ambientes observadas e na presença de amostras coletadas. Os perfis serão apresentados nos modelos de inversão 3D de densidade e susceptibilidade magnética a fim de trazer informações de subsuperfície. Essas informações serão associadas à geologia da região, conforme Alvarenga et al. (2007), Frasca et al. (2010), Sabóia et al. (2020a), Martins-Ferreira et al. (2020), Brito Neves et al. (2021) e Toscani et al. (2021).

A Figura 5.17 apresenta o mapa de localização dos perfis A-A', B-B' e C-C'. Para interpretação dos perfis, adicionou-se a profundidade de 10 km como referência, em concordância com as fontes mais profundas obtidas pelo produto *Matched Filtering* (Figura 4.13). Nos perfis, foram discriminadas áreas que possuem assinatura de densidade e susceptibilidade magnética comum.

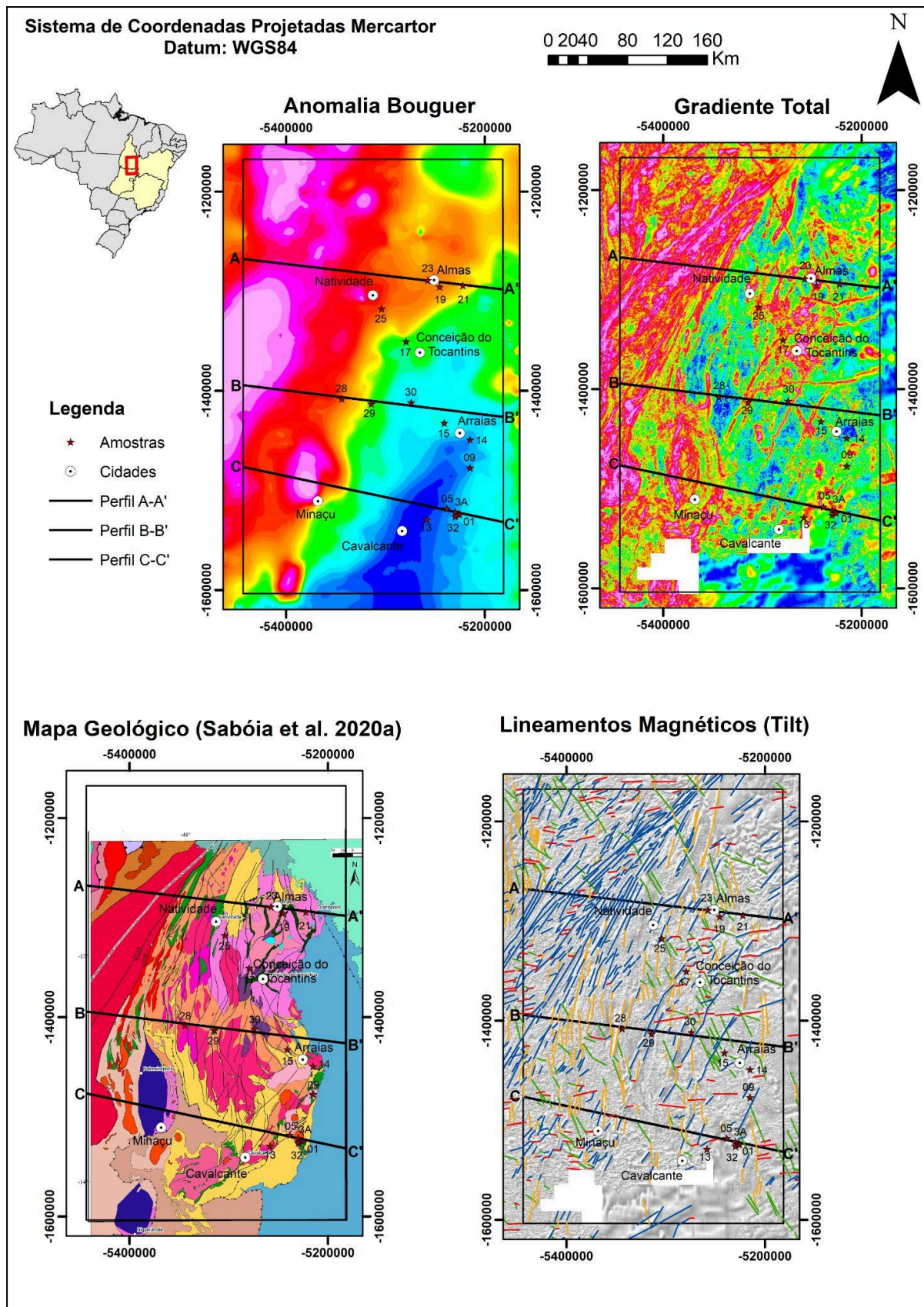


Figura 5.17: Mapa de localização dos perfis A-A', B-B' e C-C'.

Perfil A-A'

Na porção oeste do perfil (Figura 5.18), Área A1, ocorre uma feição de continuidade lateral expressiva e elevada susceptibilidade magnética ($4,1$ a $7,7 \cdot 10^{-3}$ SI). O comportamento da susceptibilidade assemelha-se a condutos vulcânicos com afinamento nas porções mais superficiais. Nessa região as densidades também se mostram com continuidade lateral de média a baixa (de $2,78$ a $2,68 \text{ g/cm}^3$), da superfície até a profundidade aproximada de 10 km . A partir dessa profundidade, as densidades apresentam valores mais elevados ($2,85 \text{ g/cm}^3$) até atingir a base do perfil. Uma feição localizada, aproximadamente, 25 km (Eixo X) é associada às rochas do Arco Magmático de Mara Rosa e mostra diferenciação a partir do intervalo de profundidade de 7 a 10 km , com baixos valores de densidade ($2,6770 \text{ g/cm}^3$), que se relaciona à granitogênese do Arco Magmático (Schön 2004), por exemplo, como as rochas da Suíte Ipueiras presente nas proximidades do perfil (Frasca et al. 2010). Os valores de densidade mais elevados ($2,85 \text{ g/cm}^3$) são interpretados como o embasamento do Arco Magmático que é parte da Placa Amazônica.

Na porção final da Área A1 (Figura 5.18), observa-se um corpo individualizado (Eixo X: 65 km) de densidade intermediária a alta ($2,68 \text{ g/cm}^3$) cujas bordas, de densidade menor, são associadas, em superfície, com a zona de sutura Rio dos Bois (RB; Sabóia et al. 2020). Esse corpo apresenta assinatura de susceptibilidade magnética alta em superfície ($4,11 \cdot 10^{-3}$ SI), com tendência de diminuição dos valores na profundidade aproximada de 10 km e mostra valores mais elevados na base do perfil ($7,70 \cdot 10^{-3}$ SI). A assinatura magnética dessa porção assemelha-se a um conduto de menor diâmetro nas profundidades intermediárias que parece ter favorecido a ascensão do material magmático fonte das rochas nessa porção. O padrão de assinaturas de densidade mostra que a feição observada tem formato oval, cujas maiores densidades se concentram na parte central, com valores de $2,68 \text{ g/cm}^3$. Nas proximidades da superfície, as densidades apresentam valores medianos $2,67 \text{ g/cm}^3$.

A Área A2 exibe comportamento similar de susceptibilidade magnética e densidade às aquelas apresentadas pela Área A1 (Figura 5.18). No entanto, a continuidade lateral com padrão estratificado das assinaturas geofísicas torna-se mais evidente, com valores de $0,20 \cdot 10^{-3}$ SI a $2,3 \cdot 10^{-3}$ SI e $2,68 \text{ g/cm}^3$ a $2,77 \text{ g/cm}^3$, do topo para a base (10 km de profundidade). As porções (Eixo X: 85 km e 120 km , aproximadamente) com baixas assinaturas estão correlacionadas às rochas da Formação Ticunzal e da Suíte Aurumina. Nesse contexto a Área A2 está inserida na porção que corresponde ao Domínio Almas – Conceição, Província Tocantins (Fuck et al. 2014).

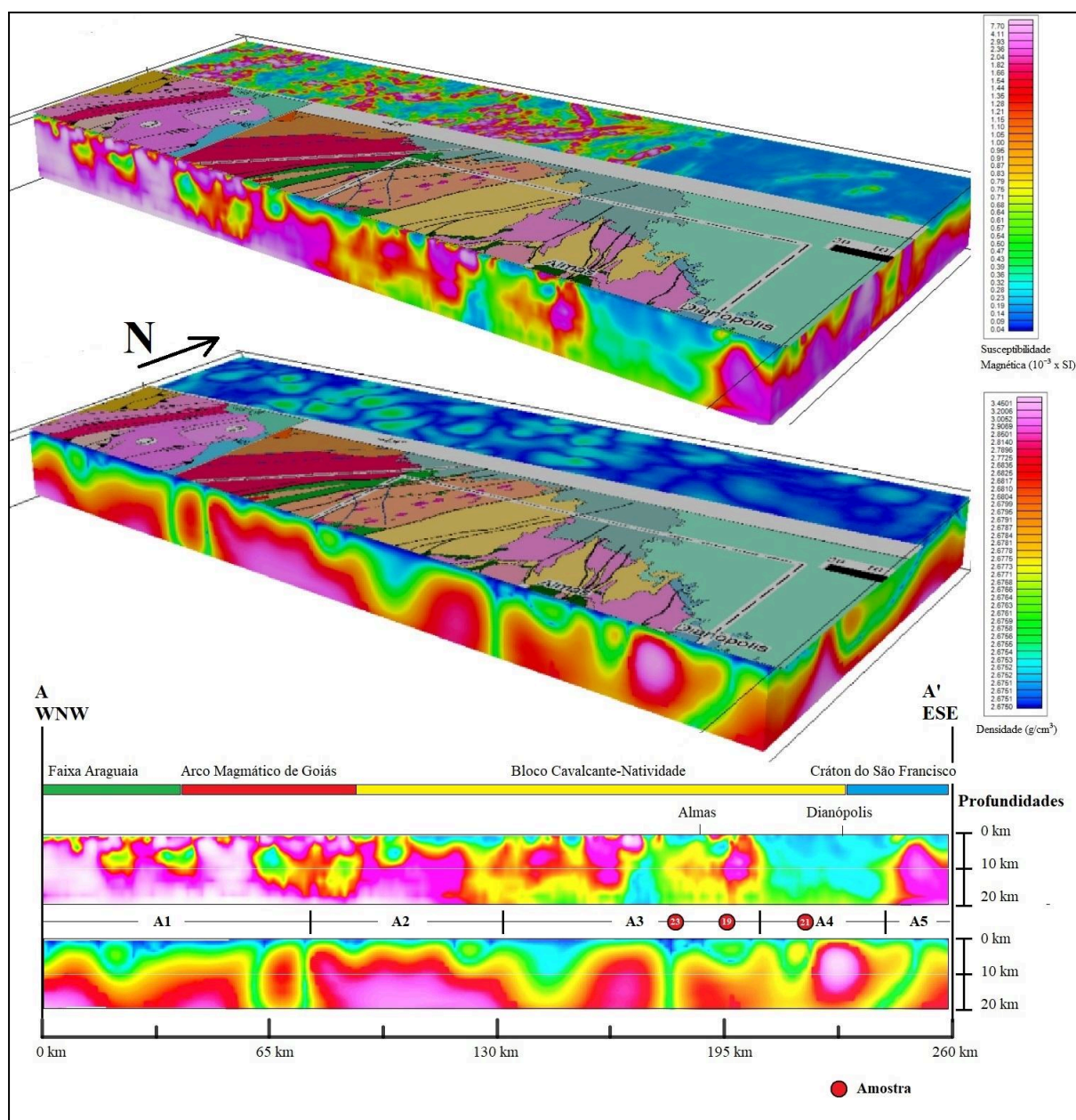


Figura 5.18: Perfil A-A' de susceptibilidade magnética e densidade.

Na porção central do perfil define-se a Área A3 (Figura 5.18), com susceptibilidade magnética mediana ($0,75 \cdot 10^{-3}$ SI) e localmente elevada ($3,0 \cdot 10^{-3}$ SI). Os dados de densidade mostram continuidade com a Área A2, contudo a região (Eixo X: 165 km, aproximadamente) possui densidade baixa ($2,6755 \text{ g/cm}^3$) com variação abrupta. Interpreta-se que esse limite com valores baixos de susceptibilidade magnética e densidade é uma zona de cisalhamento próxima da cidade de Almas, como mostrado por Sabóia et al. (2020a) e Martins-Ferreira et al. (2020).

As assinaturas baixas de densidade, localizadas em 145 km (Figura 5.18), em forma de bacia/calha, correspondem às rochas metassedimentares paleo/mesoproterozoicas do Grupo Natividade e apresentam valores de $2,6753 \text{ g/cm}^3$ a $2,6768 \text{ g/cm}^3$ (Sabóia et al.

2020a; Toscani et al. 2021). Interpreta-se que as assinaturas elevadas de susceptibilidades ($3,0 \cdot 10^{-3}$ SI), que ocorrem mais comumente em superfície, estão associadas às falhas e/ou diques e às rochas do Grupo Riachão do Ouro (Sabóia et al. 2020a).

A Área A4 (Figura 5.18) exibe baixa susceptibilidade magnética ($0,28 \cdot 10^{-3}$ SI) e densidade intermediária ($2,6773 \text{ g/cm}^3$). Destaca-se uma feição circular (Eixo X: 222,5 km) com alta densidade ($3,45 \text{ g/cm}^3$), em subsuperfície. Em mapa, observa-se, nas proximidades de Dianópolis, as rochas do Grupo Riachão do Ouro (Sabóia et al. 2020a; Martins-Ferreira et al. 2020). Entretanto, interpreta-se que essa feição circular não exibe assinatura geofísica coerente com as rochas aflorantes, sendo sua assinatura geofísica interpretada como uma intrusão ácida a intermediária (Suíte Serra do Boqueirão?!).

No final do perfil a Área A5 (Figura 5.18) mostra elevada susceptibilidade magnética ($2,90 \cdot 10^{-3}$ SI) e valores de densidade intermediários ($2,677 \text{ g/cm}^3$). Essa assinatura magnética contrasta com a da Área A4 e a baixa resposta de densidade limita as duas áreas. Em superfície, o limite entre essas áreas é interpretado como uma falha contracional ou zona de cisalhamento, a leste de Dianópolis, conforme Sabóia et al. (2020a). Também Hasui et al. (1990) sugerem uma possível correlação com o Grupo Bambuí, de idade neoproterozóica, evidenciando o comportamento de densidade média a elevada e baixa susceptibilidade magnética. As respostas de susceptibilidade magnética e densidade indicam que essa zona seja uma sutura entre o Bloco Cavalcante-Natividade, Província Tocantins, e a Placa do São Francisco.

Perfil B-B'

A Área B1 apresenta susceptibilidade magnética intermediária ($0,73 \cdot 10^{-3}$ SI) e localmente (Eixo X: 60 km, aproximadamente) alta ($7,70 \cdot 10^{-3}$ SI), enquanto a assinatura de densidade varia de média ($2,677 \text{ g/cm}^3$) a alta ($3,20 \text{ g/cm}^3$) (Figura 5.19). No modelo de densidade, observa-se a individualização de feições (Eixo X: 33 km e 70 km, aproximadamente) que são limitadas por baixas densidades ($2,6765 \text{ g/cm}^3$). Essas são interpretadas como correspondentes às zonas de sutura Rio dos Bois e Rio Maranhão, respectivamente, a leste e a oeste.

Essas feições são relacionadas às zonas de cisalhamento e à presença de complexos ígneos associados a cinturões de empurrão, apresentando-se como principais evidências de zonas de sutura colisionais que indicam os limites entre diferentes domínios. Modelos geotectônicos baseados em levantamentos gravimétricos sugerem que os domínios observados na Província Tocantins resultaram da colisão de terrenos diferentes, culminando

no amálgama dos arcos magmáticos, Maciço de Goiás e o Bloco Cavalcante-Natividade (Soares et al. 2006; Fuck et al. 2014).

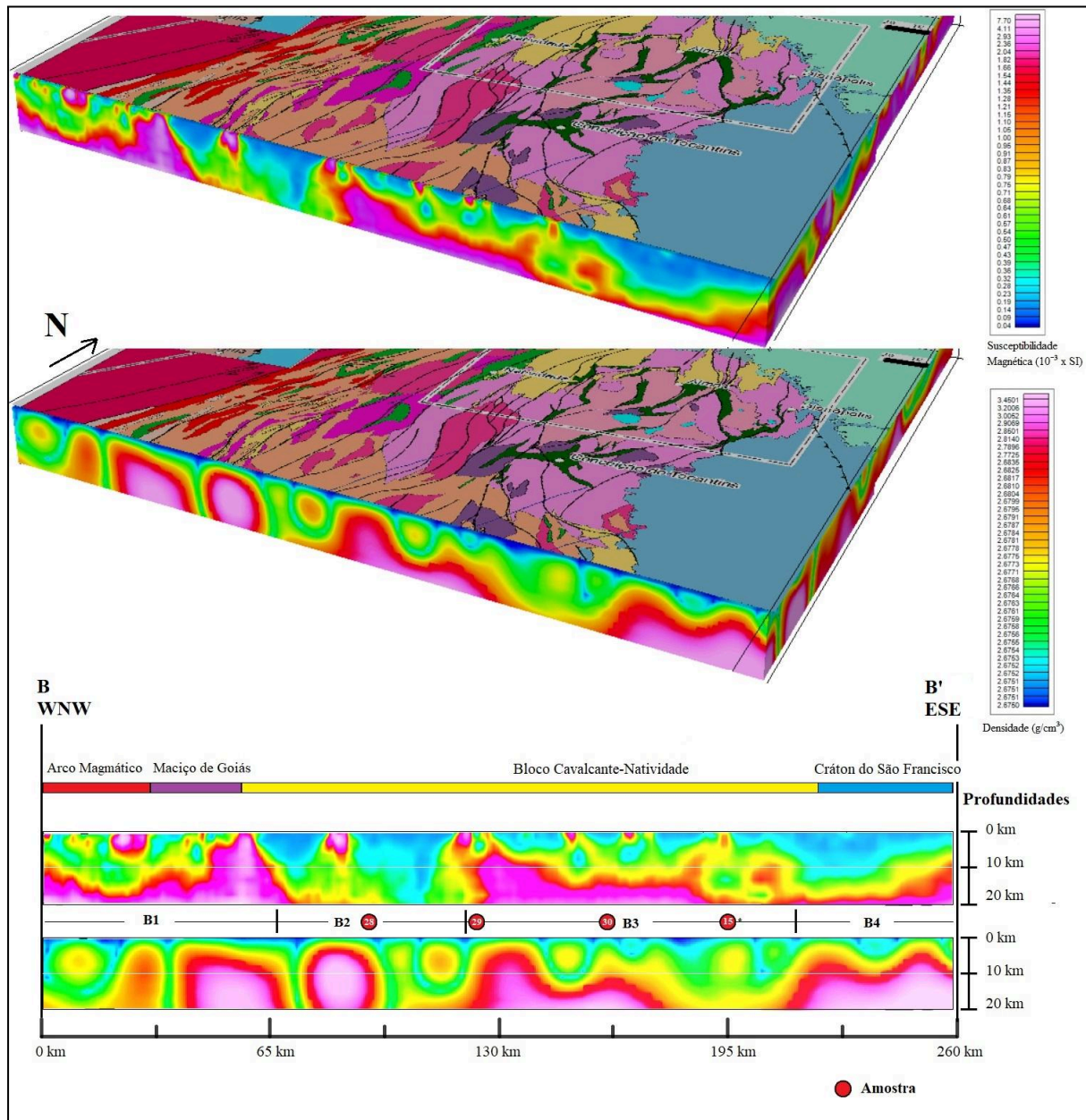


Figura 5.19: Perfil B-B' de susceptibilidade magnética e densidade.

A resposta de alta susceptibilidade magnética ($7,70$ a $2,0 \cdot 10^{-3}$ SI) é interpretada como falhas ou diques, localizadas no Eixo X 50 km (Figura 5.19), podendo também estar associadas às rochas vulcanossedimentares do Grupo Água Suja (Sabóia et al. 2020a).

Na Área B2 (Figura 5.19) predomina uma resposta de susceptibilidade magnética baixa ($0,28 \cdot 10^{-3}$ SI) e pontualmente feições restritas de alta susceptibilidade magnética ($4,10 \cdot 10^{-3}$ SI). Essas respostas pontuais podem estar associadas a falhas, em superfície. A assinatura de densidade mostra feições de valores intermediários ($2,6773 \text{ g/cm}^3$) a altos ($2,80 \text{ g/cm}^3$). As regiões de densidade mediana e baixa susceptibilidade magnética são interpretadas com as

rochas da Suíte Aurumina (Cuadros et al. 2017). A feição apresentada com densidade elevada, localizada Eixo X: 85 km (Figura 5.19), pode constituir parte da intrusão máfico-ultramáfica acamadada, não aflorante, citada por Soares (2005) e Melo (2006).

Na Área B3 observa-se resposta magnética semelhante àquela mostrada na Área B2 (Figura 5.19), de susceptibilidade magnética baixa ($0,50 \cdot 10^{-3}$ SI) e altos magnéticos pontuais, relacionados às falhas ou diques, em superfície. Na resposta de densidade, observam-se valores médios ($6,6773 \text{ g/cm}^3$) a altos ($2,80 \text{ g/cm}^3$). Os valores baixos e superficiais ($2,6753 \text{ g/cm}^3$) são interpretados como as rochas da Suíte Aurumina (Cuadros et al. 2017). Em profundidade, interpreta-se que os altos valores de densidade representam a Placa do São Francisco. De acordo com De Sousa Moro et al. (2019), esse comportamento de susceptibilidade magnética está relacionado também à presença de diques que se cristalizaram mais rapidamente do que o corpo responsável pela anomalia principal em profundidade. O contraste observado entre valores altos e baixos de susceptibilidade magnética mostra que a direção de magnetização é diferente e as rochas podem ter sido formadas a partir de distintos pulsos magmáticos.

Alvarenga et al. (2007) mostram que parte das unidades da Suíte Aurumina está relacionada com estruturas N30E, modificadas localmente pela Orogênese Brasileira, em grandes corredores de cisalhamento transpressivos dextrais, seguidos por intensa milonitização e silicificação, resultando no desenvolvimento de foliação milonítica pervasiva. Esse comportamento também é observado nas rochas que compõem a Suíte Pedra Branca.

No final do perfil a Área B4 é dominada por susceptibilidade magnética baixa ($0,28 \cdot 10^{-3}$ SI) e densidade variada (Figura 5.19). Entretanto, próximo à superfície, predominam valores de baixa densidade ($2,6752 \text{ g/cm}^3$), interpretados como assinaturas das rochas sedimentares do Grupo Bambuí (Hasui et al. 1990; Fuck et al. 2014). Em subsuperfície, a área mostra aspecto de bacia/calha, realçado no perfil de susceptibilidade magnética, enquanto a elevada resposta de densidade, em profundidade, é interpretada como o embasamento da bacia ou a resposta da Placa do São Francisco.

Por hipótese, o comportamento segmentado de susceptibilidade magnética e densidade observado é embasado por diversos autores como Soares et al. (2006) e Fuck et al. (2014). Com base principalmente em dados geofísicos, esses autores mostram que os fragmentos paleoproterozóicos que formaram essa região poderiam ser uma extensão do Cráton do São Francisco. Os dados gravimétricos sugerem uma única placa (Placa do São Francisco) em profundidade (Pereira & Fuck 2005; Assumpção et al. 2006; Soares et al. 2006; Valeriano et al. 2004; Lima et al. 2023).

Perfil C-C'

A Área C1 mostra susceptibilidade magnética de (7,70 a $0,28 \cdot 10^{-3}$ SI) e densidade média ($2,6773 \text{ g/cm}^3$) a alta ($2,80 \text{ g/cm}^3$) que se relacionam em superfície com os ambientes Arco Magmático de Goiás e Maciço de Goiás (Figura 5.20). Essa interpretação baseia-se no mapa geológico apresentado por Sabóia et al. (2020) e nos valores de densidade e susceptibilidade magnética associados às rochas apresentadas por Schön (2004).

As assinaturas magnéticas elevadas estão localizadas pontualmente (Eixo X: 10 km, 35 km, 65 km,) e podem ser observadas em superfície e subsuperfície (Figura 5.20). Em 35 km e 65 km, as feições estão associadas às rochas do Complexo Máfico-Ultramáfico Canabrava (Figura 5.20). Na distância de 90 km do eixo X (Figura 5.20), observa-se uma feição circular de valores elevados de susceptibilidade magnética ($7,70 \cdot 10^{-3}$ SI) e densidade ($3,0 \text{ g/cm}^3$), interpretada como parte do Complexo Canabrava. As regiões (Eixo X: 33 km) com baixos valores de susceptibilidade magnética ($0,28 \cdot 10^{-3}$ SI), que se estendem da superfície à profundidade aproximada de 13 km, estão associadas às rochas graníticas, como o Granito Serra Dourada e Complexo Granito Gnáissico. O limite entre as áreas C1 e C2 (Figura 5.20) é interpretado como a zona de cisalhamento Rio Maranhão (Eixo X: 97,5 km).

Na porção central do perfil (Figura 5.20), Área C2, os valores de susceptibilidade são baixos ($0,28 \cdot 10^{-3}$ SI) a médios ($0,70 \cdot 10^{-3}$ SI) e os valores de densidade, em superfície, são baixos ($2,6763 \text{ g/cm}^3$) (Eixo X: 130 km e 162,5 km). Esse padrão das assinaturas geofísicas ocorre desde a superfície até maiores profundidades. Esse local é interpretado como a calha do paleorifte Araí preenchida pelas rochas metassedimentares do Grupo Araí, conforme o mapa geológico apresentado por Sabóia et al. (2020a) e informações do trabalho de Martins-Ferreira et al. (2018). Nesse local, Martins-Ferreira et al. (2018) mostram que a distribuição das principais feições interpretadas como falhas, mapeadas no Rift de Araí, mostra uma subdivisão em três ramos que formou grabens e horsts. Também, as informações da deconvolução de Euler indicam que o maior contraste de densidade ocorre em profundidade e define um padrão de blocos (Martins-Ferreira et al. 2018). Em profundidade o modelo de densidade exibe valores elevados ($2,78$ a $2,90 \text{ g/cm}^3$) que podem estar associados às rochas do embasamento do rifte onde ocorrem as rochas dos Complexos Uruaçu e Rio Maranhão e da Sequência Campinorte (Sabóia et al. 2020a).

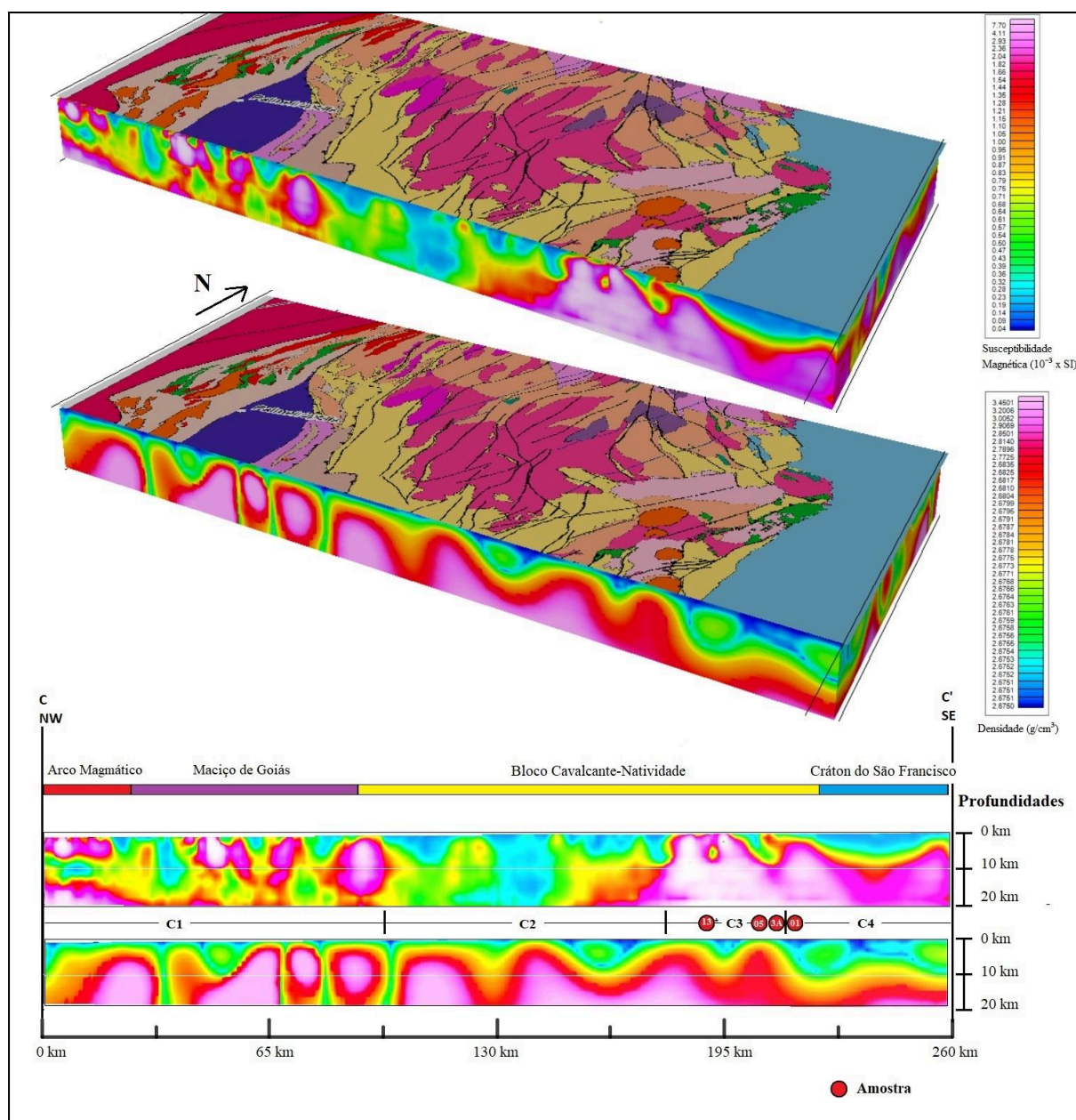


Figura 5.20: Perfil C-C' de susceptibilidade magnética e densidade.

Na Área C3 (Figura 5.20) predominam elevados valores de susceptibilidade magnética ($7,70 \cdot 10^{-3}$ SI), que ocorrem da superfície a maiores profundidades. Essa feição é interpretada como a assinatura das rochas vulcânicas do Grupo Araí. Nesse contexto, a atividade vulcânica está localizada no ramo principal descrito por Martins-Ferreira et al. (2018) e coincide com a borda leste da anomalia gravimétrica baixa da região de pesquisa. Em profundidade, essa alta susceptibilidade magnética pode indicar a fonte magmática das rochas vulcânicas do Grupo Araí e dos granitos tipo A da Suíte Pedra Branca (Carvalhêdo et al. 2020). O perfil de densidade mostra continuidade com a área C2.

Área C4 (Figura 5.20) exhibe baixos valores de susceptibilidade magnética ($0,14 \cdot 10^{-3}$ SI) e densidade ($2,6754 \text{ g/cm}^3$), nas porções mais superficiais (até 10 km, aproximadamente),

com forma de bacia, associados com as rochas metassedimentares da Grupo Bambuí (Sabóia et al. 2020a). Em profundidade, altos valores ($4,11 \cdot 10^{-3}$ SI) podem representar as fontes magmáticas das rochas vulcânicas do Grupo Araí e da Suíte Pedra Branca. No modelo de densidade, observa-se continuidade entre as áreas C2, C3 e C4 (Figura 5.20), podendo estar associado à presença da Placa do São Francisco. A anomalia Bouguer que ocorre nas áreas C2 a C4 (Figura 5.20) é caracterizada por uma anomalia negativa expressiva (>-130 mGal, Figura 5.17) e é interpretada como a combinação entre o preenchimento sedimentar e a assinatura gravimétrica de longo comprimento de onda relacionada a fontes profundas (Soares, 2005).

De acordo com Soares et al. (2006), essa resposta gravimétrica ocorre devido ao bloco sustentado pela mesma raiz litosférica do Cráton do São Francisco (Paleoplaca São Francisco), onde o bloco mais a oeste (Área C2) é separado pela falha do Rio Maranhão. Os trabalhos de De Souza Moro et al. (2018) e Martins-Ferreira et al. (2018) mostram que a deconvolução de Euler para dados gravimétricos mostrou soluções com profundidade de até 35 km. Ainda com base nas informações de Soares et al. (2006), essa assinatura indica afinamento crustal que marca o limite entre as zonas de estiramento e os domínios cratônicos, evidenciado pela Falha do Paranã. No perfil a falha do Paranã é interpretada no limite entre as Áreas C3 e C4, local onde ocorre variação brusca de densidade (de alta para baixa) e representa o limite tectônico entre os grupos Araí e Bambuí (Soares et al. 2006; Sabóia et al. 2020a).

6. Conclusões

Por meio da utilização de diferentes métodos potenciais (gravimetria terrestre e aeromagnetometria) foi possível a caracterização geofísica regional da porção centro-norte da Província Tocantins e suas regiões limítrofes (Cráton do São Francisco e Bacia do Parnaíba). Foi possível observar que o Bloco Cavalcante-Natividade possui assinaturas geofísicas particulares as quais foram caracterizadas com maior detalhamento por meio de trabalhos de campo e análises petrofísicas (densidade e susceptibilidade magnética).

Com base nessa combinação de técnicas, conclui-se:

- Definição de dois domínios geofísicos/petrofísicos internos ao Bloco Cavalcante-Natividade: Domínio Norte e Domínio Centro-Sul.
- O Domínio Norte em relação ao Domínio Centro-Sul apresenta maiores valores de Anomalia Bouguer e Anomalia Bouguer Residual (mGal), maiores valores do Gradiente Total (nT/m) que, em mapa, estão associados às rochas do Grupo Riachão do Ouro e Suíte Gameleira, maior densidade de lineamentos magnetométricos, cuja direção preferencial é NNE-SSW.
- As informações petrofísicas constataam assinaturas distintas entre os domínios do Bloco. O Domínio Norte apresenta médias elevadas de susceptibilidade magnética e densidade, enquanto o Domínio Sul exibe valores médios baixos em ambos parâmetros geofísicos.
- Os perfis dos modelos de densidade e susceptibilidade magnética gerados ao longo do Bloco Cavalcante-Natividade reforçam as observações geofísicas e geológicas. As assinaturas geofísicas dos perfis ressaltam zonas de suturas entre as unidades geotectônicas Arco Magmático de Goiás, Maciço de Goiás, Bloco Cavalcante-Natividade e Cráton do São Francisco. As falhas mapeadas em superfície coincidem com as respostas geofísicas e seus limites são observados nos contrastes de densidade e susceptibilidade magnética. As unidades sedimentares Grupo Araí, Grupo Bambuí e Grupo Natividade foram bem delimitados nos perfis apresentados.
- Com essas observações, é proposto um limite geofísico entre os domínios Norte e Centro-Sul (Figura 5.16). Esse limite coincide com o lineamento magnetométricos de direção E-W, localizado na coordenada Y de -1.400.000m (*World Mercator*), latitude aproximada de 12.5°. Há, pelo menos, duas hipóteses para a origem desse limite. A

primeira é de que ele possa representar a zona de sutura, possivelmente paleoproterozóica, entre dois terrenos distintos. A segunda é que esse limite marca a interface de desacoplamento resultando na movimentação vertical entre dois blocos.

Por fim, a pesquisa foi exitosa, contemplando os principais objetivos propostos inicialmente. Propõe-se que as pesquisas acerca do Bloco Cavalcante-Natividade sejam continuadas, a fim de agregar informações geofísicas de outra natureza, como radiação gamaespectrométrica e fluxo térmico, para melhor conhecimento dessa unidade geotectônica.

Referências Bibliográficas

- Alkmim, F. F., Martins-Neto, M. A., 2001. A bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos. *A Bacia do São Francisco geologia e recursos naturais*. SBG, Belo Horizonte, 9-30.
- Alkmim, F. F., Marshak, S. Fonseca, M. A., 2001. Assembling West Gondwana in the Neoproterozoic: Clues from the São Francisco craton region, Brazil. *Geology*, v. 29, p. 319–322.
- Alkmim, F.F., Martins-Neto, M.A., 2005. Brazil. In: *Encyclopedia of Geology*, vol 1. Elsevier, Amsterdam, p. 306–327.
- Almeida, F. F. M., Hasui, Y., Brito Neves B. B.; Fuck, R. A., 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews*, 17(1-2), 1-29.
- Alvarenga, C. J. S., Moura, C. A. V., Gorayeb, P. S. S., Abreu, F. A. M., 2000. Paraguay and Araguaia Belts. In: *Cordani U. G.; Milani E. J.; Thomaz Filho A.; Campos D. A. (Org.). Tectonic Evolution of South America. Rio de Janeiro: 31st International Geological Congress, 2000*, pp. 183–193.
- Alvarenga, C. J. S., Botelho, N. F., Dardenne, M. A., Lima, O. N. B. de, Machado, M. A. 2007. Relatório final das folhas Monte Alegre de Goiás, Cavalcante e Nova Roma. Programa Geologia do Brasil (PGB/CGB). Escala 1:100.000. Goiânia: CPRM; UnB.
- Araújo Filho, J. O. de., 2000. The Pirineus Syntaxis: an example of the intersection of two brasileiro Fold-Thrust belts in central Brazil and its implications for the tectonic evolution of western Gondwana. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 30, n. 1, p. 144–148.
- Assumpção, M., Heintz, M., Vauchez, A., Silva, M. E. 2006. Upper mantle anisotropy in SE and Central Brazil from SKS splitting: evidence of asthenospheric flow around a cratonic keel. *Earth and Planetary Science Letters*, 250(1-2), 224-240.
- Assumpção, M., Bianchi, M. B., Julià, J., Dias, F.L., França, G. S., Nascimento, R. M., Drouet, S., Pavão, C. G., Albuquerque, D. F., Lopes, A.V., 2013a. Crustal thickness map of Brazil: Data compilation and main features. *J. South Am. Earth Sci.*, vol 43, p. 74–85.
- Assumpção, M., Feng, M., Tassara, A., Julià, J., 2013b. Models of crustal thickness for South America from seismic refraction, receiver functions and surface wave tomography. *Tectonophysics*, vol 609, p. 82–96.
- Assumpção, M., Azevedo, P. A., Rocha, M. P., Bianchi, M. B., 2017. Lithospheric Features of the São Francisco Craton. . In: Heilbron, M., Cordani, U., Alkmim, F. (eds) *São Francisco Craton, Eastern Brazil. Regional Geology Reviews*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-01715-0_2.
- Berrocal, J., Marangoni, Y., Sá, N. C., Fuck, R. A., Soares, J. E. P., Perosi, F., Fernandes, C., 2004. Deep seismic refraction and gravity crustal model and tectonic deformation in Tocantins Province Central Brazil. *Tectonophysics*, vol 388, p. 187–199.

- Brito-Neves, B. B. de; NETO, M. C. C., FUCK, R. A., 1999. From Rodinia to Western Gondwana: An approach to the Brasiliano-Pan African Cycle and orogenic collage. *Episodes*, 22:155-166.
- Brito-Neves, B. B. de, Fuck, R. A., Campanha, G. A. da C. 2021. Basement inliers of the Brasiliano structural provinces of South. *Journal of South American Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103392>
- Campanha, G. A. da C., Boggiani, P. C., Sallun Filho, W., Sá, F. R. de, Zuquim, M. de P. S., & Piacentini, T., 2011. A faixa de dobramento Paraguai na Serra da Bodoquena e depressão do Rio Miranda, Mato Grosso do Sul. *Geologia USP. Série Científica*, v. 11(3), p. 79-96. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X2011000300005>
- Carvalhêdo, A. L. C., Carmelo, A. C., Botelho, N. F., 2020. Geophysical-geological model of the Pedra Branca massif in the Goiás Tin Province, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102593>
- Cordani, U.G., Teixeira, W., 2007. Proterozoic Accretionary belts in the Amazonian Craton. *Geological Society of America*, v. 200, p. 297–320.
- Cordani, U. G., 2017. História geológica do Craton Amazônico. *In Um olhar diferenciado das Geociências para a sustentabilidade da Amazônia. SBG*, p. 11-17.
- Cruz, E. L. C. C., 2001. Gênese e o contexto tectônico da mina Córrego Paiol, terreno Almas-Conceição: Um depósito de ouro hospedado em anfíbolito do embasamento da Faixa de Dobramentos Brasília. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasil. 183 p.
- Cuadros, F. A., Botelho, N. F., Fuck, R. A., Dantas, E. L., 2017a. The peraluminous Aurumina Granite Suite in central Brazil: an example of mantle-continental crust interaction in a Paleoproterozoic cordilleran hinterland setting. *Precambrian Research*, vol 299, p. 75-100.
- Cuadros, F. A., Botelho, N. F., Fuck, R. A., Dantas, E. L., 2017b. The Ticunzal Formation in central Brazil: Record of Rhyacian sedimentation and metamorphism in the western border of the São Francisco Craton, *Journal of South American Earth Sciences*, vol 79, p. 307-325.
- Daly, M. C., Andrade, V., Barousse, C. A., Costa, R., McDowell, K., Piggott, N., Poole, A. J., 2014. Brasiliano crustal structure and the tectonic setting of the Parnaíba basin of NE Brazil: Results of a deep seismic reflection profile, *Tectonics*, vol 33, p. 2102-2120. [doi:10.1002/2014TC003632](https://doi.org/10.1002/2014TC003632).
- Dardenne, M. A., Botelho, N. F., 2014. Metalogênese da Zona Externa da Faixa Brasília. In: M. G. Silva; M. B. R. Neto; H. Jost; R. M. Kuyumjian; *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*. 1ª ed., Belo Horizonte: CPRM, p.431–454.
- De Sousa Moro, P., Cuadros, F. A. J., Vidotti, R. M. 2019. Geophysical characterization of the remanent anomaly in the Paleo/Mesoproterozoic Araí Intracontinental Rift, Brazil. *ASEG Extended Abstracts*, 2019(1), 1-6.
- Frasca, A. A. S., Lima, H. A., Moraes, L. L. de, Ribeiro, P. S. E. 2010. Geologia e recursos minerais da folha Gurupi: folha SC.22-Z-D. CPRM.

- Fuck, R. A., Jardim de Sá, E. F., Pimentel, M. M., Dardenne, M. A., Pedrosa-Soares, A. C., 1993. As faixas de dobramentos marginais do Cráton do São Francisco: síntese dos conhecimentos. *O Cráton do São Francisco*, p. 161–185.
- Fuck, R. A., 1994. A Faixa Brasília e a compartimentação tectônica na Província Tocantins. *SBG, Simpósio de Geologia do Centro-Oeste*, v. 4, p. 184–187.
- Fuck, R. A., Dantas, E. L., Pimentel, M. M., Botelho, N. F., Armstrong, R., Laux, J. H., Junges, S. L., Soares, J. E. P., Praxedes, I. F., 2014. Paleoproterozoic crust-formation and reworking events in the Tocantins Province, central Brazil: A contribution for Atlantica supercontinent reconstruction. *Precambrian Research*, v. 244, p. 53–74.
- Fuck, R. A., Pimentel, M. M., Alvarenga, C. J. S., Dantas, E. D., 2017. The Northern Brasília Belt. In: *Heilbron M., Cordani U., Alkmim F. (eds) São Francisco Craton, Eastern Brazil. Regional Geology Reviews. Springer, Cham.*
- Hasui, Y., Costa, J., Saad, A. R., Campanha, V. A. 1990. O Grupo Natividade e sua correlação com o Grupo Bambuí. *Geociências*, 299-316.
- Heilbron, M., Cordani, U. G., Alkmim, F. F., 2017. The São Francisco craton and its margins. In: *São Francisco Craton, Eastern Brazil* (pp. 3-13). Springer, Cham.
- Hinze, W. J., 2013. *Gravity and Magnetic Exploration – Principles, Practices and Applications*. Cambridge University Press, New York.
- Hodel, F., Trindade, R. I. F., Macouin, M., Meira, V. T., Dantas, E. L., Paixão, M. A. P., Rospabé, M., Castro, M. P., Queiroga, G. N., Alkmim, A. R., Lana, C. C., 2019. A Neoproterozoic hyper-extended margin associated with Rodinia's demise and Gondwana's build-up: The Araguaia Belt, central Brazil. *Gondwana Research*, vol 66, p 43-62. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.08.010>.
- Kearey, P., Brooks, M., Hill, I., 2009. *Geofísica de exploração: Tradução Maria Cristina Moreira Coelho*. São Paulo, Oficina de Textos, 438 p.
- Lima, D.P.D., Carvalhêdo, A.L.C., Chornobay, A., Carmelo, A.C., 2020. Uso de dados potenciais de satélite (WGM2012 e EMAG2) para caracterização geotectônica do Cráton São Francisco e regiões adjacentes. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 6, n. 10, p. 83744-93753. doi: 10.34117/bjdv6n10-712.
- Lima, D. P. D., Carmelo, A. C., Soares, J. E. P., de Lima, M. V. A. G., Fuck, R. A., 2023. Gravity inversion for crustal thickness investigation of the continental and oceanic crusts of Brazil incorporating a lithosphere thermal gravity anomaly correction, *Tectonophysics*, vol 846. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229663>.
- Martins-Ferreira, M. A. C., Campos, J. E. G., Huelsen, M. G. V., Neri, B. L. 2018. Paleorift structure constrained by gravity and stratigraphic data: The Statherian Araí rift case. *Tectonophysics*. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.05.014>
- Martins-Ferreira, M. A. C., Dias, A. N. C., Chemale, F., Campos, J. E. G., Seaine, M., Novais-Rodrigues, E. 2020. Multi-stage crustal accretion by magmatic flare-up and quiescence intervals in the westernmargin of the São Francisco Craton: U-Pb-Hf and

geochemical constraints from the Almas Terrane. *Gondwana Research*.
<https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.04.005>

Melo, S. S. V. de. 2006. Razão de Poisson da crosta superior da região de Porangatu, Goiás, Província Tocantins: um estudo por refração sísmica. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília

Pereira, R. S., Fuck, R. A., 2005. Archean nucleii and the distribution of kimberlite and related rocks in the São Francisco craton, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 35(3), 93-104.

Phillips, J. D. 2001. Designing matched bandpass and azimuthal filters for the separation of potential-field anomalies by source region and source type. *ASEG Extended Abstracts*.

Pimentel, M., Jost, H., Fuck, R., 2004. O embasamento da Faixa Brasília e o Arco Magmático de Goiás. *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. 355-368.

Pimentel, M. 2016. The tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil: a geochronological and isotopic approach. *Brazilian Journal of Geology*, vol 46.
<https://doi.org/10.1590/2317-4889201620150004>

Praxedes, I. F., 2015. Lineamento transbrasiliano, contribuição aerogeofísica, tectônica e geocronológica no setor nordeste da faixa Brasília. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasil.

Reid, A., 2012. Forgotten truths, myths and sacred cows of Potential Fields Geophysics - II. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, p. 1-3, SEG

Reid, A. B., 2014. Avoidable Euler Errors - the use and abuse of Euler deconvolution applied to potential fields. *Geophysical Prospecting*. Volume 62. p. 1162-1168

Reis, H. L. S., Alkmim, F. F., Pedrosa-Soares, A. C., Barbosa, M. S. C., 2011. The Três Marias Salient of the Neoproterozoic Brasília Foreland Fold-Thrust Belt, São Francisco Basin, Brazil. *Gondwana 14*, Abstracts. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Reynolds, J. M., 2011. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley & Sons, Inc. 605 Third Avenue. New York, NY, USA.

Richarte, D., Lupari, M., Pesce, A., Nacif, S., Gimenez, M. 2017. 3-D crustal-scale gravity model of the San Rafael Block and Payenia volcanic province in Mendoza Argentina. *Geoscience Frontiers* 9: 239-248.

Rivadeneyra-Vera, C., Bianchi, M., Assumpção, M., Cedraz, V., Julià, J., Rodríguez, M., 2019. An updated crustal thickness map of central South America based on receiver function measurements in the region of the Chaco Pantanal and Paran'a Basins southwestern Brazil. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol 124, p. 8491–8505.

Rocha, M. P., Azevedo, P. A., Assumpção, M., Pedrosa-Soares, C., Fuck, R., Huelsen, M. G. V., 2019. Delimiting the Neoproterozoic São Francisco Palecontinental Block with P-wave

traveltime tomography, *Geophysical Journal International*, 209, 633-644. doi: 10.1093/gji/ggz323.

Ruiz, A. S., 2005. Evolução Geológica do Sudoeste do Cráton Amazônico Região Limítrofe Brasil-Bolívia – Mato Grosso. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de São Paulo, Brasil.

Sabóia, A. M., de Oliveira, C. G., Dantas, E. L., Scandolara, J. E., Cordeiro, P., Rodrigues, J. B., de Sousa, I. M. C., 2020a. The 2.26 to 2.18 Ga Arc-Related Magmatism of the Almas-Conceição do Tocantins Domain: An Early Stage of the São Francisco Paleocontinent Assembly in Central Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102757>

Sabóia, A. M., de Oliveira, C. G., Dantas, E. L., Scandolara, J. E., Cordeiro, P., Rodrigues, J. B., de Sousa, I. M. C. 2020b. The Siderian crust (2.47–2.3 Ga) of the Goiás Massif and its role as a building block of the São Francisco paleocontinent. *Precambrian Research*. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105901>

Schön, J. H., 2004. *Physical Properties of Rocks: Fundamentals and Principles of Petrophysics*. Pergamon. p. 600.

Serafim, I. C. C. O., 2017. Caracterização Magnética e Gamaespectrométrica de Zonas de Alteração Hidrotermal Associadas à Prospecção Aurífera, Nova Roma e Monte Alegre de Goiás. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília.

Soares, J. E. P., 2005 Estudos de refração sísmica profunda, função do receptor e gravimetria na Província Tocantins, Brasil Central. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.

Soares, J. E. P., Berrocal, J., Fuck, R. A., Mooney, W., Ventura, D. B. R., 2006. Seismic characteristics of central Brazil crust and upper mantle: a deep seismic refraction study. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 111, n. B12.

Soares, J. E. P. , Stephenson, R., Fuck, R. A., Lima, M. V., de Araújo, V.C., Lima, F. T., Trindade, C. R., 2018. Structure of the crust and upper mantle beneath the Parnaíba Basin, Brazil, from wide-angle reflection–refraction data. *Geological Society, London, Spec. Publ.* vol 472, p. 67–82. <https://doi.org/10.1144/SP472.9>

Sousa, I. M. C. de, Giustina, M. E. S. D., de Oliveira, C. G., 2016. Crustal evolution of the northern Brasília Belt basement, central Brazil: A Rhyacian orogeny coeval with a pre-Rodinia supercontinent assembly. *Precambrian Research*, vol 273, p. 129-150.

Spector, A., Grant, F. S. 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35(2), 293-302.

Syberg, F. J. R. 1972. A fourier method for the regional-residual problem of potential fields. *Geophysical Prospecting*, v. 20, n. 1, p. 47–75.

Tassinari, C. C. G., Macambira, M. J. B., 2004. A evolução tectônica do Cráton Amazônico. *In: Recursos minerais e desenvolvimento socioeconômico. S.l.: SBG*, p. 433-447.

Telford, W. M.; Geldart, L. P.; Sheriff, R. E., 1990. Applied geophysics. Cambridge university press, 744p.

Toscani, R., Campos, J. E. G., Martins-Ferreira, M. A. C., Matos, D. R., Borges, C. C. A., Dias, A. N. C., Chemale, F. 2021. The Statherian Natividade Basin evolution constrained by U–Pb geochronology, sedimentology, and paleogeography, central Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103618>

Valeriano, C. D. M., Dardenne, M. A., Fonseca, M. A., Simões, L. S. A., Seer, H. J. 2004. A evolução tectônica da Faixa Brasília. In: Mantesso Neto V.; Bartorelli A.; Carneiro C.D.R.; Brito Neves B.B. (Org.). *Geologia do Continente Sul-Americano: evolução e obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca, São Paulo, 575-593.

Valeriano, C. D. M., Pimentel, M. M., Heilbron, M., Almeida, J. C. H., Trouw, R. A. J., 2008. Tectonic evolution of the Brasília Belt, Central Brazil, and early assembly of Gondwana. *Geological Society, London, Special Publications*, 294(1), 197-210.

Ventura, D. B. R., Soares, J. E. P., Fuck, R. A., Caridade, L. da C. C., 2011. Caracterização sísmica e gravimétrica da litosfera sob a linha de refração sísmica profunda de Porangatu, Província Tocantins, Brasil Central. *Revista Brasileira de Geociências*, 41(1): 130-140.

Li, X., 2006. Understanding 3D analytic signal amplitude. *GEOPHYSICS*, 71 (2), L13-L16. <https://doi.org/10.1190/1.2184367>